https//doi.org/10.33136/stmaXXXX.XX.XXX
УДК 629.764.085.5
ISSN 2617-5525 (Print)
ISSN 2617-5533 (Online)
Creative Commons Attribution 4.0

А. А. Пустовгаров, https://orcid.org/0009-0007-5456-2972

КОНЦЕПЦІЯ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПУСКОВОГО СУДНА МОРСЬКОГО РАКЕТНО-КОСМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ В ТОЧЦІ СТАРТУ

Космічний ринок пускових послуг у XXI сторіччі стрімко розвивається. Кількість державних і приватних організацій, що намагаються створити ракети космічного призначення та запропонувати їх усім, хто бажає виводити корисні вантажі в космос, постійно зростає. Під час розробляння ракетно-космічних комплексів усе частіше для економії коштів і пришвидшення створення звертають увагу на можливість здійснення пусків ракет з морської акваторії в різних точках світу. Для цього потрібні спеціальні пускові судна. Однією з найважливіших проблем є забезпечення точного утримання пускового судна в точці старту, що можна забезпечити за допомогою систем позиціонування. Ці системи можуть бути якірними (коли це зумовлено конструкцією судна або коли дозволяє глибина моря) чи динамічними з використанням двигунно-рушійних комплексів і спеціальних засобів керування. Коротко розглянуто концепцію саме динамічної системи позиціонування пускового судна. Актуальним є визначення достатності кількості елементів двигунно-рушійного комплексу та їхніх проєктних тягових характеристик для забезпечення утримання пускового судна. Для цього необхідно було провести досить велику кількість обчислень. Це, у свою чергу, викликає потребу у формуванні вихідних даних, починаючи з характеристик пускового судна та закінчуючи параметрами моря та атмосфери в точці старту. Окремо визначено граничні значення параметрів знесення судна, які не повинні бути перевищені. Під час проєктування пускового судна було використано сучасні програмні комплекси для 3D-моделювання. Обчислення поведінки пускового судна в морі, а також розрахунки роботи системи динамічного позиціонування проведено в сучасному програмному комплексі кінцево-елементного аналізу Ansys. Наведено структурну схему системи динамічного позиціонування пускового судна. Показано результати розрахунків роботи цієї системи з урахуванням можливих комбінацій впливу течії, вітру та хвиль. З'ясовано особливості впливу цих чинників на пускове судно. Зроблено висновок про ефективність запропонованої системи. Зазначено, що результати роботи матимуть цінність при переході до практичної реалізації (наприклад, під час проєктування пускового судна). При цьому з'являється можливість заздалегідь сформувати вимоги до системи динамічного позиціонування.

Ключові слова: знесення пускового судна, Ansys AQWA, JONSWAP, напрямки хвиль, вітру та течії.

The 21st century space launch services market is rapidly evolving. The number of government and private organizations seeking to design space launch vehicles and offer them to anyone wishing to launch payloads into space is constantly growing. When developing space launch systems, attention is increasingly being paid to the feasibility of launching rockets from offshore locations worldwide to save money and accelerate development efforts. This requires specialized launch platforms. One of the most critical challenges is to ensure that such a platform remains precisely positioned in the launch zone until liftoff. Positioning systems can help achieve this. They can use anchors, if the vessel's design requires so or if the sea depth permits; alternatively, they can employ propulsion systems and specialized control mechanisms for dynamic positioning. The article briefly examines a concept of a dynamic positioning system for a maritime launch platform. The crucial aspect is to determine the appropriate number of propulsion system components and calculate their thrust characteristics to ensure that the launch platform will remain in place until the space rocket lifts off. This requires a considerable number of calculations and, therefore, a set of initial data, including the launch platform's characteristics, the parameters of the sea, and atmospheric conditions in the launch zone. Additionally, the maximum allowable values for the vessel's drift parameters need to be determined. The maritime launch platform for the computations was designed using modern 3D simulation software. The launch platform's behavior at sea and the dynamic positioning system's performance were simulated using the advanced ANSYS finite element analysis software. The article presents the structural diagram of a dynamic positioning system for a launch platform, along with the computation results for the dynamic positioning system's performance at various potential combinations of sea currents, wind, and waves. The specificity of how these factors affect the launch platform is outlined. The authors conclude regarding the effectiveness of the proposed dynamic positioning system and express their opinion that the

results of this work can be applicable in practical implementation, e.g., when designing a launch platform. Additionally, the requirements for the dynamic positioning system can be defined in advance.

Keywords: launch platform drift; dynamic positioning system; Ansys AQWA; JONSWAP; waves, wind, and sea current directions.

Вступ

Останнім часом поступово поширюється ідея створення морських ракетно-космічних комплексів (МРКК). Вони дають можливість обирати різні точки пуску ракет космічного призначення (РКП) залежно від тих параметрів навколоземних орбіт, які потрібні для того чи іншого корисного вантажу. Крім того, такі комплекси дозволяють реалізовувати космічні програми власними засобами тим країнам, які не мають для цього географічних можливостей. Тобто якщо для створення космічної інфраструктури немає достатньої території, замість неї можна використати акваторію. Навіть з урахуванням судноплавних шляхів, яких дуже багато, у Світовому океані ще вистачає вільних місць для запусків звідти РКП. Щоправда, слід зазначити, що крім морського транспорту треба брати до уваги ще й авіаційний (бо над морями пролягає значна кількість авіаліній). Проведення запусків РКП з акваторій вимагатиме заходів безпеки (тимчасового закриття районів плавання для суден і повітряного простору для літаків).

Серед багатьох технічних проблем, які потрібно вирішувати під час створення МРКК, є проблема забезпечення точності виведення корисного вантажу на навколоземну орбіту. Для цього в конструкції пускового судна (ПС), з якого стартує РКП, повинні бути передбачені засоби, що дозволять не перевищити гранично допустимі параметри знесення ПС від точки старту.

