

ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦІЇ ВЕЛИКОГО ВІТРИЛЬНОГО СУДНА, ЯКА ВКЛЮЧАЄ В СЕБЕ ПОВОРОТИ «ЧЕРЕЗ ФОРДЕВІНД» ТА «ОВЕРШТАГ»

Товстокорий О. М., к.т.н., доцент, капітан далекого плавання, завідувач кафедри навігації та управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028.

Об'єктом дослідження є процес циркуляції великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням. Поліус повороту відіграє велику роль у процесі повороту судна. Поворот великого вітрильного судна відрізняється від повороту судна з механічним двигуном. Для судна з механічним двигуном поворот виконується простою перекладкою керма, а для вітрильного судна, особливо великого і з прямим вітрильним оснащенням, для виконання повороту часто приходиться виконувати маневр з еволюцією вітрилами, а можливо, і два маневри.

При повороті вітрильного судна діють дві бокові сили: керма та вітрил. У разі двох або більше сил розраховуються сумарні моменти бокових сил, що діють за годинниковою стрілкою і проти відносно центру обертання. Який сумарний момент буде більшим, у тому напрямку і буде обертатися судно. Для того щоб судно поверталось у потрібному напрямку, треба, щоб момент бокової сили керма перебільшував момент бокової сили вітрил.

У результаті як теоретичних досліджень, так і практичних експериментів винайдена схема повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням з урахуванням останніх досліджень, яка й представлена в цій статті.

Ці результати можуть бути використані при маневруванні вітрильних суден з прямим вітрильним оснащенням у різних умовах плавання.

Ключові слова: велике вітрильне судно з прямим вітрильним оснащенням; поворот вітрильного судна; центр обертання; поліус повороту; центр вітрильності.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.209-225

Вступ. Останнім часом у зв'язку з вичерпуванням викопних копалин відновлюється цікавість до використання енергії поновлюваних джерел, у тому числі й енергії вітру. На морському транспорті це проявляється в використанні енергії вітру як основного, так і допоміжного джерела енергії для руху суден. Це стосується як суден для відпочинку, як-то приватні яхти, так і комерційного флоту, у тому числі навчальних, пасажирських суден, а також і вантажних з використанням вітрил як допоміжного джерела енергії.

Рух вітрильного судна відрізняється від руху судна з механічним двигуном. Особливо в процесі руху по криволінійним траєкторіям, тобто, під час поворотів. Там, де судну з механічним двигуном достатньо просто повернути кермо і виконати поворот під впливом перекладеного керма, вітрильник повинен виконати маневр зі зміною положень вітрил, повороту реїв (брасопки), а то й декілька маневрів. При цьому важливою стає роль використання поліуса повороту для полегшення маневрів.

Постановка проблеми. Раніше існувала двохточкова схема повороту судна. Розраховується центр ваги судна. При відсутності руху поліус повороту знаходиться в центрі ваги. При русі судна поліус повороту зміщується назустріч руху. При дії бокової сили поліус повороту знаходиться з протилежного боку від точки прикладання бокової сили відносно центра ваги. Інколи це призводить до незрозумілого результату. Наприклад, коли судно йде вперед, а бокова сила прикладена в носовій частині судна. То незрозуміло, де є поліус повороту. Автором була запропонована трьохточкова схема повороту [1]. Вираховується центр ваги судна. Від центра ваги розраховується положення центру обертання, яке зміщується від центра ваги назустріч потоку води, що набігає. І величина цього зміщення залежить від швидкості судна. Від центра обертання розраховуються плечі бокових сил, які впливають на судно. Якщо сила одна, то положення поліуса повороту знаходиться з протилежного боку від положення точки прикладання бокової сили відносно центра обертання. Це було запропоновано для конвенційного одногвинтового судна, де при

повороті утворюється одна бокова сила – бокова сила керма. На вітрильному судні в процесі повороту задіяні дві бокові сили: крім бокової сили керма бере участь і бокова сила вітрил. Також потрібно брати до уваги, як розташовані базові точки повороту, від чого залежить їхнє положення і як вони переміщуються. Все це потрібно дослідити на прикладі повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням. Для руху вітрильника в заданому напрямку потрібно, щоб момент сили керма завжди перевищував момент сили вітру, якщо вони діють у різні боки і щоб сумарний момент цих сил був спрямований у потрібному напрямку. Якщо моменти діють в одному напрямку. У статті надаються рекомендації, як це виконати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Про поворот під вітрилами взагалі небагато публікацій. А про поведінку полюса повороту при цьому – взагалі одиниці.

Автори в роботі [1] показують нову схему повороту судна. Пропонується використовувати трьохточкову схему повороту судна. Про яку йшлося вище.

Ч. Мархай у своїй книзі [2] показує, як користуватися вітрилом і як зробити ще найефективніше. Він вважає, що сила тяги вітрила утворюється внаслідок різниці тисків, які виникають на різних боках вітрила при обтіканні його вітром. На підвітряному боці вітрила за рахунок підвищеної швидкості вітрового потоку згідно із законом Бернуллі утворюється понижений тиск, а на навітряному – підвищений. Залежно від кута атаки вітру сила тяги вітрила буде утворюватися або підйнятною силою крила, або силою лобового опору (рис. 1).

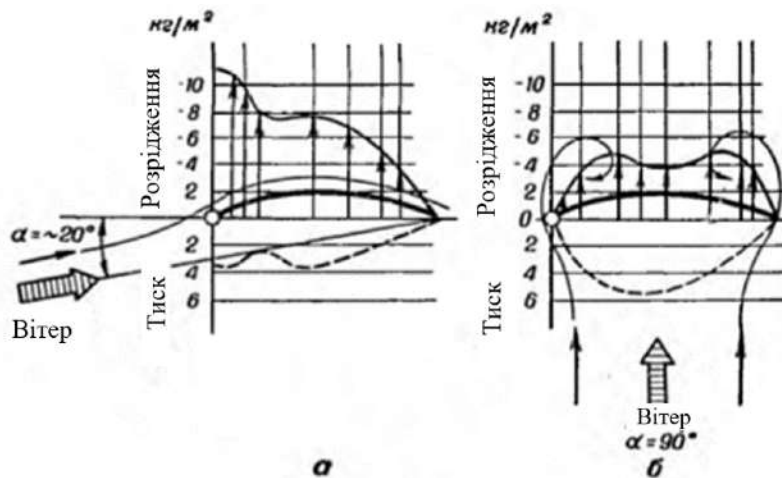


Рисунок 1 – Розподіл тисків на вітрилі: **а** – при куті атаки 20° , коли рушійною силою виступає підймальна сила; **б** – при куті атаки 90° , коли рушійною силою є сила лобового опору [2]

Він показує, яким чином використати вітрило найефективніше. Але він не пов'язує ефективність роботи вітрила з поворотами судна.

John Harland у [3] розповідає, що при плаванні суден під прямим вітрильним оснащенням, яких було більшість, основним питанням було визначення кута установки реїв відносно діаметральної площини при різних кутах атаки вітру. У давнину були створені різні системи вирахування кута розвороту реїв, але пізніше було знайдене просте правило, що працює цілком пристойно. Так, реї розвертаються відносно вертикальної висі якомога крутіше при слідуванні в крутий бейдевінд і прямо при слідуванні на фордевінд. При проміжних курсах реї мають ділити навпіл кут між вітром та курсом. Він показує, як виконувались повороти «оверштаг» та «через «фордевінд» в епоху вітрил.

Підсумувавши попередній досвід маневрування вітрильників і беручи до уваги сучасні технології автор статті [4] показує, як сучасні вітрильники можуть плавати, використовуючи сучасні схеми постановки/прибирання вітрил, а також брасопки. Маневри й еволюції з вітрилами при використанні сучасних технологій виконуються значно швидше.

