

## OPERATIONAL CONTROL OF MANEUVERING WIDTH IN COMPRESSED WATERS

### ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ШИРИНИ МАНЕВРЕНОГО ЗСУВУ В СТИСЛИХ ВОДАХ

S.E. Maltsev, PhD student

С.Е. Мальцев, аспірант

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

#### ABSTRACT

*The analysis of the historical aspect of the development of the mathematical model for determining the abscissa of the pivot point of rotation is considered in the work. Three stages of model formation are described: according to the location of the transverse force that causes the ship to rotate; on the resulting transverse force of all influences of internal and external forces; on the tangential speed of the limbs of the vessel. The first stage of data generation is unsuitable for use in the maneuvering process due to the need to spend time on entering new data and performing calculations, as a result of which the information is delayed until a decision is made. The second stage requires the introduction of external and internal control forces, the calculation of their transverse component and the calculation of the equivalent of all transverse forces, to determine the abscissa of the pivot point.*

*The third stage is the most suitable for navigation purposes, because it receives the original data from the existing navigation device, requires minimal calculations, so it can be performed quickly, in the process of maneuvering and in time to execute the necessary commands to adjust the movement.*

*Based on the use of new methods for determining the abscissa of the pivot point developed a block diagram of the system of control and registration of the probable width of the shunting band, taking into account the characteristics of stability, speed of the vessel and angular velocity at constant speed and when turning.*

*Developed methods and techniques of using a given algorithm for planning and operation of the ship control system, including curved segments of the path, can significantly increase the safety of navigation. The use of information about the pivot point and planning the width of the maneuvering shift, allows you to detect the beginning of the curvilinear motion and adjust the controls to move along the planned trajectory.*

*The results can be used on ships in automatic mooring planning, as part of a pilot's individual information device and in the development of a simulator for training navigators to perform navigation in compressed waters. The proposed device can be used in the training of captains, pilots and senior courses of maritime educational institutions of Ukraine.*

**Keywords:** boundary yaw on a constant course, maneuvering shift, curvilinear motion, pivot point, characteristic linear size, probable width of maneuvering shift, operative control, admissible width of navigable water area.

#### Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Аналіз рейсового циклу морських суден показує, що вони близько 20% ходового часу проводять в умовах стислих вод, однак на його частку доводиться біля 80% усіх аварійних подій.

Характерні точки корпусу судна визначають основні параметри маневрування, які дозволяють розрахувати основні характеристики площі акваторії, яку займає судно при русі в стислих водах. Серед таких характеристик визначальне місце займає ширина маневрового зсуву, яка дозволяє спланувати прохід через обмежену акваторію стислих вод, і розрахувати положення характерних точок, які необхідні для організації контролю зсуву відносно планових координат.

Між тим, для виконання потрібних розрахунків, необхідні текучі дані, які змінюються в процесі маневрування і час для виконання відповідних розрахунків, якого обмаль. Виконувати розрахунки під час маневрування не завжди можливо, а дані для завчасних обчислень відсутні. Для того, щоб скоротити час очікування отримання потрібних даних, необхідно автоматизувати процес розрахунків і використовувати швидкодіючі алгоритми їх виконання.

Особливо ці вимоги проявляються при русі на криволінійних відрізках шляху, коли необхідно планувати координати руху судна на циркуляції траєкторними точками і використовувати швидкодіючі способи оцінки зсуву і своєчасного його коригування.

Це вимагає використання розроблених в останній час способів планування заданого шляху і систем підтримки прийняття рішення по маневруванню для управління по ньому. Тому питання організації інформаційного забезпечення процесу руху судна в стислих водах параметрами про його стану являється вельми актуальним.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Основним питанням, яке потребує оперативного визначення параметру величини займаної полоси для оцінки ширини маневрового зсуву, являється абсциса полюсу повороту та управляємість судна при рисканні на постійному курсі та під час виконання поворотів.

Спроба зменшити вплив людини на аварійність за рахунок автоматизації виконання окремих функцій, не виключає його зі сфери управління, а призводить до ще більш тісного зв'язку з пристроями і системами.

Таким чином, гарантовану безпеку управління маневруванням можна забезпечити за рахунок підвищення швидкодії систем обробки інформації з подальшою розробкою алгоритмів операторської діяльності шляхом створення системи оперативної підтримки прийняття рішень з маневрування.

При оглядово - порівняльному способі управління судном оператору здається, що обертання відбувається навколо нього, в той час коли фактично відбувається навколо полюсу повороту (ПП). Це призводить до невірної оцінки відстаней до орієнтирів і створює передумови для виникнення аварії.

При використанні буксирів точка прикладання сили щодо ПП дозволяє меншою потужністю получити максимальний момент від сили упору буксира.

Основним положенням при визначенні абсциси ПП є розташування його по іншу сторону від поперечної сили відносно центра ваги G. Рівняння усталеного руху судна по осі У навколо вертикальної осі Z можуть бути записані [1]:

$$R_y = P_y; \quad M_R = P_y \cdot X_p, \quad (1)$$

де  $R_y$  - рівнодіюча поперечних гідродинамічних сил на корпусі судна;  $P_y$  - рівнодіюча поперечних сил від засобів управління;  $M_R$  - момент рівнодіючої поперечних гідродинамічних сил щодо вертикальної осі Z;  $X_p$  - плече рівнодіючої поперечної сили від засобів управління.

Зазвичай плече висловлюють в відносних безрозмірних одиницях за формулою  $\bar{X}_p = X_p / L$ , де  $L$  - довжина судна між перпендикулярами.

При початкових умовах, коли судно на рівному кілі, і вважаючи його симетричним щодо мідель - шпангоута виділимо елементарну ділянку по довжині  $\Delta$ . Тоді елементарну гідродинамічну силу  $dR_y$  і момент  $dM_R$  можна записати у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$dR_y = C_r \cdot \frac{\rho}{2} dV^2 \cdot dx, \quad (2)$$

$$dM_R = C_r \cdot \frac{\rho}{2} dV^2 \cdot x \cdot dx, \quad (3)$$

де  $C_r$  - безрозмірний гідродинамічний коефіцієнт опору;

$V$  - лінійна швидкість елемента;  $\rho$  - щільність води.

Лінійна швидкість будь-якої елементарної ділянки корпусу визначаються кутовою швидкістю і відстанню від ПП, і розраховуються по формулі:

$$V = (\bar{X}_П - \bar{X}) \cdot \omega \cdot L, \quad (4)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання.