Чинники навколишнього середовища – вітер, хвилі, морська течія (як кожний окремо, так і дуже часто всі разом) – майже безперервно впливають на просторове положення судна в морі. Отже, позиціонування ПС МРКК в точці старту РКП (на період передстартової підготовки) стає необхідним. Оскільки йдеться про судно, яке тим чи іншим чином рухається (перебуває в динаміці), позиціонування буде динамічним. Для його здійснення створюють системи динамічного позиціонування (СДП).

На сьогодні всі наявні у світі пускові судна переобладнані з інших суден, тобто були побудовані не спеціалізованими. СДП таких суден мають характеристики, зумовлені попереднім їхнім призначенням. Найбільш оптимальною була СДП пускової платформи ***Odyssey*** міжнародного МРКК Sea Launch. Це пояснювалося схожістю вимог до позиціонування плавучої бурової установки, яку було переобладнано для пусків РКП. Однак навіть ця СДП не завжди могла забезпечити позиціонування пускової платформи (про що буде далі).

Проведене дослідження актуальне, оскільки його результати дають загальну картину поведінки пускового судна в точці старту під зовнішнім впливом.

Практична цінність проведеного дослідження полягає в можливості формування вихідних даних для проєктування пускового судна та характеристик його СДП вже на початкових етапах створення МРКК.

Проблемам розроблення, виготовлення та експлуатації СДП на суднах приділяють багато уваги. У 1996 році утворено DPC[1] – міжнародний Комітет з динамічного позиціонування. Під егідою DPC проводять щорічні конференції, на яких висвітлюють новітні тенденції розвитку СДП суден.

В Україні проводять різноманітні дослідження СДП, результати яких періодично публікують. В одній з книг описано СДП як частину системи автоматичного керування рухом судна [1]. Відомо про публікації у фахових виданнях, присвячених водному транспорту [2, 3]. Важливе значення має математичне моделювання роботи СДП, якому теж приділено увагу [4].

У Німеччині, Італії, Республіці Корея, Китаї зараз провадять роботи для створення МРКК. Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне», яке брало активну

[1] Dynamic Positioning Committee (англ.)

участь у реалізації проєкту Sea Launch, також продовжує діяльність у цьому напрямі.

СДП сучасних пускових суден МРКК – двох китайських самохідних барж-площадок для перевезення важких вантажів ***De Bo 3*** [5] (з якої запускали РКП Jeilong-3) і ***Dong Fang Hang Tian Gang*** [6] (запуск РКП Yinli-1), а також німецького ролкера[2] ***Combi Dock I*** [7] (запусків з нього ще не було) – більше орієнтовані на забезпечення швартовних операцій або розвантажувальних робіт. Пускове судно (баржа-площадка) в італійському проєкті Blue Launch [8] взагалі не містить елементів позиціонування в точці старту. Але можна зробити попередній висновок про те, що невеликі розміри баржі не дозволять використати на ній СДП і доведеться обмежитись якірною системою позиціонування (це логічно під час планування запусків з мілководних районів Середземного моря).

У рамках робіт над МРКК на Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне» актуальними є концептуальне пророблення та оцінювання параметрів системи динамічного позиціонування спеціалізованого пускового судна.

У статті описано концепцію системи динамічного позиціонування пускового судна морського ракетно-космічного комплексу. Наведено завдання системи та її склад. Описано методологію розрахунків, що підтверджують ефективність системи. Сформовано вихідні дані та зазначено, які чинники впливають на процес позиціонування судна. Прокоментовано результати проведеної роботи та зроблено висновки.

Поставлення завдання містить опис проблем, які пов'язані з позиціонуванням пускового судна та які повинна вирішувати СДП. Вихідні дані сформовано на основі попередніх розробок підприємства (характеристики пускового судна) та загальнодоступної інформації (гідрологія, параметри стану моря й атмосфери в точці старту). Коротко описано методологію проведення досліджень за допомогою програмного пакета кінцево-елементного аналізу Ansys AQWA. Результати подано у вигляді опису концепції СДП та її складу, прикладів розрахунків її роботи, які для наочності супроводжують рисунки, таблиці та діаграми. Проведена робота перспективна, її результати актуальні та мають практичну цінність.

Поставлення завдання

Мета проведеної роботи, результати якої викладено в цій статті, – формування концепції СДП пускового судна й оцінка її здатності забезпечити динамічне утримання цього судна над координатою позиціонування (точкою старту РКП).

Поставлене завдання – провести відповідні обчислення з урахуванням, по-перше, характеристик ПС, по-друге, всіх зовнішніх впливів. Необхідно було визначити достатність характеристик двигунно-рушійного комплексу. Для цього спочатку необхідно обрати елементи цього комплексу, їх типи, дібрати відповідні технічні характеристики. Потім потрібно проаналізувати зовнішні впливи в точці старту та ввести їх у розрахункову модель. Обчислення проводять у програмному пакеті кінцево-елементного аналізу Ansys AQWA.

У ході роботи над концепцією СДП пускового судна необхідно було враховувати вимоги вихідних даних стосовно параметрів знесення ПС з точки старту, запозичених з реального досвіду існуючого МРКК.

Підсумками роботи є власне концепція СДП пускового судна, а також висновок про відповідність результатів поставленій меті.

Проведена робота є одним з етапів підготовки вихідних даних на пускове судно. На етапі практичної реалізації, тобто створення МРКК, ці дані передаватимуть спеціалізованим організаціям, які будуть проєктувати та будувати пускове судно.

Концепцію СДП пускового судна, її параметри й особливості (стосовно двигунно-рушійного комплексу) і буде розглянуто далі.

---

[2] Ролкер – клас вантажних суден, призначених для перевезення колісного транспорту (автомобілів або вагонів), причому завантаження та розвантаження здійснюють з використанням колісних шасі цього транспорту. Тому до класу цих суден ще застосовують іншу назву – Ro-Ro (від англ. Roll-on / Roll-off – буквально «на колесах усередину [судна] / на колесах назовні»)

Вихідні дані

У цій статті наведено один комплект вихідних даних для обчислення параметрів знесення ПС в одній з можливих точок старту, розглянутих у роботах Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне», а саме з точки, що знаходиться в акваторії Норвезького моря. Координати цієї точки – 69º 27' *N*, 8º 24' *E*. Для неї були рекомендовані три азимути пусків (значення округлено до цілих градусів) – 203º, 334º та 357º (при цьому 0º – напрямок на *N*, далі – відлік за годинниковою стрілкою, тобто 90º – *E*, 180º – *S*, 270º – *W*).