Chase G. A. в [5] показує, як використовувати для маневрів на судні з прямим вітрилом рухомий полюс повороту судна. Він брав до уваги 3-щогловий барк «Elissa», і він використовував концепцію рухомої точки повороту при слідуванні під вітрилами і машиною і змінюючи склад поставлених вітрил, обертався навколо точки в носовій частині судна при русі вперед і, у кормовій частині судна при русі назад.

У роботі [6] автор, капітан Хью Кавіс, пропонує 3-точкову схему повороту судна, виділяючи проміжну точку між центром ваги і полюсом повороту, яку називає центром бокового опору і вважає, що від цієї точки відраховуються всі плечі бокових сил, що діють на судно і, відповідно всі моменти цих сил. На прикладі відходу судна від причалу заднім ходом, автор показав, що використання чинних, на той час, рекомендацій з керування судном призводить до навалу судна на причал. Вважалося, що судно обертається навколо центру обертання, який при русі заднім ходом зміщується назад. Насправді ж, судно оберталося навколо полюса повороту, який навпаки був зміщений вперед, що й призводило до навалювання судна на причал. Також автором наведені міркування щодо центру обертання, який повинен знаходитися між центром тяжіння і центром бокового гідродинамічного опору (COLR), який зміщується у напрямку руху судна. Максимальне зміщення COLR, на думку автора, становить до 10% довжини судна. Автор також підкреслив, що центр обертання і полюс повороту – це два різні центри.

У роботах [7–9] автор виділяє три особливі центри обертання: центр циркуляції (зафіксований на Земній поверхні центр планетарного обертання E), центр обертання судна S і полюс повороту (умовний центр обертання P). Автор також фіксує увагу на новому погляді на полюс повороту (за висловом автора на новій концепції полюса повороту), яка відрізняється від традиційної тим, що полюс повороту є умовним центром обертання, його положення не залежить від поздовжньої швидкості руху судна і він не є центром обертання судна. У роботі наводяться також приклади використання нової концепції полюса повороту для практичного маневрування. Крім того, у статті [7] автор закликає вчити майбутніх судноводіїв та перевчити всіх судноводіїв правильним методам управління судном згідно з концепцією полюса повороту.

У роботі [10] автор розмірковує над процесом повороту судна і в цілому підтримує положення, запропоновані Dr. Seong-Gi Seo в його роботах. У роботі [11] він підсумовує погляди авторів, які вивчають проблеми повороту судна і приходить до висновку, що навчання судноводіїв потрібно проводити, спираючись на нову теорію.

Фундаментальні дослідження з керування судном наведені у книзі [12], зокрема, у розділі 7.2.4. Pivot Point показано сучасний стан уявлень про полюс повороту та його використання для керування судном.

Автори в [13] показують, як розрахувати положення ПП при швидкості, меншій ніж швидкість повного ходу.

Автор у [14] пропонує нову змістовну схему повороту судна з врахуванням останніх досягнень теорії та практики та «Пам'ятку судноводію». Нова змістовна модель та «Пам'ятки...» дозволять зменшити похибки керування та підвищити безпеку маневрування, особливо у стиснених водах. Отримані результати пояснюються тим що, на відміну від відомих підходів: нова змістовна модель побудована на основі 3-х точкової схеми повороту, яка враховує додаткову точку – центр обертання; положення полюса повороту визначається відносно центру обертання, а не відносно центру ваги; положення полюса повороту визначається на площині, через абсцису і ординату полюса повороту.

У роботі [15] автор показує практичні шляхи розрахування положення базових точок.

Протягом довгого часу в усіх морських навчальних закладах положення про поворот судна викладали, спираючись на двохточкову схему [16]. А також по такій самій схемі навчали капітанів на міжнародних курсах підвищення кваліфікації [17].

У 2014 році International Training Center for Maneuvering on manned models Port-Rebel видав новий Port Revel Shiphandling 2014 Course Manual [18], де якості базового принципу повороту судна обрана трьохточкова схема повороту судна. Між точками центра ваги і

полюсу повороту розміщена додаткова точка, яка названа «нейтральною точкою» («the neutral point»), в якій при прикладанні бокової сили не утворюється обертального руху, а утворюється тільки поступальний рух судна лагом у напрямку дії бокової сили. Це майже збігається з визначенням центру бокового опору капітана Кавіє [6]. Автор також у роботі [14] пропонує точку між центром ваги й полюсом повороту точку, в якій судно буде мати найменший момент інерції і в якому кутове прискорення, викликане будь-якою боковою силою, буде найбільшим. Цю точку автор називає Центром Обертання. Вона є компромісом між центром ваги і центром бокового опору. Відносно центра обертання розраховуються всі плечі і моменти бокових сил, що діють на судно.

Підсумовуючи проведений аналіз останніх досліджень та публікацій, слід зазначити, що авторами усіх публікацій була виконана велика робота з удосконалення системи повороту судна. Основна частина досліджень процесів маневрування суден з використанням полюса повороту стосується маневрування суден з механічним приводом. Тому, дослідження процесів маневрування з використанням полюса повороту для вітрильних суден залишається актуальною науково-технічною задачею.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка шляху керування великим вітрильним судном на циркуляції із використанням концепції полюса повороту.

Задачі дослідження. Задачами дослідження є:

- 1 – аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів;
- 2 – розробка схеми повороту великого вітрильного судна, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру;
- 3 – розробка шляху повороту великого вітрильного судна з використанням концепції полюса повороту;
- 4 – перевірка працездатності та ефективності розробленого шляху.

Виклад основного матеріалу. На відміну від суден з механічним двигуном, циркуляція вітрильного судна не може бути виконана у вигляді кола, бо ефективність вітрової установки сильно залежить від напрямку вітру. Для здійснення повороту на 360° , вітрильник має виконати 2 маневри: поворот «оверштаг» (перетин лінії вітру носом) і поворот «через фордевінд» (перетин лінії вітру кормою) у будь-якій послідовності. Рух великого вітрильного судна на прямому курсі являє собою урівноважену взаємодію обертальних моментів бокових сил, які намагаються розвернути судно за годинниковою стрілкою (наприклад, сил вітрил), і обертальних моментів бокових сил, які намагаються розвернути судно проти годинникової стрілки (наприклад, сил керма). Бокових сил може бути декілька, але, якщо сума моментів, що діють за годинниковою стрілкою, урівноважується сумою моментів, що діють проти годинникової стрілки, вітрильне судно йде прямим курсом. Для подолання дрейфу під вітер змінюють курс на декілька градусів на вітер. При повороті великого вітрильного судна вищевказана схема змінюється. Якщо бокові сили вітрил і керма створюють моменти, спрямовані в різні боки, для продовження повороту потрібно, щоб момент бокової сили керма був більше моменту бокової сили вітрил. У разі, коли ці сили створюють моменти одного знаку, треба це використовувати і намагатися в такі моменти розганяти судно, щоб збільшити швидкість, від якої залежить бокова сила керма.

Маневрування на вітрильному судні дещо відрізняється від маневрування на судні з механічним двигуном. Воно складніше. Для суден з косим вітрильним оснащенням легше виконувати поворот «оверштаг», а складніше – «через фордевінд», а для суден з прямим вітрильним оснащенням – легше виконувати поворот «через фордевінд», а складніше – «оверштаг». PSV ROYAL CLIPPER є найбільшим і на сьогодні єдиним наявним п'ятищогловим судном з прямим вітрильним оснащенням і тому є найскладнішим для виконання повороту «оверштаг».

Розглянемо маневр на прикладі пасажирського вітрильного судна (ПВС) ROYAL CLIPPER, рис. 2. ROYAL CLIPPER являє собою п'ятищогловий корабель з площиною вітрильного оснащення 5209 м^2 , повна водотоннажність – 5000 т, довжина максимальна 132,74 м, довжина між перпендикулярами 98,55 м, ширина 16,00 м, осадка максимальна

6,0 м. Має 42 вітрила (26 прямих і 16 косих) на 5 щоглах – фок (fore), грот (main), мідл (middle), бізань (mizzen), джигер (jigger).