Після рішення диференціальних рівнянь (2) – (3) між точкою прикладання бокової сили  $X_p$  (відносно плече поперечної сили від ЦВ  $\bar{X}_P$ ) і положення ПП на лінії ДП  $X_П$  (відносно положення ПП від ЦВ ( $\bar{X}_П$ )) отримана залежність:

- при розташуванні ПП за межами корпусу,  $\bar{X}_П > 0.5$ :

$$\bar{X}_P = (-\bar{X}_П / 6) / (\bar{X}_П^2 + 1/12); \quad (5)$$

- при розташуванні ПП в межах корпусу,  $\bar{X}_П < 0.5$ :

$$\bar{X}_P = (\bar{X}_П^4 / 6 - \bar{X}_П^2 / 4 - 1/32) / (2 \cdot \bar{X}_П^3 / 3 + \bar{X}_П / 2). \quad (6)$$

Крім того необхідно відзначити, що тільки обертання судна, без поперечного і поздовжнього переміщення, можливо в тому випадку, коли ПП збігається з ЦВ. В іншому випадку при обертанні виникає відцентрова сила, прикладена до ЦВ, внаслідок чого судно набуває переміщення в поздовжньому і поперечному напрямках. Існуючі моделі не дозволяють визначити положення ПП коли на судно діє кілька сил, при цьому швидкодія процесу руху не дозволяє виконувати необхідні обчислення. Тому необхідно розробити формалізовані моделі для автоматизації процесу розрахунків для таких випадків швидкодіючими алгоритмами. При цьому потрібно мінімізувати кількість вхідних даних, для підвищення швидкодії процесу і своєчасного отримання необхідної інформації.

### Формування мети роботи та постановка завдань дослідження

Рішення системи диференціальних рівнянь (2, 3) передбачає визначення абсциси ПП для однієї сили. Тому об'єктом дослідження став процес інформаційного забезпечення процесу маневрування при використанні багатьох сил від буксирів, якорів та швартовних кінців, а предметом дослідження - спосіб оперативного визначення абсциси ПП та ширини маневрової полоси по мінімальній кількості вхідних даних, які отримуються від приладів оперативно під час маневрування.

Робоча гіпотеза дослідження полягає в оперативному визначенні рівнодіючої бокових сил, від різних управляючих сил, які діють на судно та розрахунок абсциси ПП по ній. Це дозволить визначити ширину маневреної полоси та точки прикладання зовнішніх сил при маневруванні.

Дослідження передбачає визначення абсциси ПП по даним, які поступають від доплерівського лагу, у вигляді векторів кінцівок судна та вектору течії, яка діє при цьому.

Результати дослідження представляють на інформаційному табло у вигляді розміщення ПП на контурі ватерлінії та ширини маневреної полоси.

### Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Якщо на судно діють декілька сил (рис.1), то появляється необхідність виконання розрахунків, під час маневрування, які потребують часу. Оскільки такого часу обмаль, то потрібно використовувати швидкодіючі алгоритми і обчислювальну техніку. Для досягнення поставленої мети був розроблений наступний алгоритм рішення задачі визначення положення ПП [2,3].

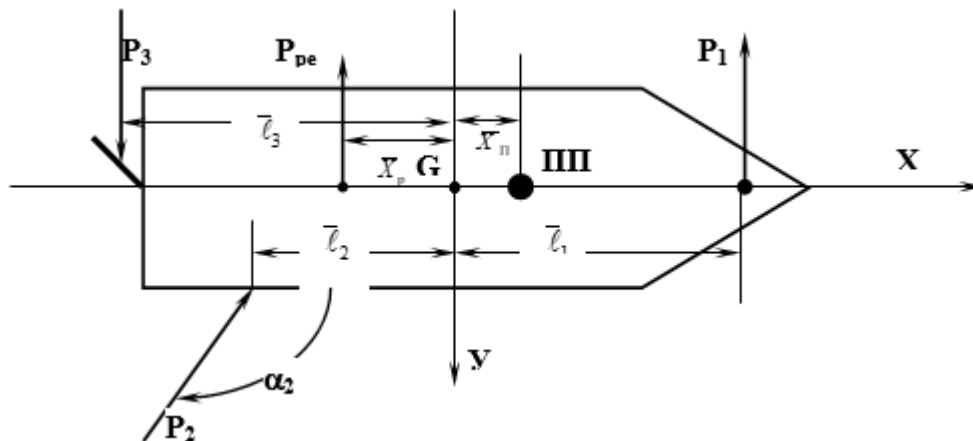


Рис.1 - Графічне зображення розташування зовнішніх і внутрішніх сил відносно центра ваги

На судно при маневруванні діють два види сил : внутрішні управляючі, що розвиваються судновими засобами, - гвинтом, кермом, діють носовий і кормовий підрулюючий пристрої; зовнішні, від буксирів, якоря, швартовних кінців, вітру, течії і другі. Для розрахунку абсциси ПП необхідно використати наступний алгоритм.

1. Скласти перелік векторів усіх сил, що діють на судно.
2. Визначити рівнодійну поперечну складову усіх внутрішніх і зовнішніх сил, що діють на корпус судна.
3. Визначити її плече.
4. По значенням плеча розрахувати положення полюсу повороту.
5. При необхідності скорегувати розстановку буксирів, змінити використовувані засоби управління і зробити перерахунок положення ПП.
6. Вивести значення координат ПП на екран дисплея і на контур судна.

Рівнодійну поперечних сил визначимо в наступній послідовності. Виконаємо розрахунок суми усіх поперечних сил по наступним залежностям:

$$\sum_{i=1}^n P_{рез} = P_1 \cdot \sin\alpha_1 + P_2 \cdot \sin\alpha_2 + \dots + P_i \cdot \sin\alpha_i + \dots + P_n \cdot \sin\alpha_n, \quad (7)$$

де  $P_{рез}$  - рівнодійна поперечних сил;

$P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$  - сили, прикладені від буксирів, поперечна сила гвинта, сила від руля та підрулюючого пристрою з відповідним знаком, + в сторону правого борту, а - в сторону лівого;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$  - кут між діаметральною площиною і напрямком дії сили.

Суму моментів відносно центра ваги  $G$  визначимо по залежностям:

$$\sum_{i=1}^n M = P_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \bar{\ell}_1 + P_2 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \bar{\ell}_2 + \dots + P_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \bar{\ell}_i + \dots + P_n \cdot \sin \alpha_n \cdot \bar{\ell}_n, \quad (8)$$

де  $\bar{\ell}_1, \bar{\ell}_2, \dots, \bar{\ell}_i, \dots, \bar{\ell}_n$  - безрозмірне плече кожної сили,  $\bar{\ell}_i = \ell_i / L_{\perp\perp}$  ;

$L_{\perp\perp}$ - довжина судна між перпендикулярами.

Точку прикладання рівнодіючої поперечної сили визначимо по наступній залежності:

$$\bar{X}_P = \sum_{i=1}^n M / P_{рез}. \quad (9)$$

На основі отриманих залежностей будемо функцію виду  $\bar{X}_{II} = f(\bar{X}_P)$ . Оскільки для побудови цієї функції ми стикаємося із завданням знаходження коренів полінома 4-го порядку, то найдоцільніше табелювати отримані залежності і апроксимувати їх поліномом 3-го порядку. В результаті маємо функцію з достовірністю (рис.2)  $R^2 = 0,999$ :

$$\bar{X}_{II} = \begin{cases} 18,11\bar{X}_P^3 + 27,44\bar{X}_P^2 + 14,05\bar{X}_P + 2,576; & \text{для } -0,5 \leq \bar{X}_P \leq -0,15, \\ 18,11\bar{X}_P^3 - 27,44\bar{X}_P^2 + 14,05\bar{X}_P - 2,576; & \text{для } 0,15 \leq \bar{X}_P \leq 0,5. \end{cases} \quad (10)$$

Як бачимо, тут ми маємо зону  $\bar{X}_P$  від -0,15 до 0,15, де  $\bar{X}_{II} > 1$  з розрахунку ми її виключаємо, в разі потрапляння в цю зону на екрані має з'явитися відповідне повідомлення про попадання в недопустиму зону.