Для розрахунків поведінки пускового судна на поверхні моря було обрано модель хвильового спектра JONSWAP[3], що описує розподіл енергії хвиль залежно від частоти для умов обмеженої зони розгону хвиль вітром. Такі зони характерні для північно-східної Атлантики і, зокрема, Північного моря (це видно з назви спектра). Таким чином, географічна близькість Норвезького та Північного морів дозволяє обрати саме модель JONSWAP.

Для проведення обчислень у програмному пакеті Ansys AQWA необхідно було сформувати набір вихідних даних, серед яких глибина моря, густина води, розміри розрахункової області по осях *OX* і *OY*, швидкість і напрямок течії, швидкість і напрямок вітру, висота хвиль, їх період і напрямок приходу. Необхідно зазначити, що система динамічного позиціонування, звичайно, повинна функціонувати в різних умовах. Наприклад, умови роботи СДП під час швартування в порту набагато простіші, ніж у ході утримання судна в точці старту ракети. Але з огляду на тему статті найбільш цікавими є умови саме в точці старту.

Рекомендації щодо визначення параметрів зовнішніх впливів у тій чи іншій точці моря, які потрібні для обчислень, зазвичай беруть з міжнародних нормативних документів, у яких міститься статистика спостережень для різних районів Світового океану більш ніж за 100 років [9]. Також використовують дані спостережень за станом моря й атмосфери в потрібних точках у режимі реального часу або архівні за минулий час [10]. Це потрібно для уточнення обстановки, оскільки напрямки та швидкості вітру, приходу хвиль і навіть течії в поверхневому шарі води досить часто змінюються. Типовий набір вихідних даних для обчислень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані про стан моря в точці старту

Параметр	Значення
Глибина моря, м	300
Густина води, кг/м^3	1 025
Розміри розрахункової області по осі *OX*, м	1 000
Розміри розрахункової області по осі *OY*, м	1 000
Швидкість течії, м/с	0,07
Напрямок течії, градуси	293
Швидкість вітру, м/с	9,3
Напрямок вітру, градуси	168
Період хвиль, с	7,7
Висота хвиль, м	2,09
Напрямок приходу хвиль, градуси	183

Розміри розрахункової області мають досить умовне значення, оскільки при заданні тривалих відрізків часу (наприклад, кілька годин) об'єкт розрахунків (судно), звичайно, може бути знесено на кілька кілометрів.

Було прийнято, що швидкість течії по глибині та швидкість вітру по висоті не змінювалися, а їх напрямки були сталими протягом відрізків часу, заданих для обчислень (від однієї до трьох годин).

Зовнішні впливи на пускове судно, як їх задають у розрахунковій моделі Ansys AQWA, для азимута пуску 203º подано на рис. 1. Пускове судно орієнтоване в моделі так, що його діаметральна площина збігається з азимутом пуску, і тому кути приходу вітру, хвиль і течії для кожного з трьох азимутів пуску будуть різні.

Орієнтацію пускового судна та відлік кутів приходу наведено на рис. 1.

[3] JOint North Sea WAve Project (англ. – «Спільний проєкт по хвилях Північного моря») – міжнародна програма досліджень процесів утворення та розвитку нерегулярних хвиль (у першу чергу під впливом вітру), а також закономірностей їх поширення на поверхні моря

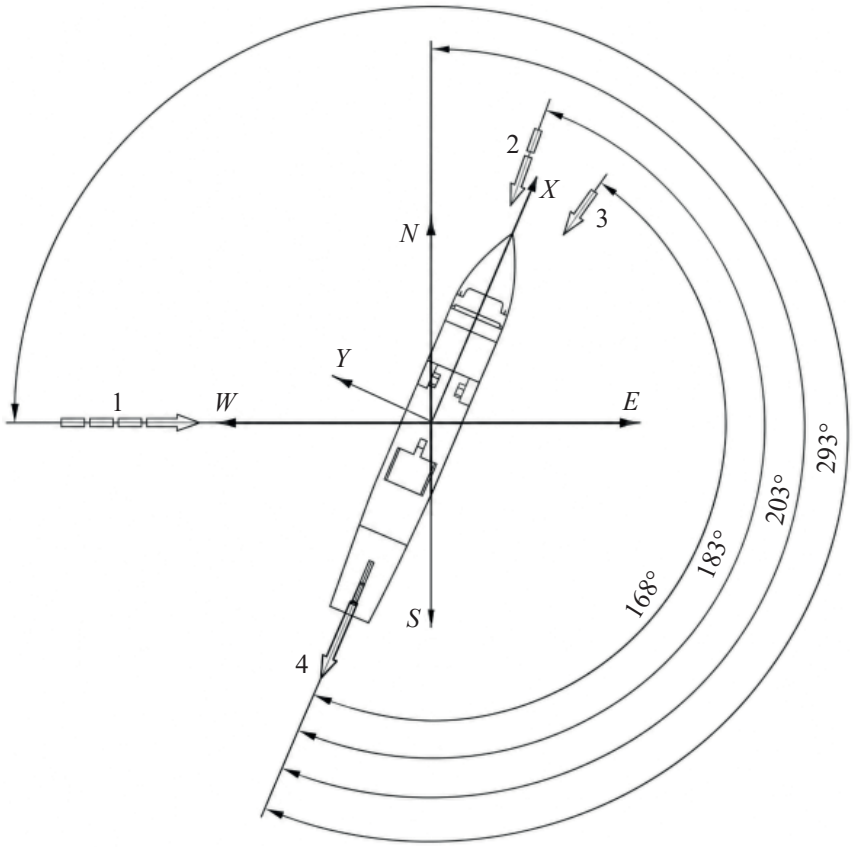


Рис. 1. Орієнтація пускового судна в точці старту та відлік кутів приходу (азимут пуску 203º):
X – вісь абсцис (діаметральна площина судна); *Y* – вісь ординат; *N* – північ; *E* – схід; *S* – південь; *W* – захід; 1 – течія; 2 – хвилі; 3 – вітер; 4 – азимут пуску

З досвіду експлуатації МРКК Sea Launch відомо, що для штатної роботи системи керування РКП «Зеніт-3SL» у польоті необхідно було забезпечити, щоб не було перевищено певні значення параметрів знесення пускової платформи з точки старту [11]. Досвід інших розроблень КБ «Південне» показує, що існують також обмеження на рискання судна від азимута пуску РКП. Усе це і було взято за основу під час формування вимог до СДП пускового судна в точці старту (табл. 2).