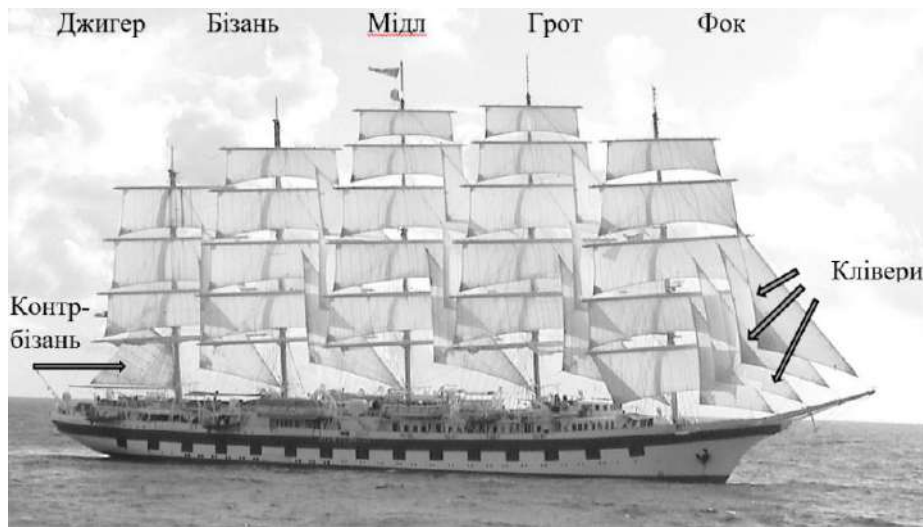


Рисунок 2 – Пасажирське вітрильне судно (ПВС) ROYAL CLIPPER

На ПВС ROYAL CLIPPER реї брасопляються на мінімальний кут до ДП у 43° , мінімальний кут атаки, при якому судно має сталий хід вперед, дорівнює 17° , отже сектор противного вітру в носовій частині дорівнює 60° з кожного борту, загалом 120° . При знаходженні вітру в цьому секторі судно не може рухатись під вітрилами вперед і при зміні галса потрібно цей сектор проходити або за інерцією, або на ходові назад [4].

На рис. 3 наведена діаграма залежності швидкості ВВС «Royal Clipper» від напрямку удаваного вітру.

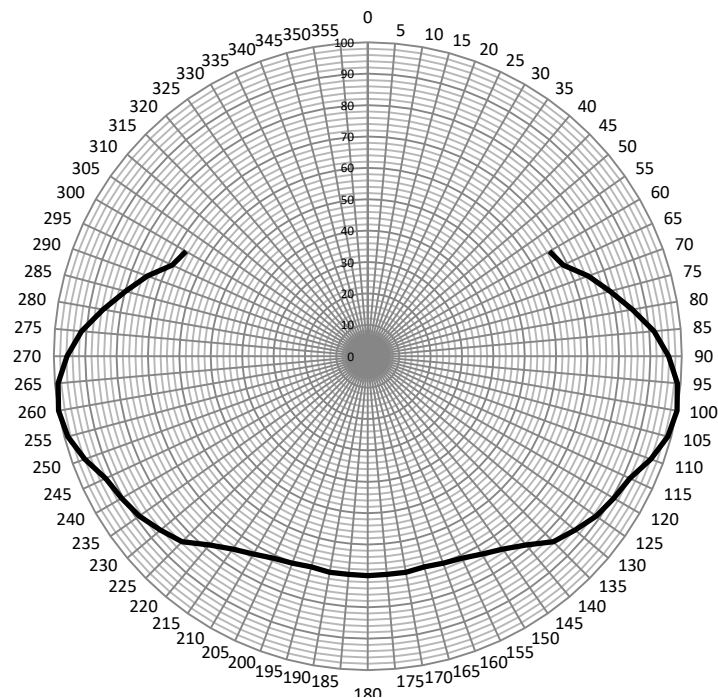


Рисунок 3 – Діаграма залежності швидкості ВВС «Royal Clipper» від напрямку удаваного вітру, яка була визначена експериментально

На рис. 4а зображено екран радара ПВС ROYAL CLIPPER з траєкторією руху судна під час розвороту в умовах дії бокового вітру. Маневр виконувався автором у Тірренському морі. Силуети судна на траєкторії руху накладені автором вручну (рис. 4б).

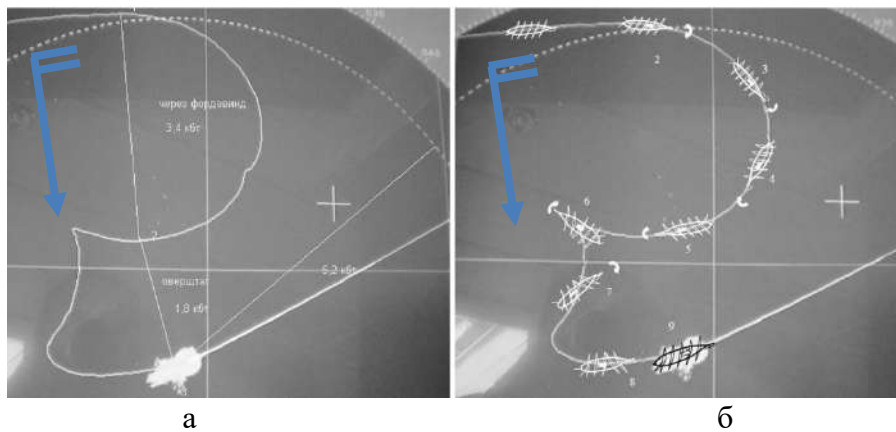


Рисунок 4 – Циркуляція великого вітрильного судна ROYAL CLIPPER:

а – фотографія з екрана радара, б – траєкторія з накладеними силуетами судна

На наступних скриншотах, рис. 5–13, наведені фрагменти даної траєкторії для різних етапів маневрування. На фрагментах додатково зображені символи наступних базових точок, ЦВ – $\odot$ – центр ваги – розраховується як центр статей навантаження на судно. Для кращого зрозуміння процесу повороту будемо вважати, що судно завантажено таким чином, що ЦВ знаходиться на міделі. І всі сили, про які буде йти мова нижче, будуть розраховуватись за умовою, що ЦВ – на міделі. У разі знаходження ЦВ в іншій точці, буде розраховуватись відстань ЦВ від міделю і всі інші точки, про які буде згадуватися нижче, будуть зміщені на таку ж відстань. Положення ЦВ під час маневру залишається незмінним.

Ц_{вітр} – $\otimes$ – центр вітрильності геометричний центр надводної частини судна, включаючи вітрила. Положення Ц_{вітр} може змінюватись завдяки додаванню або прибиранню вітрил.

А – $\otimes$ – точка прикладання сили вітру (аеродинамічної) – знаходиться з боку напрямку вітру. Чим менше кут атаки вітру, тим вона далі від центру вітрильності. Положення точки А може змінюватись при зміні курсового кута вітру [9].

ЦО – $\star$ – центр обертання, що є точкою, відносно якої момент інерції судна буде найменшим і відносно якої розраховуються всі плечі та моменти бокових сил, що діють на судно. [7] ЦО розраховується по різницях положення абсциси ПП при нульовій і максимальній швидкостях, а потім по формулі залежно від частки фактичної швидкості відносно максимальної. Положення ЦО може змінюватись внаслідок напрямку руху і швидкості судна [8].

ПП – $\diamond$ – полюс повороту, що є видимою точкою, навколо якої фактично розвертається судно. ПП знаходиться з протилежного боку від точки прикладання бокової сили відносно ЦО [7] ПП розраховується по тангенційним швидкостям носа та корми і не залежить ні від типу судна, ні від виду і кількості рушіїв і може бути розрахованим для будь-якого судна. Положення ПП може змінюватись шляхом зміни положення точки прикладання бокової сили [8].

Поворот судна має виконуватись на одному темпі, без затримок. Будь-яка зупинка може затримати судно, воно втратить хід і поворот може не вдатися.