Отримана залежність (9) легко піддається операціям диференціювання та інтегрування. У разі необхідності для зменшення зони невизначеності ця ділянка описується за достовірністю  $R^2 = 0,997$  по залежностям:

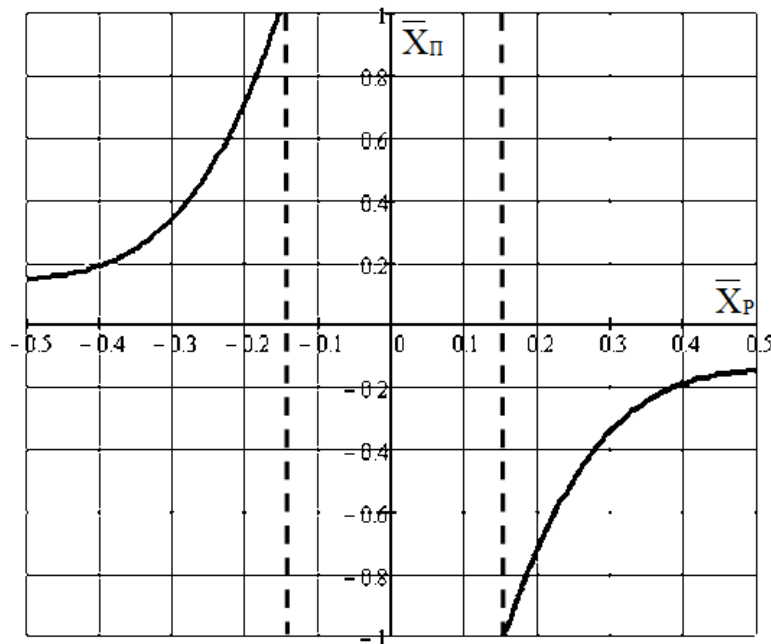


Рис. 2 - Залежність положення ПП від точки прикладання  $P_{рез}$

$$\bar{X}_{II} = \begin{cases} 18,11\bar{X}_P^3 + 27,44\bar{X}_P^2 + 14,05\bar{X}_P + 2,576; & \text{для } -0,5 \leq \bar{X}_P \leq -0,15, \\ -0,149 / (\bar{X}_P + 0,005); & \text{для } -0,15 \leq \bar{X}_P \leq 0, \\ -0,149 / (\bar{X}_P - 0,005); & \text{для } 0 \leq \bar{X}_P < 0,15, \\ 18,11\bar{X}_P^3 - 27,44\bar{X}_P^2 + 14,05\bar{X}_P - 2,576; & \text{для } 0,15 \leq \bar{X}_P \leq 0,5. \end{cases} \quad (11)$$

Блок - схема алгоритму розрахунку і індикації положення ПП наведена на рис.3. Процес обертання судна складний через різноманіття діючих на його корпус сил і складного закону їх зміни, оскільки поперечна складова рівнодіючої гідродинамічних сил на корпусі змінюється, що надає значний вплив на обертання судна, залежить від кута натікання потоку на корпус судна, інакше кажучи, кута дрейфу, який у свою чергу змінюється під дією виникаючих при криволінійному русі судна гідродинамічних сил, то рух судна при повороті є несталим. Такий вид руху має місце при перекладці руля на певний кут на судні яке рухається в процесі маневреного та еволюційного періоду циркуляції. Коли ж кут дрейфу перестає рости і настає рівновага діючих на судно сил і моментів, елементи руху судна набувають сталого характеру, і настає період сталої циркуляції. Для прогнозування положення судна при русі з перекладеним кермом використовують геометричні характеристики циркуляції - зсув, пряме зміщення, зворотне зміщення, тактичний діаметр та діаметр сталої циркуляції.