Таблиця 2

Задані граничні параметри знесення судна

Параметр	Значення
Швидкість знесення максимальна, м/с	0,32
Прискорення знесення максимальне, м/с^2	± 0,05
Відстань знесення від розрахункової точки старту максимальна, м	1 950
Рискання судна, кутові градуси	± 10

Нижче буде розглянуто забезпечення цих параметрів роботою СДП.

Пускове судно

Пускове судно МРКК детально описано в попередньому випуску журналу [12]. Тут наведено лише ті характеристики судна, які необхідні для концептуальних оцінок СДП (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристики пускового судна

Характеристика	Значення
Водотоннажність перед пуском РКП, т	47 620
Осадка перед пуском РКП, м	8,680
Абсциса центра мас, м	–0,807
Ордината центра мас, м	0
Апліката центра мас, м	3,013
Момент I xx, кг · м^2	$9{,}601 \cdot 10^9$
Момент I yy, кг · м^2	$1{,}672 \cdot 10^{11}$
Момент I zz, кг · м^2	$1{,}654 \cdot 10^{11}$

Необхідно наголосити на тому, що координати точки старту, координати центра мас судна та початок відліку системи координат Ansys AQWA між собою не збігаються.

Система координат Ansys AQWA має початок відліку в точці, утвореній перетинанням трьох площин пускового судна:

– діаметральної площини;

– площини діючої ватерлінії;

– площини мідель-шпангоута.

Координати центра мас пускового судна наведено відносно початку відліку системи координат Ansys AQWA (тобто центр мас зміщений на 0,807 м вздовж осі *OX* в корму від мідель-шпангоута). Під точкою старту слід розуміти точку на кормі пускового судна, у якій установлено ракету. Ця точка знаходиться на відстані 112,5 м вздовж осі *OX* та на 12,97 м вздовж осі *OY* від початку відліку координат розрахункової моделі, відносно якого обчислюють параметри знесення. Систему координат для обчислень наведено на рис. 2.

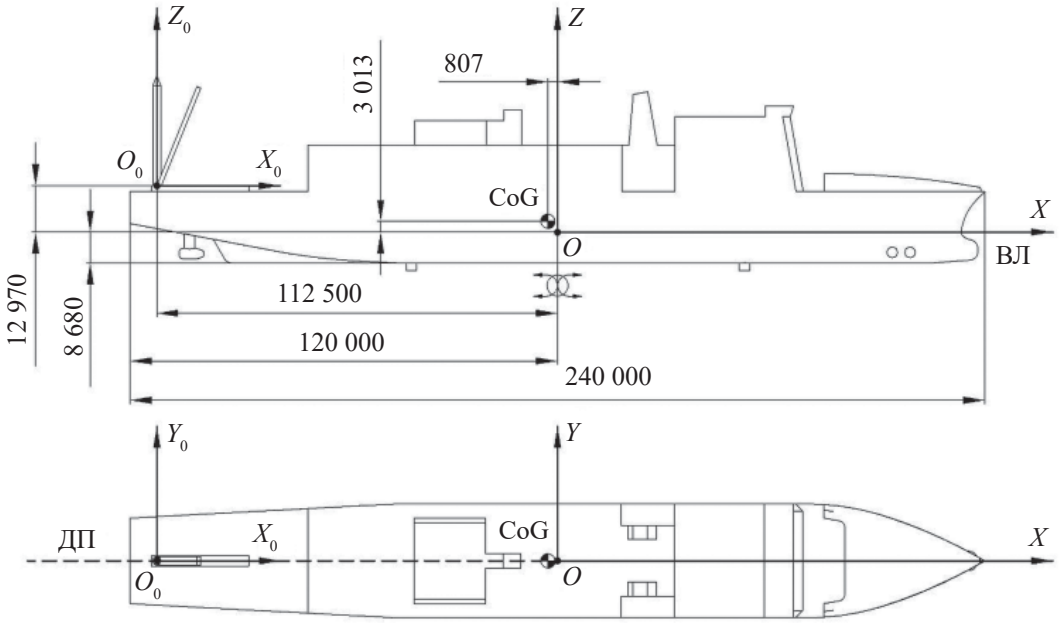


Рис. 2. Система координат для обчислень:
O – початок відліку системи координат Ansys AQWA; O_0 – точка старту; CoG – центр мас;
ВЛ – діюча ватерлінія; ДП – діаметральна площина

Система динамічного позиціонування

Згідно з [13] система динамічного позиціонування – це комплекс, призначений для автоматичного та дистанційного автоматизованого керування пропульсивними механізмами судна з метою динамічного утримання його над координатою позиціонування із заданою точністю в умовах впливу зовнішніх сил, які діють на судно.

СДП зазвичай складається принаймні з таких систем:

– електроенергетичної системи, яка забезпечує живлення комплексу;

– системи пропульсивних механізмів, які забезпечують необхідні вектор і значення упору, що компенсують зовнішні впливи;

– системи керування, що складається з комп'ютерної обчислювальної системи з відповідним програмним забезпеченням, має комплекси датчиків зовнішніх впливів і датчиків положення судна, а також має відповідні органи керування.

