

УДК 656.61.052.484

DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.08-15

## DECLINE OF LATERAL DISPLACEMENT OF SHIP AFTER A MANEUVER BY THE INPUT OF ADDITIONAL AMENDMENT OF THE COURSE

### СНИЖЕНИЕ БОКОВОГО СМЕЩЕНИЯ СУДНА ПОСЛЕ МАНЕВРА ВВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОПРАВКИ КУРСА

**M. S. Alekseychuk**, *PhD, professor*, **P. A. Chapchay**, *PhD, professor*,  
**Е.А. Авраменко**, *senior teacher*

**М.С. Алексейчук**, *к.т.н., доцент*, **П.А. Чапчай**, *к.т.н., доцент*,  
**Е.А. Авраменко**, *старший преподаватель*

*National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine*  
*Національний університет «Одеська морська академія», Україна*

#### ABSTRACT

*In work is specified, that navigation safety of sailing to a great extent depends on the errors of the navigation measuring, and also from operating reliability of sensors of navigation information. It is also marked that descriptions of exactness of gyroscopic compass influence on navigation safety. Because sizes of his errors the requirements providing the set exactness of determination of azimuthal directions are produced. At maneuvering of ship there are inertia errors which cause appearance of lateral displacement of ship after his turn, that can lead to the navigation failure of ship. Therefore, there is the problem of decline of lateral relocation bias of ship which appears after his turn, that conduces to the decline of navigation accident rate.*

*The analysis of the last achievements and publications is resulted in work, the decision of the considered problem and selection of parts unsolved before is begun in which.*

*Within the framework of theory endless rapid maneuver, expression for total inertia deviation which depends on character of maneuver and breadth of sailing of ship is resulted in the publication.*

*It is shown that transversal relocation bias of ship is an integral function in relation to the function of deviation and for estimation of its size analytical expression is resulted, which it is visible from, that transversal displacement also depends on speed of ship after a maneuver.*

*It is marked in the publication, that transversal displacement is more complete description of exactness of gyrocompass on the protracted time domains, as it represents the consequences of influencing of maneuvering on a gyrocompass in the «smoothed» kind out. From these positions, obviously, that inertia deviation is the index of instantaneous exactness of gyrocompass.*

*Two methods of decline of transversal displacement of ship are offered, thus for estimation of efficiency of the offered procedure of indemnification of lateral displacement of ship the computer program allowing to produce the calculation of the crooked dependence of total inertia error from time with the subsequent graphic reflection was developed. The program also expects and builds the graphs of dependence of lateral displacement without indemnification, total lateral displacement with partial indemnification and with complete indemnification.*

*The results of computer graphic design are resulted, which it ensues from, that total inertia error and lateral without indemnification is multiplied displacements with growth of breadth, during partial indemnification total lateral displacement diminishes approximately in 5 times, and at the variable additional amendment of course lateral displacement of ship is absent.*

**Keywords:** safety of navigator, ship gyrocompass, inertia deviation, lateral displacement of ship, imitation design.

## РЕФЕРАТ

У роботі показано, що навігаційна безпека судноводіння значною мірою залежить від похибок навігаційних вимірювань, а також від експлуатаційної надійності датчиків навігаційної інформації. Також наголошується, що на навігаційну безпеку впливають характеристики точності вимірювачів курсу. Оскільки як базовий вимірювач курсу використовується гіроскопічний компас, то до величин його похибок пред'являються вимоги, що забезпечують задану точність визначення азимутних напрямів. При маневруванні судна виникають інерційні похибки, які викликають появу бічного зсуву судна після його повороту, що може повести до навігаційної аварії судна. Тому виникає проблема зниження величини бічного зсуву судна, яке з'являється після його повороту, що веде до зниження навігаційної аварійності.

У роботі приведений аналіз останніх досягнень і публікацій, в яких почато рішення розглянутої проблеми і виділення невирішених раніше частин.

В рамках теорії нескінченно швидкого маневру, в публікації приведений вираз для сумарної інерційної девіації, яка залежить від характеру маневру і широти плавання судна.

Показано, що величина поперечного зсуву судна є інтегральною функцією по відношенню до функції девіації і для оцінки її величини приведено аналітичний вираз, з якого видно, що поперечний зсув також залежить від швидкості судна після маневру.

У публікації відмічено, що поперечний зсув є повнішою характеристикою точності гірокомпаса на тривалих інтервалах часу, оскільки відображає наслідки впливу маневрування на гірокомпас в «згладженому» вигляді. З цих позицій, очевидно, що інерційна девіація є показником миттєвої точності гірокомпаса.