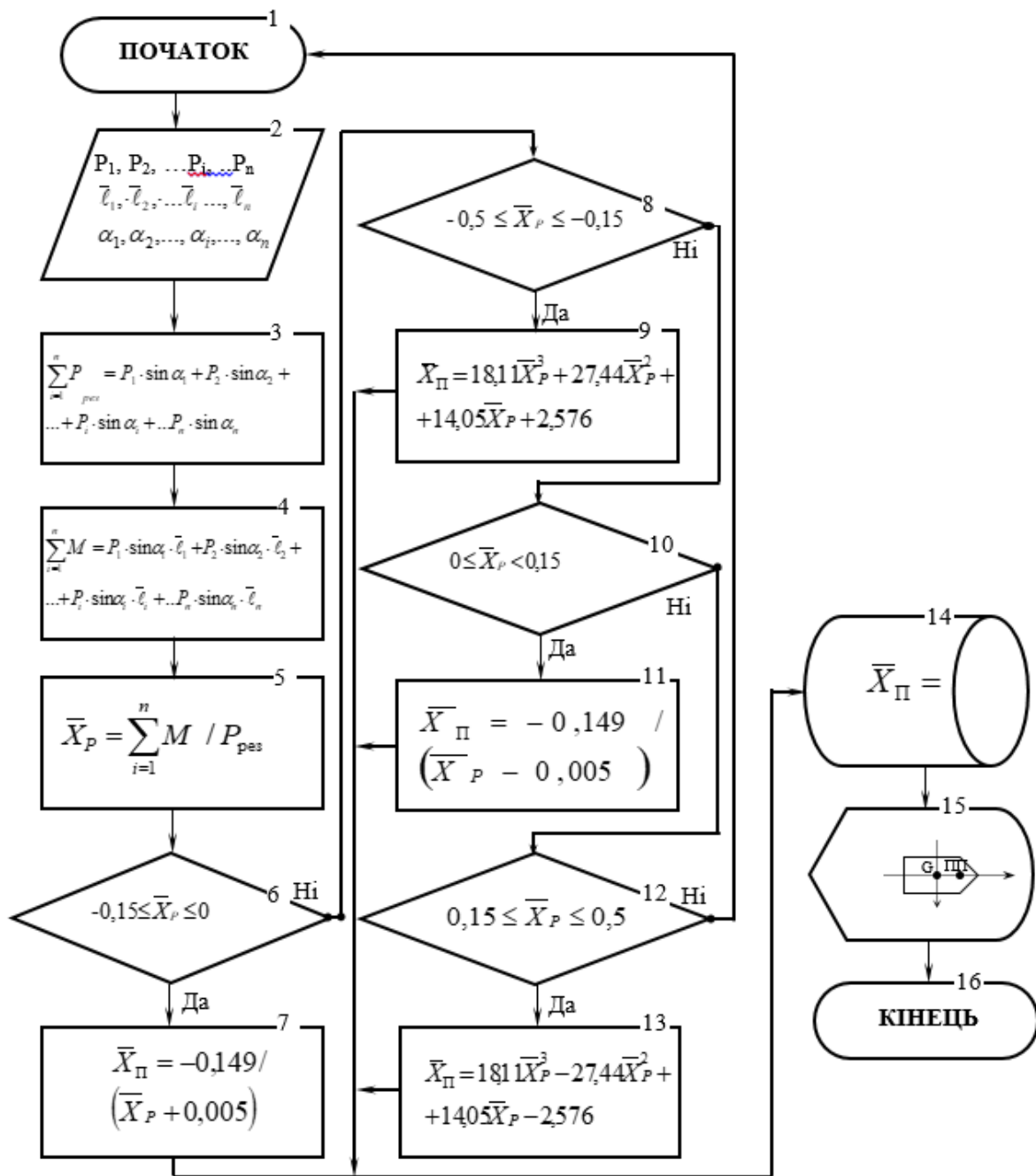


Рис. 3 - Блок – схема розрахунку  $\bar{X}_\Pi$  по значенню  $P_{рез}$ .

Однак характеристики циркуляції не дозволяють використовувати такий метод при оцінці положення судна щодо інших і причальних споруд.

Завдання значно ускладнюються при використанні буксирів, коли появляються додаткові сили і моменти.

Недоліком такої існуючої системи є те, що визначення положення ПП і точки прикладання сили проводиться за неповними даними, оскільки вони є тільки для кожної сили окремо, що не дає можливості оцінити становище для рівнодіючої поперечної сили при швартуванні, готувати план маневрування, дає значну затримку у прийнятті необхідних рішень щодо організації управління судном.

Недоліком розглянутого способу визначення абсциси ПП по рівнодіючій поперечних сил являється необхідність вводити значення точки прикладання і величини та напрямку дії зовнішніх сил в процесі маневрування та потреба виконувати розрахунки оперативно, що потребує часу і затримує момент прийняття рішення.

Такий недолік відсутній у способі визначення абсциси ПП по тангенціальним швидкостям [4-7], який був запропонований автором, залежності для якого отримуємо із рис.4, з урахуванням відсутності течії.

Задача визначення абсциси ПП заключається в знаходженні точки перетинання прямої MN з прямою АВ. При цьому початок вісі знаходиться в центрі ваги G, позитивний напрям вісі X спрямовано в сторону носа, а вісі Y в сторону правого борту. Величину тангенціальної швидкості носа позначимо  $\pm V_n$ , а корми  $\pm V_k$ . Абсциса носової кінцівки А буде дорівнювати  $X_A = +L_{\perp} / 2$ , а кормової В буде дорівнювати  $X_B = -L_{\perp} / 2$ , де  $L_{\perp}$  довжина судна між перпендикулярами.

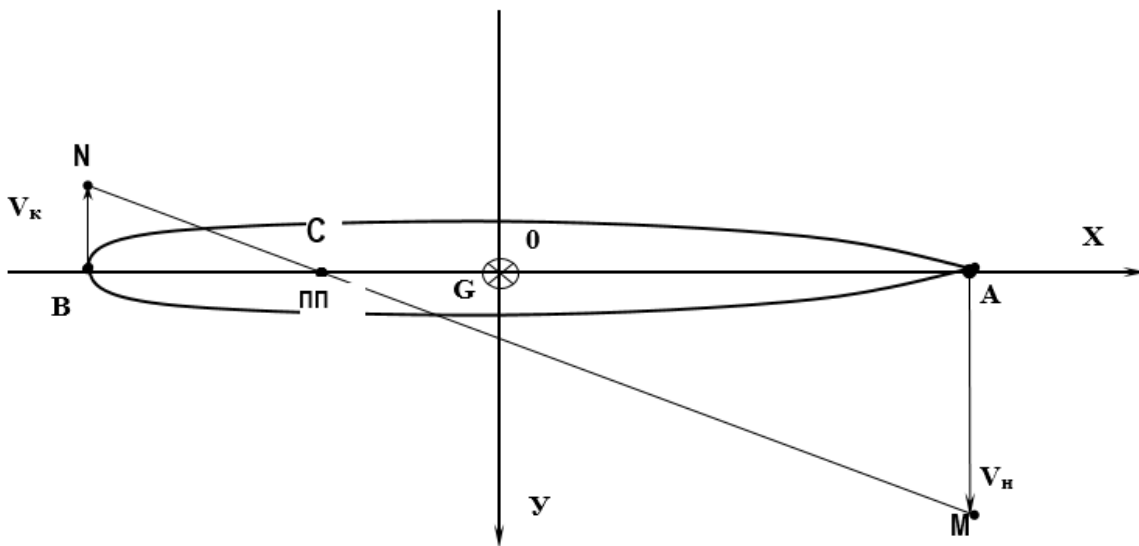


Рис. 4 – Розрахункова схема визначення ПП по тангенціальним швидкостям

Складемо рівняння прямої, яка проходить через дві точки  $M (+L_{\perp}/2, V_n)$  і  $N (-L_{\perp}/2, V_k)$ :

$$\frac{x - X_A}{X_B - X_A} = \frac{y - V_n}{V_k - V_n}. \quad (12)$$

Для визначення абсциси ПП, який буде знаходитися на вісі X в межах судна або за його межами, розв'яжемо рівняння (12) відносно  $X_n$ . Точку перетинання прямої MN з віссю OX визначимо із рівняння (12), прийнявши значення  $y=0$ , тоді отримуємо:

$$X_n = \frac{-V_n}{V_k - V_n} (X_B - X_A) + X_A, \quad (13)$$

де  $X_{II}$  -абсциса ПП з відповідним знаком + в сторону носа і – в сторону корми відносно центру ваги G.

Для перевірки правильності отриманої формалізованої моделі виконаємо графічну перевірку ситуації, зображеної на рис.4, для наступних даних:

$$L_{\perp\perp} = 150 \text{ м}; V_{\text{н}} = 3.0 \text{ м/с}; V_{\text{к}} = -1.0 \text{ м/с} .$$

Після розрахунків по формулі (12) отримаємо:

$$X_{\text{н}} = \frac{-V_{\text{н}}}{V_{\text{к}} - V_{\text{н}}}(X_{\text{В}} - X_{\text{А}}) + X_{\text{А}} = \frac{-3.0}{-1.0 - 3.0}(-75.0 - 75.0) + 75.0 = -37.5 \text{ м}.$$

Таким чином графічна побудова і аналітичні розрахунки співпадають, що свідчить про коректність формалізованої моделі.

При управлінні маневруванням виникає потреба визначити точку прикладання результуючої сили, яка визиває криволінійний рух.

Координати точки прикладання  $\bar{X}_{II}$  рівнодіючої поперечних  $P_{\text{рез}}$  сил  $\bar{X}_P$  розрахуємо по формулам (9) і (10).