Прийнято, що пускове судно повинне бути обладнане СДП класу 2 (відповідає за своїми характеристиками знаку DP2 у символі класу судна) згідно з [13]. Тобто система динамічного позиціонування повинна мати резервування, що забезпечує утримання судна над координатою позиціонування при одиничній відмові в будь-якому активному елементі системи. При цьому мають на увазі, що відмови в будь-якому пасивному

елементі системи не буде за рахунок наявності відповідного захисту від механічних пошкоджень і властивостей елемента, підтверджених сертифікатом Регістру.

Елементами двигунно-рушійного комплексу, які входять до складу системи пропульсивних механізмів, є два тунельних трастери[4] в носовій частині судна, чотири висувні гвинто-стернові колонки під днищем корпусу та два азиподи[5] в кормовому підзорі.

Розміщення елементів двигунно-рушійного комплексу, які є основними в контексті цієї статті, наведено на рис. 3, а їхні тягові характеристики – в табл. 4. Структурну схему СДП пускового судна МРКК подано на рис. 4.

Таблиця 4

Тягові характеристики елементів двигунно-рушійного комплексу

Елемент	Значення, кН
Азипод	1 000
Висувна гвинто-стернова колонка	380
Тунельний трастер	500

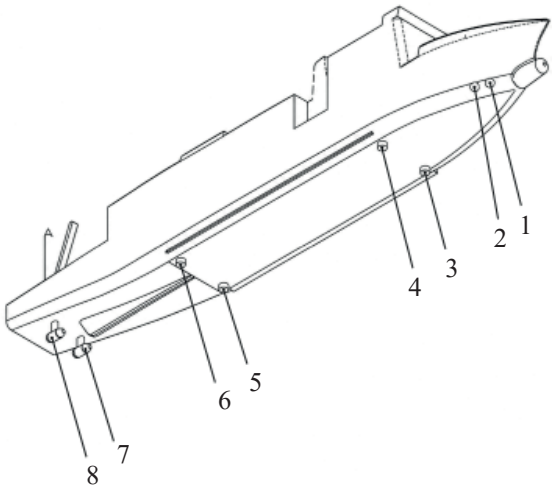


Рис. 3. Розміщення елементів двигунно-рушійного комплексу СДП на пусковому судні:
1 – трастер 1 (носовий); 2 – трастер 2; 3 – висувна колонка 1; 4 – висувна колонка 2;
5 – висувна колонка 3; 6 – висувна колонка 4; 7 – азипод 1; 8 – азипод 2

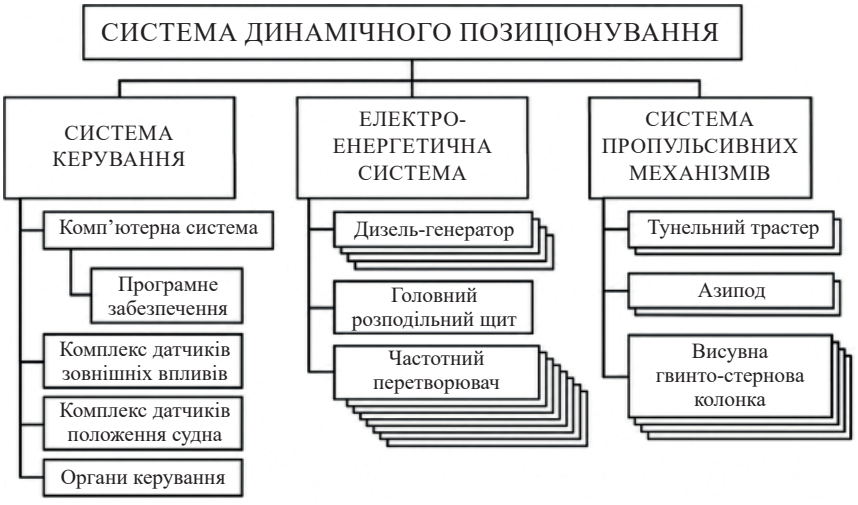


Рис. 4. Структурна схема системи динамічного позиціонування пускового судна

[4] Thruster (від англ. thrust – тяга) – носовий підрулювальний пристрій, що являє собою електромотор з гребним гвинтом, розміщений в тунелі поперек корпусу судна

[5] Azipod (від англ. Azimuth Electric Podded Drive) – азимутальний електричний привід у гондолі поза корпусом судна, у якому двигуном є електромотор великої потужності, а рушієм – гребний гвинт

Методологія

Для аналізу роботи СДП та її ефективності було використано програмний комплекс Ansys AQWA. Це дозволило уникнути створення громіздких алгоритмів розрахунку, які зазвичай пишуть на основі систем рівнянь, у тому числі диференційних, і вимагають великих витрат часу як на власне створення, так і на проведення обчислень.

Разом з тим характеристики пускового судна стало можливим отримати лише в результаті його проєктування з використанням реальних масово-габаритних характеристик усіх більш-менш важливих елементів.

Ansys AQWA основано на методах гідродинаміки потенційної течії. Він дозволяє проводити широкий спектр обчислень поведінки суден на поверхні моря під впливом різних чинників (зовнішніх впливів). Застосовують для визначення поведінки морських суден на воді. У ході обчислень проводять розрахунки навантажень на судно в умовах впливу регулярних або нерегулярних хвиль, течії та вітру. Реальні хвилі моделюють з урахуванням моделей хвильового спектра або спектральних щільностей розподілу хвильових ординат (стандартні спектри – Пірсона-Московіца або JONSWAP, для прибережних зон – Гаусса або ITTC[6], багатоспрямовані спектри з урахуванням розкиду за напрямками). Гідродинамічний відгук обчислюють під впливом комплексу сил:

– хвильових навантажень першого порядку, що викликають миттєву хитавицю на частотах власне самих хвиль;

– хвильового дрейфу другого порядку від сил, що змінюються повільно;

– гідростатичного тиску (змінна плавучість залежно від миттєвого положення хвильової поверхні);

– в'язкого опору, що зумовлений силами інерції;

– вітрових навантажень, у тому числі з урахуванням динамічних поривів;

– течії, однорідної за глибиною або з градієнтом швидкості від дна моря до поверхні;

– зв'язаних навантажень у випадку використання швартовів, буксирних або якірних канатів.

Кінцево-елементну модель пускового судна (25 275 елементів) показано на рис. 5.