При виконанні циркуляції, для проходження всього спектру курсів у 360°, вітрильне судно має виконати 2 повороти «через фордевінд», коли перетинає лінію вітру кормою і «оверштаг», коли перетинає лінію вітру носом у будь-якій послідовності.

Отже, розглянемо циркуляцію ПБС ROYAL CLIPPER за етапами. Маневр виконувався 21.07.2004 у Тірренському морі під командою автора. По закінченню маневру автором зроблена фотографія маневру з екрана радара (рис. 4а). Рисунок 4б побудований автором на цій фотографії шляхом накладання схематичних малюнків судна в різних стадіях циркуляції, а потім кожна стадія була перефотографована, до неї додані положення базових точок і зроблені рисунки 5–13.

Етап 1

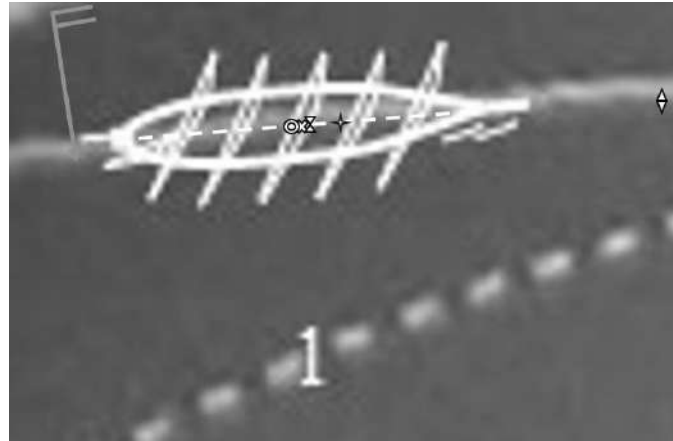


Рисунок 5 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 1

Судно прямує курсом 85° зі швидкістю 6–7 вузлів, вітер 350° 10 м/с, реї обрасоплені галфвінд лівого галса і прямі вітрила працюють у якості крила. ЦВ близько міделю. $V_{\max}=14$ вузлів. За такої швидкості ЦО $\approx (0,12-0,14)L$ від ЦВ. Ц_{вітр} трохи попереду міделю. Внаслідок того, що вітер близько траверзу, точка прикладення сили вітру приблизно в центрі вітрильності. Вітрила створюють як поздовжню, так і бокову аеродинамічну силу. Подовжня є рушійною силою, а бокова утворює дрейф. Для компенсації цього дрейфу курс прокладають на кут, що дорівнює куту дрейфу, ближче до вітру. Для цього кермо перекладають на певний кут і утримують новий курс. Момент аеродинамічної сили, точка прикладення якої розташована недалеко позаду ЦО, намагається розвернути судно проти годинникової стрілки. Бокова сила керма протидіє цьому. Кут перекладки керма встановлюється таким, щоб момент бокової сили керма дорівнював моментові аеродинамічної сили і судно йшло прямим курсом. Завдяки тому що точка прикладення аеродинамічної сили недалеко позаду ЦО, ПП далеко попереду, за габаритами судна. Для слідування прямим курсом таке розташування базових точок є оптимальним.

Етап 2

Для виконання повороту потрібно наблизити ПП, щоб він розташовувався всередині корпусу судна. Судно починає перекладати кермо праворуч на борт. Ця операція виконується поступово, щоб різко не зменшилась швидкість. Швидкість поступово знижується до 4–5 вузлів. Контр-бізань прибирається для того, щоб перенести Ц_{вітр} вперед і полегшити поворот від вітру. Курсовий кут вітру збільшується і переходить траверз у бік корми. Точка прикладання сил вітру поступово починає зміщуватися в корму. Положення ЦВ не змінюється протягом всього маневру. Внаслідок зменшення швидкості ЦО наближається до ЦВ приблизно до $(0,08-0,1)L$. (При $V_{\max}=14$ вузлів $\Delta x = 0,2 L$, і при $V = 4$ вузла $\Delta x = 0,08 L$, при $V = 5$ вузлів $\Delta x = 0,1$, згідно з формулою $\Delta x = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{V_{\max}}{\eta V_x + V_{\max}} \right)$, $\eta = \frac{2\xi}{1-2\xi}$;
 ξ – є коефіцієнтом, який визначається відношенням максимального переміщення центру обертання до довжини судна [8]).

На судно починають діяти два моменти: від бокової сили керма, який намагається розвернути судно за годинниковою стрілкою, і бокової сили вітру з лівого борту, який намагається розвернути судно проти годинникової стрілки (бо точка прикладення аеродинамічної сили лежить у корму від Ц_{вітр} через те, що вітер з кормових курсових кутів. Плече моменту сили вітру збільшується з 0 при вітрові в борт до максимального значення при вітрові в корму). Бокова сила керма залежить від швидкості судна. Саме тому потрібно вживати всіх заходів, щоб швидкість судна значно не зменшувалась. Також великий вплив має той фактор, що плече бокової сили керма завжди постійне і приблизно дорівнює $0,5 L$, а

плече сили вітру збільшується в міру зростання курсового кута вітру. Водночас величина бокової сили керма зменшується постійно весь час внаслідок зниження швидкості судна, а величина бокової сили вітру буде дорівнювати силі вітру помноженої на косинус кута між напрямком вітру і діаметральною площиною). Момент керма шляхом зменшення швидкості зменшується, і момент сили вітру в загальному випадку зменшується. Таким чином, різниця моментів також зменшується. Тому щоб результуюча бокова сила була спрямована ліворуч, коли точка її прикладення віддаляється в бік корми, потрібно перекладку керма виконувати плавно, щоб швидкість не зменшилась різко. Інколи для продовження повороту потрібно зачекати якийсь час для збільшення швидкості судна.

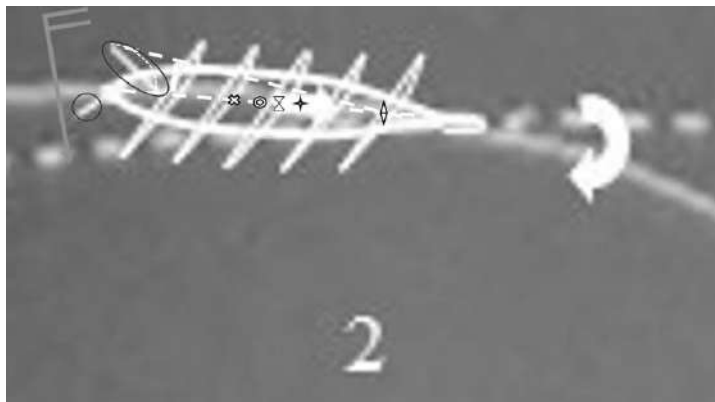


Рисунок 6 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 2

Етап 3

Судно продовжує поворот. Реї починають брасопити таким чином, щоб вони займали положення відносно вітру приблизно в 90° . Вітрила починають працювати таким чином, що швидкість набувається шляхом сили їхнього лобового опору вітру. Швидкість продовжує бути на попередньому рівні. Причини цього описані на етапі 2. ЦВ і ЦО знаходяться на попередніх місцях. Цвітр внаслідок того, що задні вітрила закривають передні, зміщується в корму. Курсовий кут вітру збільшується до 180° . Завдяки цьому плече сили вітру збільшується максимально до $0,25 L$ [1].

При наявності достатньої швидкості момент бокової сили керма все одно пересилює момент бокової сили вітру, але в якийсь момент, на курсовому куті в $130\text{--}150^\circ$ судно погано слухається керма (це відбувається саме тому, що на цих курсових кутах величини моментів, які утворені боковою силою керма і вітром наближаються одна до одної). Точка прикладання аеродинамічної сили вітру зміщується в корму і тому полюс повороту наближається до ЦО. Це дає можливість прискорити поворот, коли курсовий кут вітру стає більшим 150° .