Для визначення тангенціальних швидкостей носа і корми судна потрібно враховувати дрейф судна і течію. Оскільки значення дрейфу лагом показується для центру ваги судна, тому на визначення тангенціальних швидкостей він не впливає. Вектор течії впливає, тому його необхідно враховувати. Для отримання складових вектору зсуву течією розглянемо розташування лінії діаметральної площини відносно води і ґрунту, як показано на рис. 5.

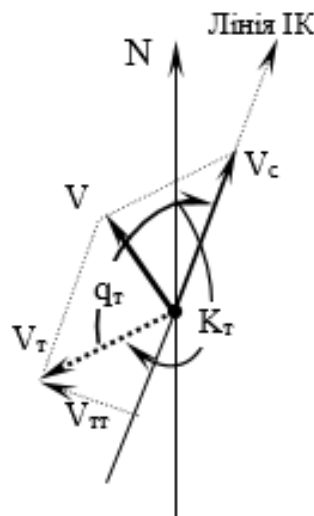


Рис.5 – Складові зсуву течією

При цьому будемо розглядати наступні складові руху:

$V_{\text{н}}$  - тангенціальна швидкість носа відносно ґрунту, вузл.;  $V_{\text{к}}$  - тангенціальна швидкість корми відносно ґрунту, вузл.;  $V_{\text{т}}$  - швидкість течії, вузл.;  $V_{\text{тт}}$  - тангенціальна складова швидкості течії, вузл.;  $V_{\text{но}}$  - тангенціальна швидкість носа відносно води, вузл.;  $V_{\text{ко}}$  - тангенціальна швидкість корми відносно води, вузл.;  $V_{\text{с}}$  - швидкість ходу ЦВ судна відносно ґрунту, вузл.;  $q_{\text{т}}$  – курсовий кут течії;  $K_{\text{т}}^0$  напрям течії.

Для перевірки отриманих результатів були виконані натурні випробування під керівництвом капітана Товстокорого О.М. [6], як приклад розглянемо таблицю даних для експерименту 1, приведено в табл.1.

Для врахування течії використаємо схему руху судна для експерименту 11/7, дані про які приведені на рис.6.

Варіант 1. Судно має курс  $267^\circ$ , бічну швидкість носової частини  $V_{\text{н}} = 0,66$  вузла, бічну



швидкість корми  $V_k=0,48$  вузла, течія напрямком  $243^\circ$  швидкістю  $V_T = 0,5$  вузла.

Таблиця 1. Параметри руху для експерименту 1

Курс с.	352,6	353,7	356,3	0,6	4,4	12,2	18,2	24,9	33,6	46,7
$V_H$ , уз.	-1,01	-0,95	-0,79	-0,58	-0,42	-0,21	-0,03	0,11	0,26	0,41
$V_K$ , уз.	-0,97	-1,1	-1,29	-1,53	-1,63	-1,76	-1,81	-1,82	-1,84	-1,84
$V_C$ , уз.	0,35	0,35	0,35	0,34	0,32	0,27	0,2	0,13	0,05	-0,05
$V_T$ , уз.	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$K_T^0$	247	247	247	247	247	247	247	247	246	246

З точок Н і К, розташованих на носових і кормових перпендикулярах відповідно, відкладаємо значення бічних швидкостей носа і корми. Вважаємо, що датчики Допплера розташовані на носовому і кормовому перпендикулярах. Поєднавши точки закінчення векторів  $V_H$  і  $V_K$  відрізком прямої, в точці  $ПП_T$  перетину даного відрізка з ДП отримаємо положення полюса повороту з урахуванням течії.

Також в точці Н відкладаємо вектор швидкості течії, яку розкладаємо на поздовжню  $V_{ТПР}$  і поперечну тангенціальну  $V_{ТТ}$  складові. Поздовжня складова швидкості течії  $V_{ТПР}$  нас в даному випадку не цікавить, так як вона не впливає на бічні швидкості носа і корми.

З цієї ж причини ми можемо не враховувати і поздовжню швидкість судна, яка може впливати на визначення поздовжньої швидкості течії, але ніяк не поперечної. Поперечна ж складова швидкості течії  $V_{ТТ}$  нас цікавить, оскільки впливає на бічні швидкості носа і корми щодо води, а відповідно, і на становище  $ПП$ .

Для розрахунку тангенціальних швидкостей судна відносно води визначимо курсовий кут течії  $q_T$  за формулою:

$$q_T = K_T - IK . \quad (14)$$

Тангенціальна складова течії дорівнює:

$$V_{ТТ} = V_T \cdot \sin q_T . \quad (15)$$

Виконуючи геометричне складання векторів тангенціальних швидкостей носа і корми, з урахуванням їх знаків і вектору течії отримаємо:

$$\vec{V}_{НО} = \vec{V}_H - \vec{V}_{ТТ} . \quad (16)$$

$$\vec{V}_{КО} = \vec{V}_K - \vec{V}_{ТТ} . \quad (17)$$

З'єднуємо отримані вектори  $V_{НО}$  і  $V_{КО}$  відрізком прямої. У точці перетину цього відрізка з діаметральною площиною отримаємо положення полюса повороту без урахування течії.

Таким чином, після врахування швидкості течії залишається 2 варіанти: коли швидкості носа і корми спрямовані в різні боки і коли вони спрямовані в одну сторону. Тоді формула для розрахунку абсциси полюса повороту по швидкостям носа і корми з урахуванням течії  $X_{ПТ}$  прийме вигляд:

$$X_{ПТ} = \frac{-V_H}{V_K - V_H} (X_B - X_A) + X_A , \quad (18)$$

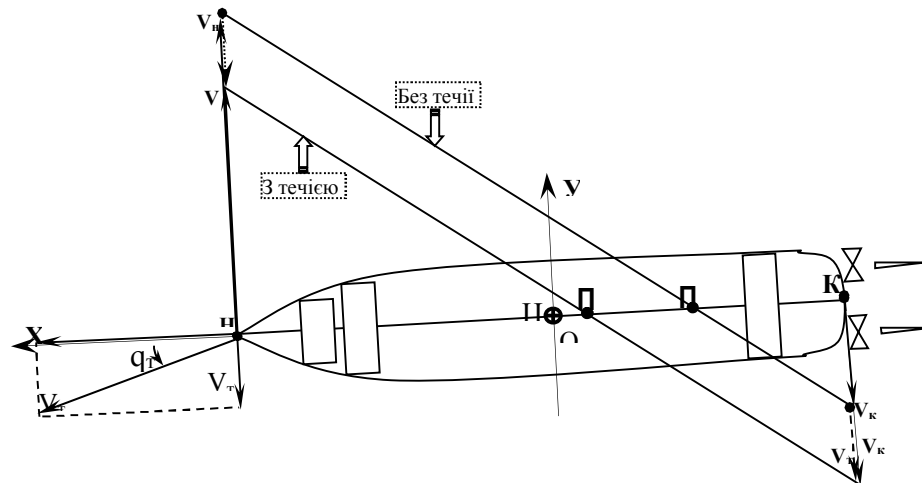


Рис.6 – Схема знаходження положення ЦГ при наявності течії.