Обрані інтервали тривалості обчислень розрахункових випадків – від 3 600 до 10 800 с. Це достатній час для того, щоб вирівняти початкові збурення, які впливають на результати (бо в деяких випадках можливий ефект, наче судно раптово з'явилося на воді в точці, де вже давно діють вітер, хвилі та течія).

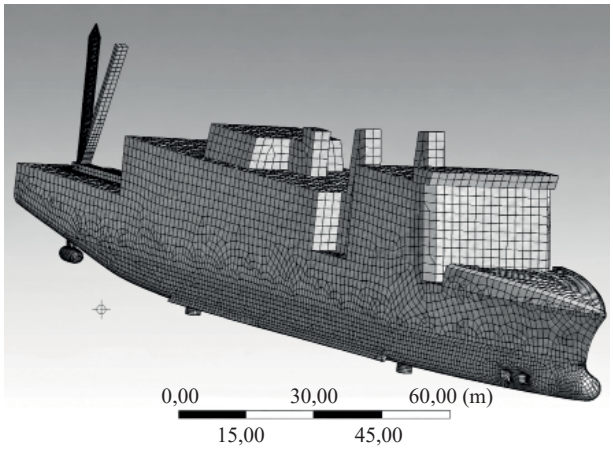


Рис. 5. Кінцево-елементна модель пускового судна

Важливо усвідомити, що роботи, для яких створено Ansys AQWA і результати яких викладено в цій статті, не передбачують ні моделювання роботи всієї системи динамічного позиціонування, ні імітації швидких змін ситуації, ні оцінок її енергетичної ефективності тощо. Не слід очікувати від Ansys AQWA здатності замінити собою існуючі симулятори або комп'ютерні тренажери, які спеціально створюють, наприклад, для навчання судноводіїв.

Аналіз результатів

Очевидно, що без допомоги СДП неможливо утримати пускове судно в точці старту досить довгий час, потрібний для підготовки РКП. Наприклад, площа бортової проєкції надводної частини пускового судна становить приблизно 5 600 м^2, а площа кормової – 1 200 м^2. Для порівняння:

[6] International Towing Tank Conference (англ.) – Міжнародна конференція дослідних басейнів – Всесвітня асоціація організацій, що провадить дослідження в галузі гідродинаміки суден і морських споруд, зокрема прогнозування поведінки суден на воді за допомогою фізичного (моделювання в басейнах) і комп'ютерного аналізу

площа вітрил однієї з найбільших круїзних яхт сучасності – ***Orient Express Corinthian*** – 4 500 м^2. Очевидно, що пускове судно легко може стати «іграшкою» вітру та хвиль. Разом з тим відомі випадки, коли СДП не здатна компенсувати вплив хвиль, течії та вітру на судно. Так, у листопаді – грудні 2007 року під час місії щодо запуску супутника зв'язку Thuraya-3 за допомогою МРКК Sea Launch зовнішні впливи в точці старту були настільки несприятливими, що СДП пускової платформи **Odyssey** не змогла забезпечити її утримання. Зрештою після 17 діб очікування було прийнято рішення про скасування пуску та повернення до базового порту [11].

Взагалі обчислення поведінки судна на поверхні моря під зовнішніми впливами потрібно проводити для їхніх різних комбінацій, у тому числі для найгірших збігів. Якщо розглядати, наприклад, кути приходу хвиль і вітру з інтервалом 15º для семи різних станів моря (в кожному з яких по чотири варіанти значень періоду хвиль, їхньої висоти, а також швидкості вітру), то навіть за незмінного кута течії кількість розрахункових випадків становитиме 672. Оскільки є ще три значення азимутів пуску, то результати обчислень матимуть дуже великий обсяг.

У цій статті наведено результати розрахунку одного з випадків для азимута пуску 203º. Як потрібно орієнтувати елементи двигунно-рушійного комплексу ПС, видно з рис. 6. Значення кутів напрямку векторів сил і значення цих сил (тобто тяга гребних гвинтів) наведено в табл. 5.

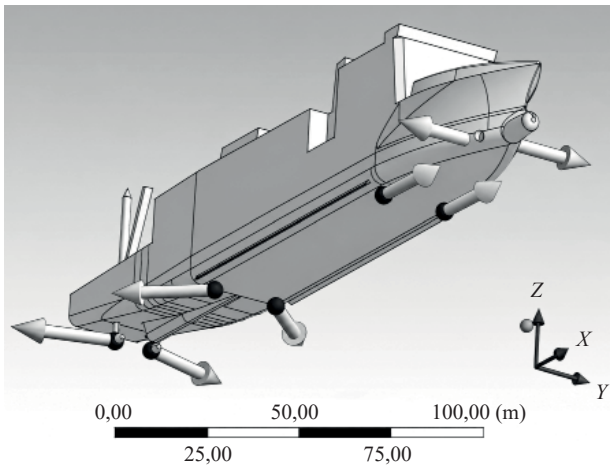


Рис. 6. Вектори сил, створюваних елементами двигунно-рушійного комплексу пускового судна для азимута пуску 203º

Таблиця 5

Напрямки дії та значення тяги, створюваної елементами двигунно-рушійного комплексу пускового судна

Елемент	Тяга, кН	Напрямок дії*, кутові градуси
Трастер 1	5,0	90
Трастер 2	5,0	90
Висувна колонка 1	25,0	2
Висувна колонка 2	25,0	2
Висувна колонка 3	21,2	45
Висувна колонка 4	21,2	45
Азипод 1	6,5	72
Азипод 2	6,5	72

* Згідно з рис. 1. – від діаметральної площини судна

Зрозуміло, що наведені значення тяги значно менші від максимальних (табл. 4), оскільки обрані значення зовнішніх впливів у точці старту досить помірні. Наприклад, азиподи розвивають повну тягу лише під час роботи як маршові двигуни, а під час позиціонування в точці старту вони при певних комбінаціях взагалі можуть не знадобитися.