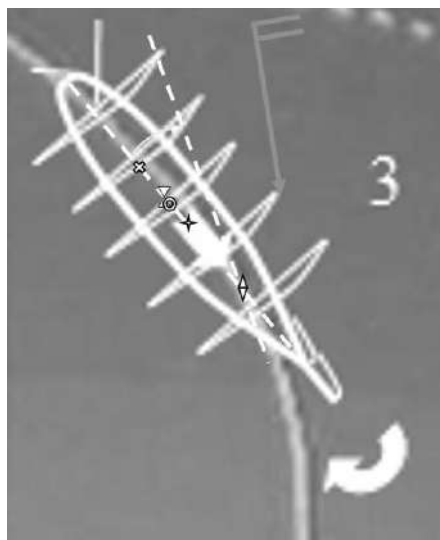


Рисунок 7 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 3

Етап 4

Судно перетинає лінію вітру кормою, таким чином виконуючи поворот «через фордевінд». Реї продовжують брасопити, утримуючи постійний кут між ними і напрямком вітру. Для підвищення кутової швидкості повороту після перетину лінії вітру контр-бізань ставлять, розвернувши на правий галс. ЦВ, і ЦО знаходяться на попередніх місцях. Ц_{вітр} повертається на попереднє місце, де він був до прибирання контр-бізані. Шляхом подальшого зменшення курсового кута вітру, точка прикладення сили вітру наближається до Ц_{вітр}. Завдяки цьому ПП мав би зміщуватися вперед у міру зменшення відстані між Ц_{вітр} та точкою прикладення аеродинамічної сили. Але бокова сила керма і сила вітру починають діяти в одному напрямку, утворюючи момент одного знаку, який розвертає судно за годинниковою стрілкою. Судно рухається із таким кутом дрейфу, щоб проєкція поздовжньої сили на бокову вісь дорівнювала сумі бокових сил від керма і вітрил. Завдяки цьому плече сумарної бокової сили керма і вітрил може зміщуватися трохи вперед або назад, або залишатися на місці залежно від сили вітру, ПП залишається в межах корпусу. Це надає можливість на цьому етапі продовжувати поворот, зберігаючи інерцію обертального руху.

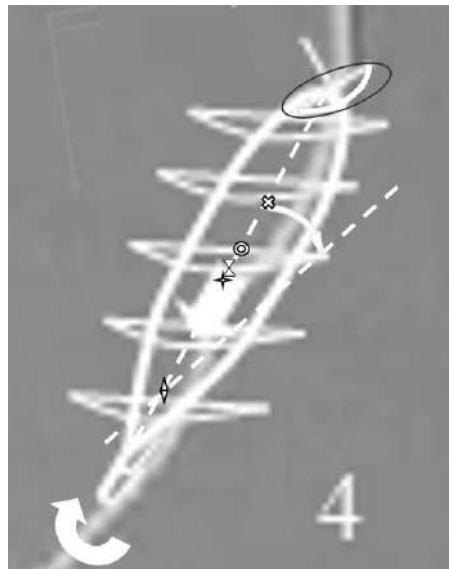


Рисунок 8 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 4

Етап 5

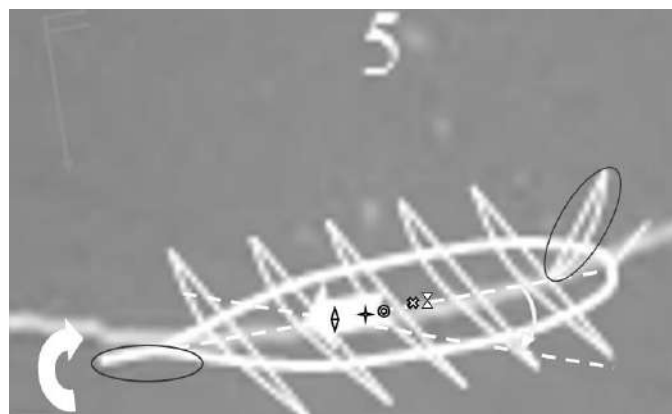


Рисунок 9 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 5

Судно продовжує повертати і йде на поворот «оверштаг». Судну потрібна достатня інерція, щоб перетнути носом лінію вітру. Для збільшення кутової швидкості Ц_{вітр} потрібно змістити назад. Для цього контр-бізань брасоплять на лівий галс і прибирають клівери. Курсовий кут вітру зменшується до 90° продовжує зменшуватися далі і точка прикладення сили вітру наближається до Ц_{вітр}, і потім перетинає її. ЦВ знаходиться на попередньому місці. Кут атаки прямих вітрил зменшується і реї наближаються до напрямку, коли вони перетнуть

лінію вітру. Швидкість судна знижується і ЦО наближається до ЦВ. Внаслідок дії бокової сили керма ПП знаходиться на відстані $(0,17-0,18) L$ попереду міделю.

Етап 6

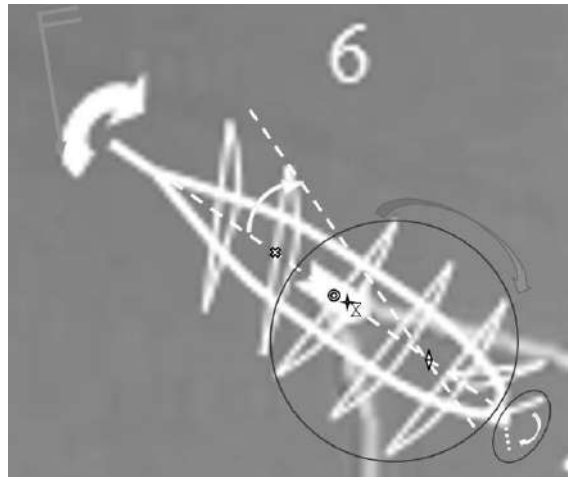


Рисунок 10 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 6

Судно за інерцією продовжує рухатись вперед і розвертатися за годинниковою стрілкою. При перетині реями лінію вітру прямі вітрила обстінюються. Судно втрачає швидкість. Як тільки прямі вітрила обстіняться, починають брасопити три задні щогли на протилежний галс. Під тиском прямих вітрил на цих щоглах і контр-бізані, яка обрасоплена на лівий галс, судно продовжує розворот за годинниковою стрілкою і набуває швидкість назад. Після того як судно зупиниться, кермо перекладаємо ліворуч на борт. Хоч на задньому ходові кермо менш ефективно, ніж на передньому, але воно все одно працює і при збільшенні швидкості заднього ходу до $1,0-1,5$ вузлів відхиляє корму ліворуч. ЦВ і Ц_{вітр} знаходяться на попередніх місцях. ЦО через відсутність швидкості зміщується до ЦВ, а потім, по набутті швидкості заднього ходу, трохи в корму від ЦВ, приблизно на $0,03-0,04 L$. Точка прикладання аеродинамічної сили в зв'язку зі зменшенням курсового кута вітру менш ніж 90° переміщується вперед від міделю і, відповідно, від ЦВ. Завдяки цьому ПП зміщується назад, за ЦО тому, що бокова сила керма при відсутності швидкості вже майже не працює, а аеродинамічна сила вітру намагається розвернути судно проти годинникової стрілки. У цей момент ПП може бути за межами судна. Отже, єдиною силою, яка працює на розворот судна за годинниковою стрілкою, залишається сила (момент) інерції обертального руху. Тому для успішного його виконання потрібно набрати заздалегідь достатню кутову швидкість.

Етап 7

На цьому етапові, перетнувши носом лінію вітру, судно набуває швидкість заднього ходу і під впливом перекладеного ліворуч керма і вітрил на фок- і грот-щоглах продовжує розворот за годинниковою стрілкою. Вітрила на трьох задніх щоглах працюють гірше тому, що їхній кут атаки зменшується і в якийсь момент вітрила опиняються в положенні «левентік», тобто, коли вітер дме вздовж вітрил і вітрила не працюють. Також, як тільки вітер перетне лінію носа, ставлять клівери, причому, на правий галс. Контр-бізань прибирають. Все це разом з прямими вітрилами фок- і грот-щогл надає судну бокову силу, яка розвертає судно за годинниковою стрілкою на задньому ходові. ЦВ знаходиться на попередньому місці. Ц_{вітр} зміщується вперед. Через набуття швидкості заднього ходу ЦО зміщується назад. Точка прикладання аеродинамічної сили знаходиться попереду міделю через те, що вітер дме під гострим кутом. Все це збільшує момент, що розвертає судно за годинниковою стрілкою, а відповідно і кутову швидкість. ПП знаходиться в кормовій частині корпусу завдяки тому, що точка прикладання аеродинамічної сили знаходиться попереду від ЦО.