де  $X_{\text{пт}}$  - абсциса ЦГ з відповідним знаком + в сторону носа і мінус в сторону корми відносно центру ваги;  $V_{\text{н}}$  - тангенціальна швидкість точки діаметральної площини на носовому перпендикулярі (м/с);  $V_{\text{к}}$  - тангенціальна швидкість точки діаметральної площини на кормовому перпендикулярі (м/с);  $X_{\text{в}} = -0,5 \cdot L_{\perp}$  - координата точки діаметральної площини на кормовому перпендикулярі (м);  $X_{\text{а}} = 0,5 \cdot L_{\perp}$  - координата точки діаметральної площини на носовому перпендикулярі (м);  $L_{\perp}$  - довжина між перпендикулярами (м).

Для розрахунку абсциси ЦГ по тангенціальним швидкостям носа  $V_{\text{но}}$  і корми  $V_{\text{ко}}$  без врахування течії  $X_{\text{п}}$  відносно води, розрахуємо за формулою:

$$X_{\text{п}} = \frac{-V_{\text{но}}}{V_{\text{ко}} - V_{\text{но}}} (X_{\text{в}} - X_{\text{а}}) + X_{\text{а}}. \quad (19)$$

Розрахувавши абсцису ЦГ, ми можемо визначити і абсцису точки прикладання рівнодіючої бічних сил  $\bar{X}_{\text{р}}$  при відносних координатах ЦГ  $\bar{X}_{\text{п}} = (X_{\text{п}} / L_{\perp}) < 0,5$  за формулою (9), а при відносних координатах ЦГ  $\bar{X}_{\text{п}} = (X_{\text{п}} / L_{\perp}) > 0,5$  за формулою (10).

Розглянутий вище спосіб визначення положення ЦГ володіє тією перевагою, що для розрахунку абсциси немає необхідності вводити дані про плечі, напрям і точки прикладання бічних сил.

Спосіб і блок – схема пристрою для інформаційного забезпечення процесу управління судном під час маневрування шляхом визначення положення ЦГ на діаметральній площині (ДП), навколо якого відбувається обертання, за значенням тангенціальних швидкостей точок на носовому і кормовому перпендикулярах ДП, і розрахунок положення ЦГ по їх значенням для прийняття рішення з маневрування, наведено в роботі [6].

На підставі приведених вище даних пропонується розробити навігаційний пристрій, який буде постійно визначати ширину маневреного зсуву, як на прямолінійних ділянках так і при криволінійному русі. При цьому буде автоматично переключатися режим роботи по значенню кутової швидкості. При русі на постійному курсі судно ризикає з допустимою кутовою швидкістю  $\omega_{\text{рис}}$ , яка відома судноводію. При криволінійному русі ширину полоси буде визначати абсциса ЦГ, яка автоматично визначається по даним доплерівського лагу.

Представимо судно у вигляді прямокутника з шириною  $B_{\text{с}}$  і довжиною між перпендикулярами  $L$  з характерними точками: центр ваги  $G$ ; центр управління  $\text{ЦУ}$  - точка на судні в якій перебуває особа, яка проводить окомірне визначення положення судна; крайні характерні точки ватерлінії по носу  $H_{\text{л}}$  і  $H_{\text{п}}$  та кормі  $K_{\text{л}}$  і  $K_{\text{п}}$ .

Під шириною смуги, займаної судном при маневруванні  $B_{\text{л}}$ , будемо мати на увазі [6]

величину проєкцій крайніх точок характерного лінійного розміру  $L_x = \sqrt{L^2 + B_c^2}$  на лінію, перпендикулярну вектору переміщення судна:

$$B_{\Pi} = L_x \cdot \sin \left( C + \arctg \left( \frac{B_c}{L} \right) \right), \quad (20)$$

де  $C$  – сумарний кут зсуву.

Ширину маневренного зсуву  $Y_M$  визначають по формулі:

$$Y_M = 2 Y_o + B_{\Pi}, \quad (21)$$

де  $Y_o$  – бічний зсув ЦВ від лінії планового шляху за рахунок рискання. Його можна визначити по формулі:

$$Y_o = V t_3 \sin \varphi(t), \quad (22)$$

де  $t_3$  – час запізнення в обробці інформації в системі управління;

$\varphi(t)$  – кут рискання;  $V$  – швидкість судна по лагу.

Вірогідну ширину смуги маневреного зсуву визначають шляхом лінійного складання  $Y_M$  і середньоквадратичної похибки визначення місця судна  $M_o$ :

$$Y_{MB} = 2 (Y_M + M_o) + B_{\Pi}. \quad (23)$$

Необхідною і достатньою умовою безпечного проходження одиночного судна через небезпечний район обмежених вод є виконання вимоги, щоб допустима ширина безпечної смуги руху  $Y_{MD}$ , що знімається з карти, була більше ймовірної ширини смуги  $Y_{MB}$  тобто  $Y_{MD} > Y_{MB}$ . З цієї нерівності можна визначити вимоги до необхідної точності визначення місця  $M_{од}$  для забезпечення безаварійного проходу району обмежених вод, з урахуванням максимального значення кута зсуву  $C = 90^\circ - \arctg(B/L)$ , коли ширина смуги, займаної судном, максимальна і дорівнює  $L_x$ :

$$M_{од} < 0,5 Y_{MB} - Y_o - 0,5 L_x. \quad (24)$$

Для отримання залежностей, які описують ширину маневреного зсуву при криволінійному русі, розглянемо схему повороту судна, яка зображена на рис.4.2. На схемі приведено випадок розташування ПП в межах корпусу судна при передньому ході. Випадок розташування ПП за межами корпусу розглядати не будемо, оскільки він відповідає використанню якоря, буксирів і швартовних кінців і не представляє інтересу для руху в каналах і фарватерах, коли судно управляється рулем.

Не дивлячись на це можливо розрахувати ширину маневреного зсуву для любых способів виконання морських операцій, коли акваторія для маневрування значно обмежена.

Як витікає із схеми на рис.7, ширина полоси маневреного зсуву  $Y_M$  дорівнює різниці радіусів кривизни траєкторій  $R_K$  точок корми  $K$  і носа  $R_H$ .

$$Y_M = R_K - R_H. \quad (25)$$

Величини цих радіусів знайдемо наступним чином. Радіус кривизни траєкторії ПП  $R_{ПП}$  визначимо із

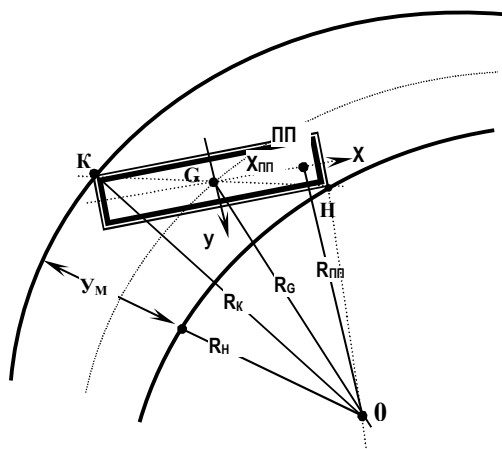


Рис. 7 – Схема криволінійного руху при повороті судна

прямокутного трикутника  $GPO$  за формулою:

$$R_{III} = \sqrt{R_G^2 - X_{III}^2}, \quad (26)$$

де  $R_G$  - радіус кривизни ЦВ, відомий із суднових документів.