При цьому слід пам'ятати, що азиподи та висувні колонки мають здатність обертатися навколо вертикальної осі на 360º і відповідно спрямовувати вектор тяги в будь-якому напрямку, тоді як тунельні трастери закріплені нерухомо в корпусі судна під кутом 90º до діаметральної площини.

На рис. 7–12 наведено діаграми з результатами обчислень параметрів знесення пускового судна з точки старту під час роботи СДП. Максимальні значення параметрів знесення ПС для азимута пуску 203º наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Максимальні параметри знесення судна

Параметр	Значення
Швидкість знесення вздовж осі *OX*, м/с	0,077
Швидкість знесення вздовж осі *OY*, м/с	0,033
Прискорення знесення вздовж осі *OX*, м/с^2	0,035
Прискорення знесення вздовж осі *OY*, м/с^2	0,003
Відстань знесення від розрахункової точки старту, м	69,610
Рискання судна, кутові градуси	+3,301 –0,187

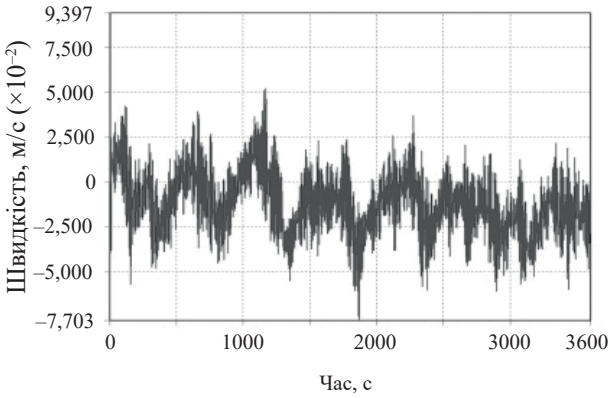


Рис. 7. Швидкість знесення ПС вздовж осі *OX*

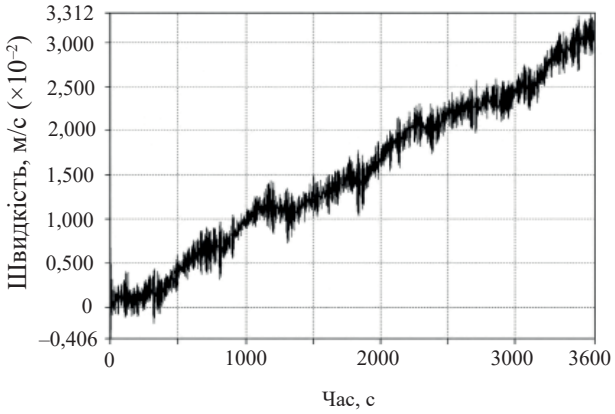


Рис. 8. Швидкість знесення ПС вздовж осі *OY*

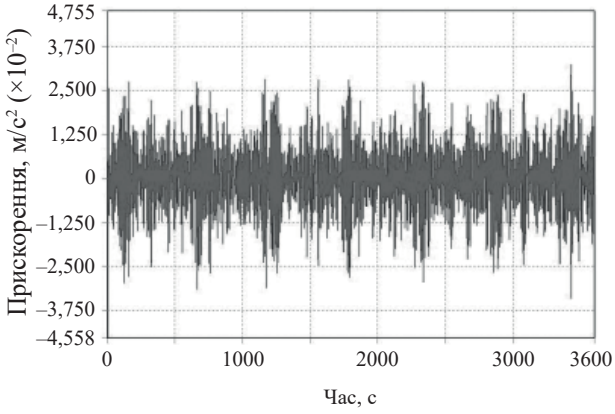


Рис. 9. Прискорення знесення ПС вздовж осі *OX*

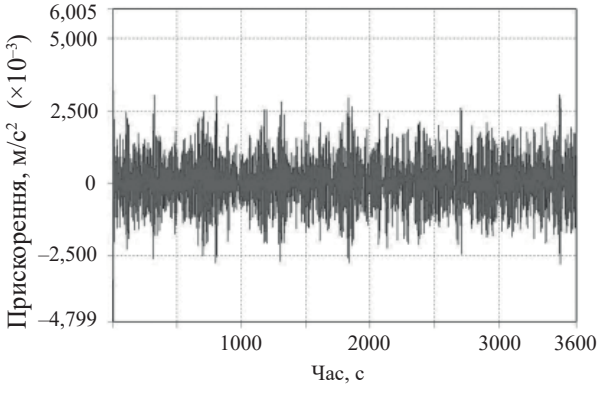


Рис. 10. Прискорення знесення ПС вздовж осі *OY*

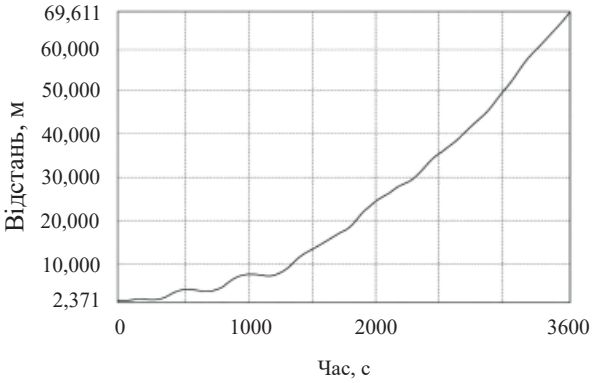


Рис. 11. Відстань знесення ПС від точки старту

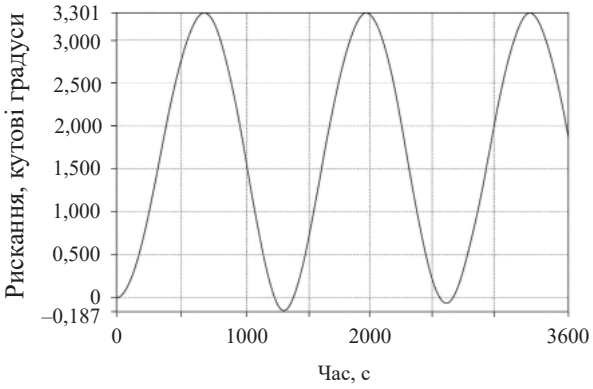


Рис. 12. Рискання пускового судна

З діаграм видно, що найбільші значення прискорень (0,048 м/с^2 вздовж осі *OX* та 0,006 м/с^2 вздовж осі *OY*) фіксуються буквально в початковий момент, тому їх не слід брати до уваги, а користуватися максимумами після 600-ї секунди розрахунку, коли «ефекту раптової появи судна» вже немає.