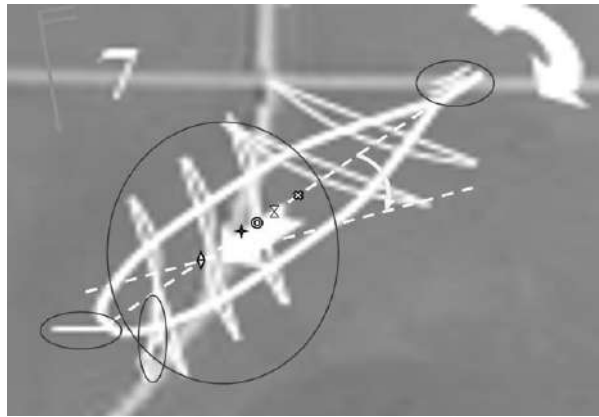


Рисунок 11 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 7

Етап 8

На цьому етапі судно на задньому ході достатньо розвернулося за годинниковою стрілкою і прямі вітрила на 3 задніх щоглах почали працювати вперед. Прямі вітрила на передніх щоглах ще працюють назад, тому їх брасоплять на лівий галс. Шкоти кліверів також перекидають на лівий галс. Судно зупиняється і починає набувати передній хід. ЦВ і Цвітр знаходяться на попередніх місцях. Поки судно не набуло швидкості ЦО знаходиться в одному місці з ЦВ. Оскільки курсовий кут вітру збільшився, точка прикладення аеродинамічної сили також наблизилась до міделю і, відповідно, до ЦВ. ПП знаходиться в кормі, можливо, навіть, за межами корпусу.

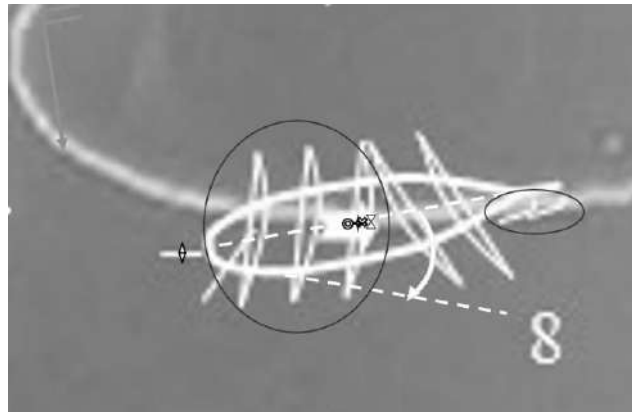


Рисунок 12 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 8

Етап 9

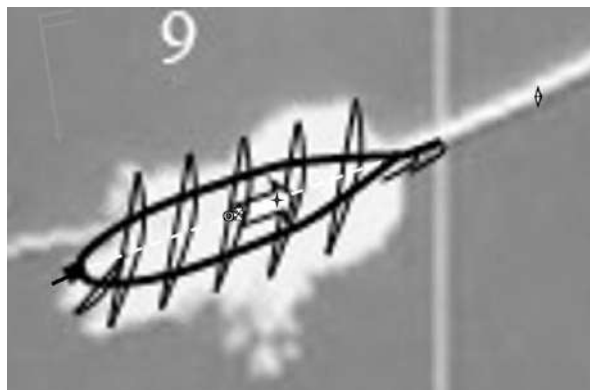


Рисунок 13 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 9

На цій стадії брасоплять реї на фок- і грот-щоглах на лівий галс, ставлять контр-бізань, поправляють всі вітрила і лягають на попередній курс. Всі опорні точки займають початкові положення.

Таким чином, виконання маневрів на великому вітрильному судні вимагає від судноводія знання теоретичних підвалин як аеродинаміки, так і гідродинаміки, а саме, як використовувати переміщення полюса повороту під час зміни напрямків як вітру, так і курсу судна. Повороти на великому вітрильному судні з прямими вітрилами, особливо повороту «оверштаг», вимагають від екіпажу знань, вмінь і злагодженості в роботі. Судна меншого розміру можуть перетнути лінію вітру носом за інерцією без втрати відстані під вітер, хоч і це вимагає гарного володіння навичками виконання цього маневру. А на судні такої водотоннажності і такої довжини, поворот «оверштаг» може виконуватися тільки з заднім ходом. Тому знання положення ЦО та ПП як на передньому, так і на задньому ходах допомагає виконати цей поворот, так і поворот «через фордевінд». У повороті «через фордевінд» потрібно також знати деякі нюанси, наприклад, те, що на курсових кутах вітру $130\text{--}150^\circ$ одного борту при повороті на протилежний борт судно погано слухається керма, якщо не має достатньої швидкості. У такому разі потрібно приймати додаткові заходи, наприклад зменшувати площу кормових вітрил.

Основні результати та їх обговорення.

– При виконанні повороту «через фордевінд» сила і плече бокової сили керма залишаються в попередніх межах, навіть сила може зменшуватися внаслідок падіння швидкості судна через перекривання передніх вітрил задніми. Момент сили вітру, навпаки, збільшується через наближення курсового куту вітру до 180° і збільшення плеча сили вітру завдяки переміщенню точки прикладання сили вітру в корму. На курсових кутах у $130\text{--}150^\circ$ судно погано слухається керма. (Етап 3) Це відбувається саме тому, що на цих курсових кутах величини моментів, які утворені боковою силою керма і вітром наближаються одна до одної. Точка прикладання аеродинамічної сили вітру зміщується в корму і тому полюс повороту наближається до ЦО. Для подолання цієї проблеми потрібно весь час брасопити реї перпендикулярно до вітру і, якщо це потрібно, зменшити кут перекладки керма на якийсь час для набору швидкості і тим самим збільшення моменту бокової сили керма після набору швидкості і перекладки керма на борт. Це дає можливість прискорити поворот, коли курсовий кут вітру стає більшим 150° і надалі переходить на протилежний борт, де моменти сил керма та вітру допомагають один одному. Таким чином завдяки експерименту підтверджено те, що на курсових кутах у $130\text{--}150^\circ$ судно погано слухається керма і пояснено, чому це відбувається спираючись на нову змістовну теорію повороту судна.

– Критичною точкою для судна з прямим вітрильним оснащенням є перетин судном лінії вітру носом. Для цього судно розганяють, збільшуючи кут атаки шляхом відвороту від вітру, а потім приводять до вітру перекладкою керма. Щоб збільшити крутний момент від бокової сили керма, виносять контр-бізань на вітер і прибирають клівери (Етап 5). Перетнувши лінію вітру реями, прямі вітрила на щоглах обстінюються (вітер дме в них з носового напрямку) і починають працювати назад, зупиняючи судно (Етап 6). У цей момент починають брасопити реї на 3 задніх щоглах, виводячи їх з вітру. Цвітр при цьому переміщується вперед завдяки виведенню кормових вітрил з вітру і точка прикладання сили вітру також переміщується вперед, бо вітер дме з носових курсових кутів. Оскільки точка прикладання сили вітру знаходиться в носовій частині судна, ПП пересувається в кормову частину судна. Коли судно зупиняється, а потім починає рух назад, ЦО знаходиться в районі ЦВ, бо швидкості в цей момент близько 0. Кермо перекладають на протилежний борт (у такому випадку з правого борту на лівий) для того, щоб продовжити розворот за годинниковою стрілкою на задньому ході. ЦО при цьому починає зміщуватися назад при наборі швидкості до $1,0\text{--}1,5$ вузла, а плече бокової сили вітрил збільшується. Для цього ж переносять центр вітрильності вперед ставлячи клівера і прибираючи контр-бізань (Етап 7). У підсумку ЦО зміщуються назад за ЦВ, Цвітр зміщується вперед, точка прикладання сили вітру також зміщується вперед. ПП зміщується назад і сприяє повороту за годинниковою стрілкою. Увалившись під вітер на достатній кут, коли почнуть працювати вперед кормові вітрила, судно перекладає кермо праворуч і отримує хід вперед. Носові щогли брасоплять на

новий галс (Етап 8). Це також підтверджено і пояснено на базі використання нової схеми повороту судна і переміщення базових точок повороту.