Радіус кривизни траєкторії зовнішньої кормової точки  $R_K$  визначимо із трикутника із сторонами  $R_{III} + (B_c / 2)$ ,  $(L / 2) + X_{III}$  за формулою:

$$R_K = \sqrt{\left(X_{III} + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(R_{III} + \frac{B_c}{2}\right)^2}, \quad (27)$$

де  $X_{III}$  - абсциса ПП,  $L$  - довжина судна між перпендикулярами,  $B_c$  - його ширина.

Для визначення радіусу  $R_H$  носової внутрішньої точки  $H$  розглянемо трикутник  $HGO$ . Позначимо кут  $PGO$  через  $\alpha$ , кут  $PGH$  через  $\beta$  а кут  $HGO$  через  $\gamma$ . Тоді для трикутника  $HGO$  (рис.7.) за формулою косинусів отримаємо:

$$R_H = \sqrt{R_G^2 + (L_x / 2)^2 - R_G \cdot L_x \cdot \cos \gamma}, \quad (28)$$

де  $L_x$  - характерний лінійний розмір  $HK$ , який дорівнює  $L_x = \sqrt{L^2 + B_c^2}$ .

Значення кута  $\alpha$  розраховуємо за формулою:

$$\alpha = \arcsin(R_{III} / R_G). \quad (29)$$

Значення кута  $\beta$  розраховуємо за формулою:

$$\beta = \arcsin((B_c / 2) / (L_x / 2)) \quad (30)$$

Тоді значення кута  $\gamma$  розраховуємо за формулою:

$$\gamma = \alpha - \beta \quad (31)$$

Враховуючи радіальну СКП визначення місця  $M_0$  отримаємо формулу для визначення вірогідної ширини маневреного зсуву при повороті судна  $Y_{MBK}$ :

$$Y_{MBK} = R_K - R_H + 2M_0 = \sqrt{\left(X_{III} + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(R_{III} + \frac{B_c}{2}\right)^2} - \sqrt{R_G^2 + (L_x / 2)^2 - R_G \cdot L_x \cdot \cos \gamma} + 2M_0 \quad (32)$$

Отримана формалізована модель (32) визначення вірогідної ширини маневреного зсуву при повороті судна  $Y_{MB}$  дозволила установити її залежність від абсциси ПП і радіуса циркуляції при назначеному куті перекладки руля, рис.8.

При управлінні судном на постійному курсі ризикання має невелике значення кутової швидкості  $\omega$ . При зменшенні швидкості руху чи рості зовнішніх впливів кут ризикання збільшується до значення допустимої кутової швидкості  $\omega_{риск}$ , значення якої може регулювати судноводій.

При виконанні поворотів кутова швидкість значно збільшується і перевищує  $\omega_{риск}$ . Тому система працює в двох режимах: визначення ширини маневреного зсуву при прямолінійному русі в постійному режимі; автоматичне переключення на визначення ширини зсуву при криволінійному русі і перехід на постійний режим після закінчення повороту.

Таким чином постійне визначення ширини маневреного зсуву вимагає введення даних про кутову швидкість  $\omega$ , граничне значення кутової швидкості  $\omega_{риск}$  по умовам плавання і точність визначення  $M_0$ , введення і розрахунок яких вимагає затрат часу. Крім того, розрахунок ширини маневреного зсуву по формулі 23, не враховує кута перекладки руля,

тому не являється досить точним. По цій причині потрібно використовувати більш досконалі і оперативні способи визначення маневреного зсуву, які дозволяють постійно показувати вірогідну ширину маневреного зсуву, без необхідності вводити будь які дані [7-10].

**Аналіз отриманих результатів дослідження**

Запропонований спосіб дозволяє говорити про створення передумов для гарантованої навігаційної безпеки, за рахунок детермінації алгоритмів операторської діяльності, узгодженості психофізіологічних характеристик оператора і факторів руху та якісного планування траєкторії переміщення при провідці суден.