З іншого боку, швидкість уздовж осі *OY* досягає максимального значення на останній секунді розрахунку, що пояснюється незмінними значеннями напрямків дії та тяги елементів двигунно-рушійного комплексу на розрахунковому відрізку часу.

Як видно при порівнянні з табл. 2, значення параметрів не перевищують гранично допустимих і мають достатній запас, тобто СДП виконує свою функцію.

З точки зору економії ресурсу машин і механізмів вигідніше допустити знесення судна на кілька десятків метрів, ніж принципово утримувати його на місці, компенсуючи кожен утрачений метр позиції, безперервно при цьому змінюючи режими роботи елементів двигунно-рушійного комплексу.

Висновки

Мета проведеної роботи, результати якої викладено в цій статті, – формування концепції СДП пускового судна й оцінка її здатності забезпечити утримання цього судна в точці старту із заданою точністю. Підсумками роботи є власне концепція СДП пускового судна, а також висновок про відповідність результатів поставленій меті.

Проведені роботи мають практичну цінність, оскільки попередні обчислення прогнозованих параметрів знесення пускового судна з урахуванням роботи СДП дозволяють робити висновки про можливість проведення пусків з найбільш вигідних точок Світового океану. У наш час існує можливість отримання в реальному режимі часу точних синоптичних і метеорологічних даних буквально в будь-якій точці Землі. Тому обчислення, аналогічні тим, результати яких викладені в цій статті, зможуть істотно полегшити завдання проєктування та побудови пускового судна, оскільки ще на початкових етапах створення МРКК стає зрозумілим, якою має бути СДП ПС.

Проведені дослідження мають наукову цінність, оскільки показали можливість виведення проєктування МРКК на якісно вищий рівень.

Новизна проведеної роботи полягає в тому, що для обчислень поведінки судна використано можливості програмного комплексу Ansys AQWA замість створення громіздких математичних алгоритмів.

Результати можуть бути застосовані в подальших роботах над МРКК, зокрема під час проєктування інших пускових суден або морських посадочних платформ, що використовують для повернення багаторазових перших ступенів РКП.

Для скорочення часу обчислень і кількості розрахункових випадків доцільно більш детально проаналізувати статистику станів моря в точках старту.

Подальші дослідження можна вести з урахуванням використання їхніх результатів для визначення критеріїв можливості пуску РКП, оскільки часто стан моря не дозволяє здійснювати пуск, наприклад, через велику швидкість вітру, навіть коли СДП утримує судно із заданою точністю. Також можливе проведення оптимізації характеристик двигунно-рушійного комплексу пускового судна.

Список використаної літератури

1. Вагущенко Л. Л., Цимбал М. М. Системи автоматичного управління рухом судна. 3-тє вид., перероб. і доп. Одеса : Фенікс, 2007. 328 с.

2. Мальцев А. С. Динамічне позиціонування судна при відхиленнях параметрів управління, величина якого порівняна з похибками його визначення. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2019. № 2(21). С. 16–25. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.2.21.016-025

3. Мельник О. М. Аналіз впливу параметрів руху та маневрування судна на безпеку його експлуатації. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73), № 3. С. 143–149. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/25

4. Богаченко Є., Ворохобін І., Бурмака І., Мельник О., Онищенко О. Системи динамічного позиціонування: математичне моделювання та алгоритми управління. *Суднoводіння*. 2024. № 36. С. 20–29. https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.20-29

5. Jones A. Chinese sea launch sends 10 navigation enhancement satellites into orbit. *SpaceNews*. 2025. URL: https://spacenews.com/chinese-sea-launch-sends-10-navigation-enhancement-satellites-into-orbit/ (дата звернення 25.09.2025).

6. Jones A. Huge commercial Chinese solid rocket launches 3 satellites from barge in the Yellow Sea. *SpaceNews*. 2025. URL: https://spacenews.com/huge-commercial-chinese-solid-rocket-launches-3-satellites-from-barge-in-the-yellow-sea/ (дата звернення 12.10.2025).

7. Christiaens K. German offshore spaceport to host first launch in early 2024. *FutureSpaceFlight*. 2023. URL: https://www.futurespaceflight.com/launch-overview/electron.html?view=article&id=211:german-offshore-spaceport-to-host-first-launch-in-early&catid=94 (дата звернення 16.08.2026).

8. Blue Launch. *Spazio Futuro*. 2026. URL: https://www.spaziofuturo.eu/prodotto-it/blue-launch/ (дата звернення 17.07.2026).

9. DNV-OS-E301. Position Mooring. Offshore Standard. Det Norske Veritas AS. 2013. 101 p.

10. Nullschool Technologies Inc. A global map of wind, weather, and ocean conditions. Earth. URL: https://earth.nullschool.net/ru/#current/wind/surface/level/orthographic=-351.52,69.42,39104/loc=8.238,69.271 (дата звернення 11.02.2026).

11. Стеценко В. Я., Давиденко С. О. Контроль параметрів дрейфу стартової платформи під час передстартової підготовки ракети космічного призначення «Зеніт-3SL». *Космічна техніка. Ракетне озброєння. Space Technology. Missile Armaments*. 2019. № 1(117). С. 82–87. https://doi.org/10.33136/stma2019.01.082

12. Пустовгаров А. А. Пускове судно морського ракетно-космічного комплексу. *Космічна техніка. Ракетне озброєння. Space Technology. Missile Armaments* 2025. № 2 (123). С. 58–66. https://doi.org/10.33136/stma2025.02.058

13. Правила класифікації та побудови морських суден. Т. 4 : Регістр судноплавства України. Вид. офіц. Київ, 2020. 560 с.

Стаття надійшла 31.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування 16.09.2026

Дата публікації 02.11.2026