– Судно розвертається навколо ПП. Для цього сила керма, яка протидіє силі впливу вітрил, має утворювати момент відносно ЦО, який перевершує момент сили вітру також відносно ЦО, або використовувати силу вітру для продовження повороту в разі, коли сила вітру утворює момент у напрямку повороту. Це досягається тим, що, знаючи положення ЦО при маневрах (попереді ЦВ при русі вперед і позаду від ЦВ при русі назад) і положення точки прикладення сили вітру, момент від бокової сили керма, який є майже постійним і залежить в основному від сили вітру, має завжди перевершувати момент сили вітру. А це вже досягається тим, що момент сили вітру можна регулювати шляхом збільшення або зменшення площі вітрильності (прибираючи або ставлячи вітрила) або брасоплячи реї і таким чином виводячи з вітру носові або кормові вітрила. Тобто, основним завданням судноводія для успішного повороту вітрильного судна є перевернення моменту від бокової сили керма над моментом сили вітру або використання сили вітру для продовження повороту в кожний конкретний момент повороту.

– На циркуляції судно виконує два повороти. Для того щоб вони були вдалим, базові точки повороту потрібно розташувати в потрібних місцях. Маневр вийшов вдалим, тому можна запропонувати розташовувати базові точки в тих місцях, де вони були розташовані при виконанні цього маневру і використовувати еволюції, як написано вище.

– На великому вітрильному судні ROYAL CLIPPER протягом 2004–2006 років було проведено 19 експериментів з циркуляції судна, які підтвердили дієвість методу.

Висновки.

– Проведений аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів. Джерела [2–5] стосуються маневрування під вітрилами, джерела [1, 5–18] стосуються виконання суднами повороту і врахування базових точок повороту і тільки джерело [5] стосується використання рухомого полюса повороту вітрильником.

– Розроблена схема повороту великого вітрильного судна, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру.

– Розроблений шлях повороту великого вітрильного судна з використанням концепції полюса повороту.

– Виконана перевірка працездатності та ефективності розробленого шляху через проведення 19 експериментів з циркуляції великого вітрильного судна.

– На рис. 4а видно, що зміщення під вітер при повороті «через фордевінд» складає 3,4 кбт, а при повороті «оверштаг» – 1,8 кбт. При плаванні під вітрилами для зміни галсу кращим буде поворот «оверштаг», але, якщо він не вдається через якісь обставини на передньому ході, потрібно робити на задньому, або використовують поворот «через фордевінд».

– Для маневрів на великому вітрильному судні потрібно чітко уявлять положення базових точок, а саме: точки прикладання сили вітру (аеродинамічної), центру вітрильності, центру ваги, центру обертання, полюсу повороту.

– Для полегшення повороту бажано робити так, щоб при зміні напрямку руху судна (вперед – назад) і виконання при цьому повороту точка прикладення сили була з протилежного боку від напрямку руху (при русі вперед – у кормі, при русі назад – у носові). Це надасть можливість переносити ПП у напрямку руху і полегшувати поворот.

– Науковою новизною є те, що при повороті «оверштаг» під час перетину вітру носом дві носові щогли залишаються на попередньому галсі, а 3 задніх – брасопляться на відміну від того, що раніше на інших судах тільки фок-щогла залишалася на попередньому галсі, а решта брасопились. Це відбувається завдяки тому, що на 5-щоголовому кораблі фок- і грот-щогли знаходяться попереду міделя і тому можуть вважатися носовими щоглами.

– Науковою новизною є те, що розглядається випадок з врахуванням двох поперечних сил: керма та вітрил. Визначаються плечі цих сил і порівнюються їхні моменти відносно центру обертання. При цьому для успішного виконання повороту при різних

напрямах моментів сил керма та вітру проводяться заходи для утримання переваги моменту від сили керма над моментом від сили вітру (прибираються та додаються вітрила, брасопляються певні реї в потрібному напрямку).

– Науковою новизною також є розклад процесу повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням на етапи і визначення положення базових точок повороту на кожному із етапів відповідно до запропонованої змістовної моделі повороту судна [17], а також визначення основного завдання судноводія для успішного виконання повороту.

– Пропонується графічна оперативна карта маневру (рис. 14).

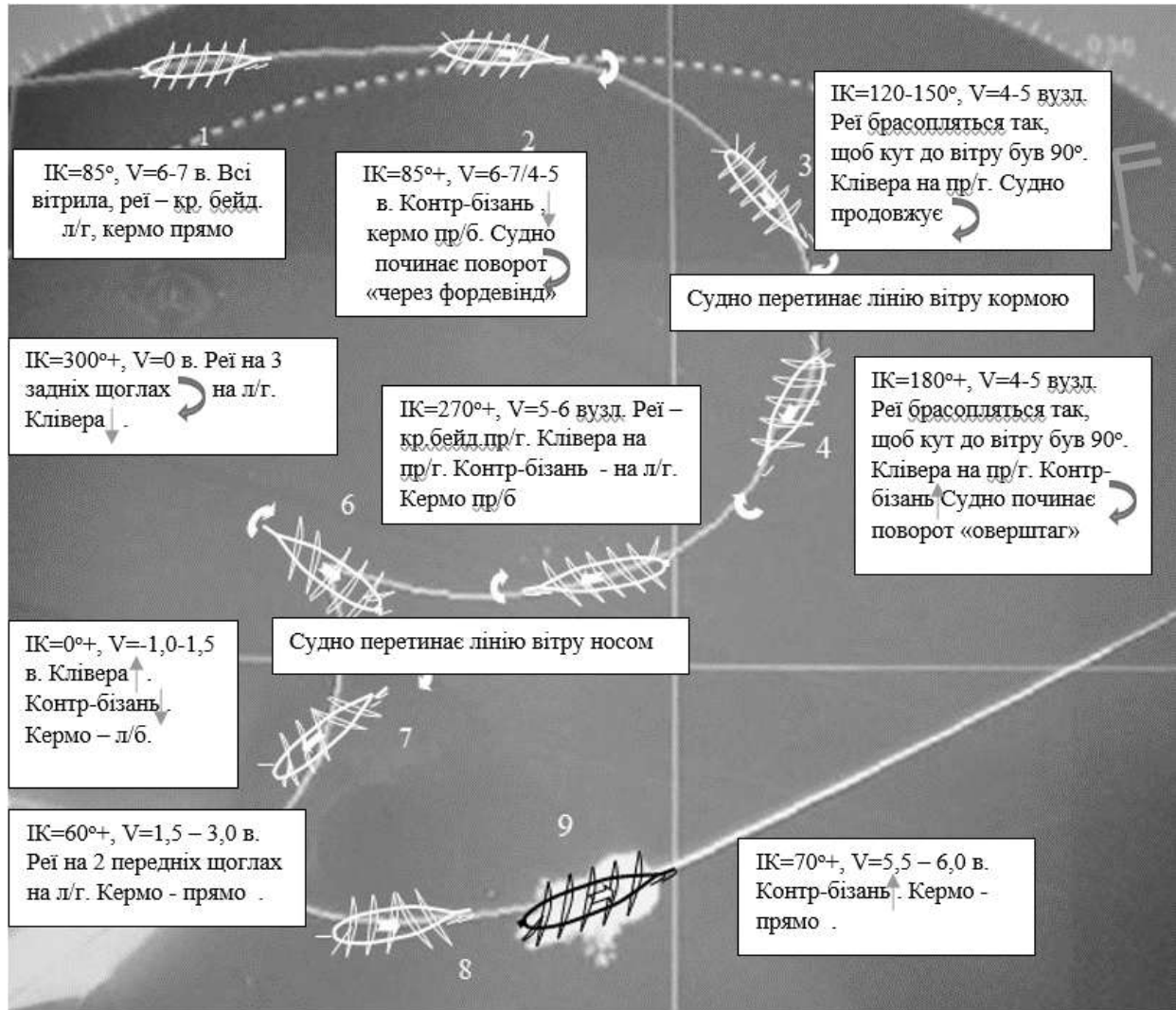


Рисунок 14 – Графічна оперативна карта маневру циркуляції BBC ROYAL CLIPPER

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть проводитися стосовно процесу повороту різних типів суден з різними рушіями в різних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

1. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor, Kyrychenko Kostiantyn. Pivot Point position determination and its use for maneuvering the vessel. Ship and offshore structure. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2022.2052480>. SCOPUS.
2. Мархай Ч. Теорія плавання під вітрилами. Ч. Мархай. М. : Фізкультура і спорт, 1970. 408 с.

3. John Harland. Seamanship in the Age of Sail. An Account of the Shiphhandling of the Sailing Man-Of-War 1600-1860, Based on Contemporary Sources / John Harland. (London : Conway Maritime Press, 1984; reprinted 1992 by the Naval Institute Press, Annapolis).
4. Товстокорий О. М. Маневрування під вітрилами : навчальний посібник. О. М. Товстокорий. Херсон : ХДМА, 2019. 160 с.
5. Chase G. A. Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point, The Northern Mariner/Le Marin Du Nord, Vol. 9. Issue 3, 53–59. 1999. <https://doi.org/10.25071/2561-5467.629>.
6. Cauvier H. The Pivot Point, «The PILOT». The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, Vol. 295. 2008. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>. SCOPUS.
7. Seo S. G. The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring, Proceedings of IMLA, Vol. 1, Issue 29, 271–280. 2011. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring. SCOPUS.
8. Seo S. G. Earl K. A Paradigm Shift in Shiphhandling (The Pivot Point), Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University. 2015.
9. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, 2016. 605–612. <https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09>. SCOPUS.
10. Cummins T. Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong!, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>. SCOPUS.
11. Cummins T. Where is the centre of a ship's rotation?, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley. 2021.
13. Vitaliy Kobets, Ihor Popovych, Serhii Zinchenko, Pavlo Nosov, Oleh Tovstokoryi, Kostiantyn Kyrychenko. Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11th International Conference "Information Control Systems & Technologies" Odesa, Ukraine.
14. Tovstokoryi O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163> Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 2(29) 2024. С 152–163.
15. Товстокорий О. М. Практичні методи розрахунку положення базових точок змістовної моделі повороту судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 1(30) (2025). С. 247–257. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257> Категорія Б.
16. Дьомін С. І. та ін. під редакцією В. І. Снопкова. Керування судном. М. : Транспорт, 1991. 359 с.
17. Port Revel Shiphhandling. Course manual 2006.pdf <https://pdfcoffee.com/qdownload/manual-2006-ship-handling-pdf-free.html>.
18. Port Revel Shiphhandling 2014 Course Manual.pdf. Доступ до джерела: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=29727>.

REFERENCES

1. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. Pivot Point position determination and its use for maneuvering the vessel // Ship and offshore structure. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2022.2052480>.
2. Czesław Marchaj. Sailing Theory and Practice. Dodd, Mead 1964–451 p.
3. John Harland (1984). Seamanship in the Age of Sail. An Account of the Shiphhandling of the Sailing Man-Of-War 1600–1860, Based on Contemporary Sources / John Harland. (London : Conway Maritime Press; reprinted 1992 by the Naval Institute Press, Annapolis).
4. Tovstokoryi, O. (2019). Manevruvannja pid vitrylamy : tutorial. Kherson : KSMA, 160 p.
5. Chase, G. A. (1999). Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point, The Northern Mariner/Le Marin Du Nord, Vol. 9. Issue 3, 53–59. <https://doi.org/10.25071/2561-5467.629>.
6. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point, «The PILOT». The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, Vol. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
7. Seo, S. G. (2011). The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring, Proceedings of IMLA, Vol. 1, Issue 29, 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring. SCOPUS.
8. Seo, S. G., Earl, K. (2015). A Paradigm Shift in Shiphhandling (The Pivot Point), Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University.
9. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, 605–612. <https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09>. SCOPUS.
10. Cummins, T. (2020). Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong!, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>. SCOPUS.
11. Cummins, T. (2020). Where is the centre of a ship's rotation?, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
12. Fossen, T. I. (2021). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley.
13. Kobets, V., Popovych, I., Zinchenko S., Nosov P., Tovstokoryi O., Kyrychenko K. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11th International Conference "Information Control Systems & Technologies" Odesa, Ukraine.
14. Tovstokoryi, O. M. (2024). Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163> Naukovyj visnyk of Kherson state maritime academy: naukovyj journal № 2(29). С 152–163.
15. Tovstokoryi, O. M. (2025). Practychni metody pozrahunku polozhennja bazovyh tochok zmistovnoi modeli povorotu sudna, Naukovyj visnyk of Kherson state maritime academy: naukovyj journal № 1(30) С. 247–257. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257> Kategorija B.
16. Domin, S. I. et al. (1991). Keruvannia sudnom, M.: Transport, 359 с.
17. Port Revel Shiphhandling. Course manual 2006.pdf <https://pdfcoffee.com/qdownload/manual-2006-ship-handling-pdf-free.html>.
18. Port Revel Shiphhandling 2014 Course Manual.pdf. Доступ до джерела: <https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=29727>.

Tovstokoryi O. M. A SUBSTANTIVE MODEL OF THE TURNING CIRCLE OF A LARGE SAILING VESSEL, WHICH INCLUDES “WEARING” AND “TACKING” TURNS

The object of the study is the process of turning a large sailing vessel with square-rigged sail arrangement. The pivot point plays a significant role in the process of turning a vessel. Turning a large sailing vessel differs from turning a vessel with a mechanical engine. For a vessel with a mechanical engine, turning is performed by simply shifting the rudder, and for a sailing vessel, especially large and square-rigged, performing a turn often requires a maneuver involving the adjustment of the sails, and sometimes two separate maneuvers.

According to the new concept, the turn is performed using a three-point scheme, namely: the center of gravity of the vessel is calculated. From the center of gravity, the position of the center of rotation is calculated, which is displaced from the center of gravity towards the oncoming water flow. From the center of rotation, the lever arms of the lateral forces that affect the vessel are calculated. If the force is one, the position of the pivot point of rotation is on the opposite side from the point of application of the lateral force relative to the center of rotation. In the case of two or more forces, the total moments of the lateral forces acting clockwise and counterclockwise relative to the center of rotation are calculated. Whichever total moment is greater determines the direction of the vessel's turn. In order for the vessel to turn in the desired direction, it is necessary that the moment of the lateral force of the rudder exceeds the moment of the lateral force of the sails. When turning a sailing vessel, two lateral forces act: the rudder and the sails. In the case of two or more forces, the total moments of the lateral forces acting clockwise and counterclockwise relative to the center of rotation are calculated. The vessel turns in the direction of the greater total moment. Therefore, for the vessel to turn in the desired direction, the moment of the rudder's lateral force must exceed the moment of the sails' lateral force.

As a result of both theoretical research and practical experiments, a new scheme for turning a large square-rigged sailing vessel was invented, taking into account the latest research, which is presented in this article.

These results can be used when maneuvering square-rigged sailing vessels in various sailing conditions.

Key words: large square-rigged sailing vessel; turning of sailing vessel; center of rotation; pivot point; center of sailing area.

© Товстокорий О. М.

Статтю прийнято до редакції 24.07.2025