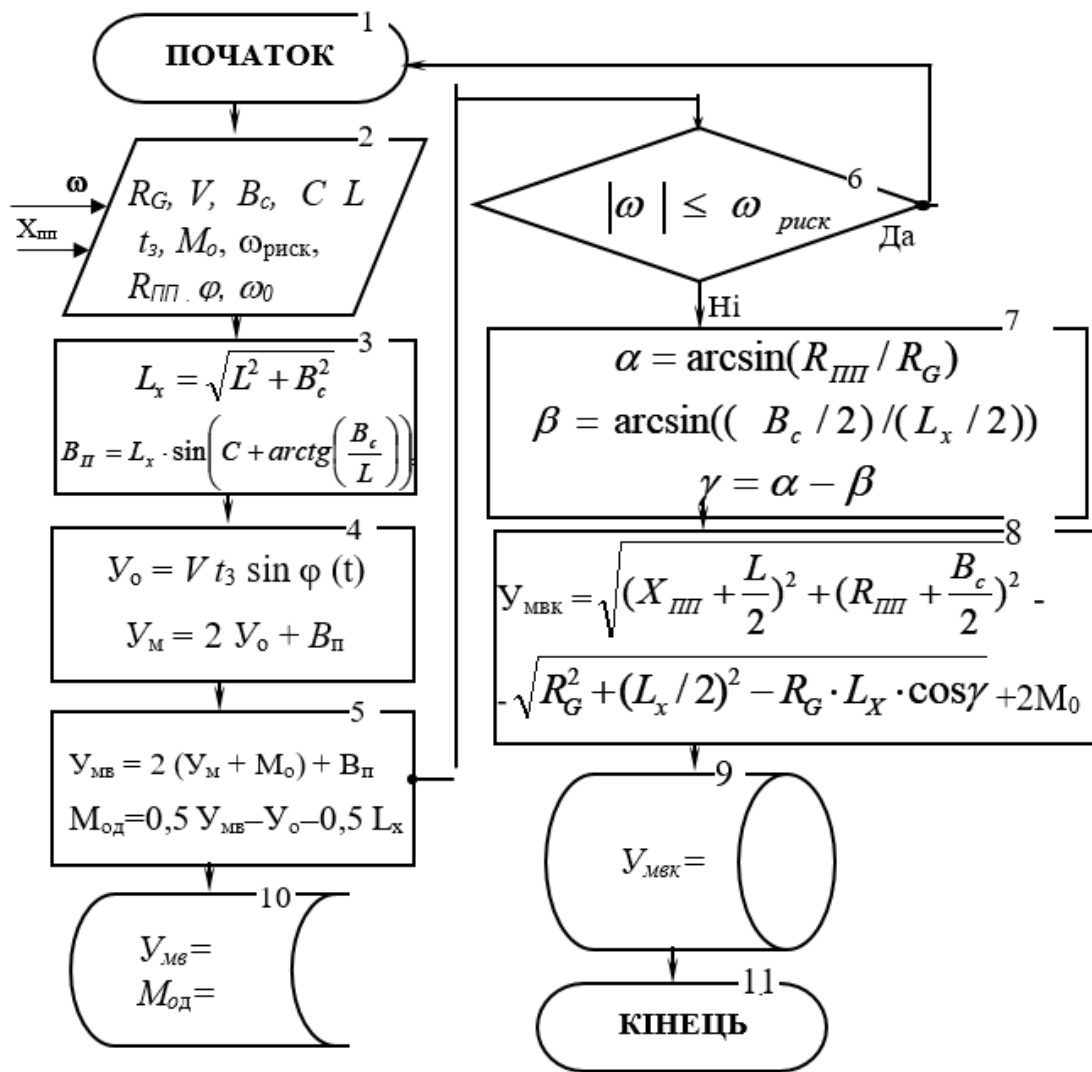


Рис. 8 – Блок – схема системи контролю і реєстрації вірогідної ширини полоси маневреного зсуву

Реалізація та впровадження в практику штурманської роботи пристрою, який реалізує даний спосіб, дозволить говорити про появу засобу підтримки прийняття рішення, а його функціональні можливості знаходяться на сучасному рівні стану світової судноводійської науки. Створюваний пристрій може бути виконано на базі малогабаритного персонального комп'ютера.

Розглянуті ідеї і принципи побудови пристрою можуть бути впроваджені на судах для вироблення рекомендацій з маневрування в обмежених умовах. Запропонований пристрій може бути використано при тренажерній підготовці в процесі навчання капітанів, лоцманів і на старших курсах морських навчальних закладів України.

### Висновки та перспективи подальшої роботи по даному напрямку

Аналіз існуючих способів розрахунку ширини полоси маневреного зсуву і розробка на його підставі [6-10] розрахункових схем і алгоритмів дозволив побудувати систему неперервної інформації про його значення. Однак постійне визначення ширини маневреного зсуву вимагає введення даних про кутову швидкість  $\omega$ , граничне значення кутової швидкості  $\omega_{\text{риск}}$  по умовам плавання і точність визначення місця  $M_0$ , введення і розрахунок яких не вимагає значних затрат часу.

Крім того, розрахунок ширини маневреного зсуву для криволінійного руху по емпіричній формулі не враховує кута перекладки руля, тому не являється досить точним.

По цій причині були використовувані більш досконалі і оперативні способи визначення маневреного зсуву по величині абсциси ПП. Вони дозволяють постійно показувати вірогідну ширину маневреного зсуву, без необхідності вводити будь які дані [6], використовуючи інформацію доплерівського лага.

Виконаний графічний аналіз показав, що величину абсциси ПП визначає ширину маневреного зміщення, тому її значення може бути використано для оцінки параметрів маневрування. Обмеження максимального значення абсциси ПП на циркуляції фактично дозволить визначити значення ширини смуги руху судна в залежності від його головних розмірів, які визначаються «характерним лінійним розміром»  $L_X$ .

Крім цього важливо відзначити таку особливість параметра  $X_{\text{ПП}}$ : при повороті судна абсциса полюса повороту досягає значення, відповідного сталій циркуляції даної кривизни, ще на початку еволюційного періоду, що дає можливість приймати в розрахунках геометричних параметрів повороту судна значення  $X_{\text{ПП}}$  для сталої циркуляції даного радіуса. Це значно підвищує оперативність такої інформації.

Використання абсциси ПП в якості пріоритетної величини має такі переваги:

- задає розміри акваторії для маневрування по відомому судноводію радіусу кривизни траєкторії ЦВ і визначеної величини абсциси ПП на сталій циркуляції;
- абсциса ПП для сталої циркуляції може бути з достатньою точністю визначена ще на стадії проектування судна, так як вона залежить лише від гідродинамічних характеристик корпусу і практично не залежить від типу встановленого на судні ДРК.

Для підвищення інформаційного забезпечення процесу маневрування, і особливо на криволінійних траєкторіях, рекомендується постійне використання розробленої системи контролю і реєстрації для автоматичного визначення ширини маневреного зсуву і своєчасного реагування на відхилення від планового шляху.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Снопков В.И. Управление судном. /В.И. Снопков// – Санкт-Петербург: АНО НПО «Профессионал», 2004. -536 с.
2. Голиков В.В. Алгоритм определения положения полюса поворота морского судна/В.В. Голиков, С.Э. Мальцев. Научный журнал. -Херсон.: ХГМА, 2013. №1(8). С. 21 – 27.
3. Мальцев С.Е. Алгоритм определения положения полюса поворота при маневрировании. «Суднопластво: перевезення, технічні засоби, безпека»: Матеріали науково-методичної конференції - (Одеса, 14-15 листопада 2012 року). – Одеса: ОНМА. ВидавІнформ, 2013. – С.106 – 110.
4. Мальцев С.Э. Устройство оценки полюса поворота по тангенциальным скоростям конечностей/ С.Э. Мальцев., В.В. Голиков. «Морські перевезення та інформаційні технології в суднопластві»: Матеріали науково-методичної конференції - (Одеса, 18-19 листопада 2014 року). – Одеса: ОНМА. ВидавІнформ, 2014. – С.172 – 176.
5. Товстокорый О.Н. Определение положения полюса поворота с помощью доплеровского лага//О.Н. Товстокорый, С.Э. Мальцев / Судовождение: Сб. научн.

- трудоу //НУ «ОМА». Вып.26. Одеса: ИздатИнформ. 2016. – С.183 – 190.
6. Мальцев С.Э. Полюс поворота и его учет при маневрировании морского судна: монография/ С. Э. Мальцев, О. Н. Товстокорый. //–Херсон: ХГМА, 2016. -124 с.
  7. Мальцев С.Е. Когнитивная система оценки положения полюса поворота судна с помощью эффективных алгоритмов. / С.Е. Мальцев //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Natural and Technical Sciences. - 2018. V1 (19), issue 171. –Р.37 – 42.
  8. Мальцев С.Е. Удосконалення інформаційного забезпечення процесу маневрування параметрами стану судна. // «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація», науково – технічна конференція, 14-15 листопада 2019 р. –Одеса: НУ «ОМА» 2019. – С. 129 – 131.
  9. **Патент** 91006 UA. МПК(2014.01) G08G 3/00. Пристрій для інформаційного забезпечення маневрування морського судна. /Голіков В.В., Мальцев С.Е. Заявник Одеська національна морська академія. - № u2013 04429; заявлено 25.04.2013; опубліковано 25.06.2014, Бюл. № 12.
  10. **Патент** 97227 UA. МПК G08G 3/02 (2006.01), B63B 43/02 (2006.01). Пристрій для інформаційного забезпечення процесу управління судном. /Мальцев С.Е., Товстокорий О.М., Бень А. П. Заявник Херсонська державна морська академія. - № u2014 07280; заявлено 27.06.2014; опубліковано 10.03.2015, Бюл. № 5.