Запропоновані два способи зниження поперечного зсуву судна, причому для оцінки ефективності запропонованої процедури компенсації бічного зсуву судна була розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє виробляти розрахунок кривої залежності сумарної інерційної похибки від часу з подальшим графічним відображенням. Програма також розраховує і будує графіки залежності бічного зсуву без компенсації, сумарного бічного зсуву з частковою компенсацією і з повною компенсацією.

Приведені результати комп'ютерного графічного моделювання, з яких виходить, що сумарна інерційна погрішність і бічні зсуви без компенсації збільшуються із зростанням широти, при частковій компенсації сумарний бічний зсув зменшується приблизно в 5 разів, а при змінній додатковій поправці курсу бічний зсув судна відсутній.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, суднові вимірювачі курсу, інерційні девіації, бічний зсув судна, імітаційне моделювання.

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Навигационная безопасность судовождения в значительной мере зависит от погрешностей навигационных измерений, а также от эксплуатационной надежности датчиков навигационной информации.

На навигационную безопасность влияют характеристики точности курсоуказателей. Так как в качестве базового курсоуказателя используется гироскопический компас, то к величинам его погрешностей предъявляются требования, обеспечивающие заданную точность определения азимутальных направлений. При маневрировании судна возникают инерционные погрешности, которые вызывают появление бокового смещения судна после его поворота, что может повести к навигационной аварии судна.

Поэтому разработка способа снижения бокового смещения судна, чему посвящена настоящая статья, является актуальным и перспективным направлением.

### **Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

В работе [1] приведены сведения по классическим и современным курсоуказателям ряда зарубежных фирм, рассмотрены их особенности конструкции и методические погрешности. Освещаются вопросы принципа работы и конструкции оптико-волоконных и спутниковых компасов.

Погрешности технических средств судовождения, возникающие в различных условиях эксплуатации, и их влияние на безопасность мореплавания исследованы в работе [2]. Теория и практика морских навигационных приборов изложена в работе [3], подробно рассмотрены погрешности приборов и методы их компенсации.

Современным морским системам курсоуказания посвящена работа [4], показано, что они могут быть позиционными и аналитическими. Особое внимание уделено принципам работы аналитическим безплатформенным оптико-волоконным и спутниковым компасам. Подробные сведения по конструкции морской навигационной техники зарубежного производства представлены в справочнике [5], а в работе [6] рассмотрены интегрированные системы ходового мостика, которые в своем составе содержат навигационные приборы, использующиеся в качестве датчиков навигационной информации.

### Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является разработка процедуры снижения бокового смещения судна после маневра введением дополнительной поправки курса.

### Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

После маневра судна в показаниях гирокомпаса возникает суммарная инерционная девиация, являющейся функцией времени  $\delta_j = \delta_j(t)$ , которая существует определенное время после завершения маневра, из-за чего судно в течение этого времени будет следовать неправильным курсом. В таких условиях движения у судна неизбежно появится поперечное линейное, иначе говоря, боковое смещение  $d$  по отношению к линии пути, проложенного на карте.

Ограничивая задачу рамками теории быстрого (бесконечно быстрого) маневра, выражение для суммарной инерционной девиации имеет вид [3]:

$$\delta_j = \Delta V_N [Ae^{-mt} Ce^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi)],$$

где  $\Delta V_N$  - приращение северной составляющей скорости судна;

$A, C$  – постоянные интегрирования;

$m$  - коэффициент апериодического члена;

$\omega_d$  - циклическая частота затухающих колебаний;

$\psi$  - начальная фаза.

Величина поперечного смещения  $d$  есть интегральная функция по отношению к функции девиации и имеет следующее аналитическое выражение:

$$d = \Delta V_N V_2 \left\{ \frac{A}{m} (1 - e^{-mt}) - \frac{C}{\omega_d^2 + h^2} [h(e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi) - \sin \psi) + \omega_d (e^{-ht} \cos(\omega_d t + \psi) - \cos \psi)] \right\},$$

где  $V_2$  - скорость судна после маневра.

Поперечное смещение является более полной характеристикой точности гирокомпаса на длительных интервалах времени, поскольку отображает последствия влияния

маневрирования на гирокомпас в «сглаженном» виде. С этих позиций, очевидно, что инерционная девиация представляет собой показатель мгновенной точности гирокомпаса.

Рассмотрим возможность снижения величины бокового смещения введением дополнительной поправки курса. Идея снижения величины бокового смещения судна заключается в том, что величина бокового смещения относительно заданной траектории движения компенсируется боковым смещением с противоположным знаком, вызванным дополнительной поправкой курса. Учитывая, что знак бокового смещения после маневра судна изменяет свою величину и знак, для его компенсации следует дополнительную поправку курса изменить по величине и знаку несколько раз в течение интервала времени, при котором боковое смещение достигает первого и второго максимального значения.

Рассмотрим этот вопрос более подробно, для чего обратимся к рис. 1.

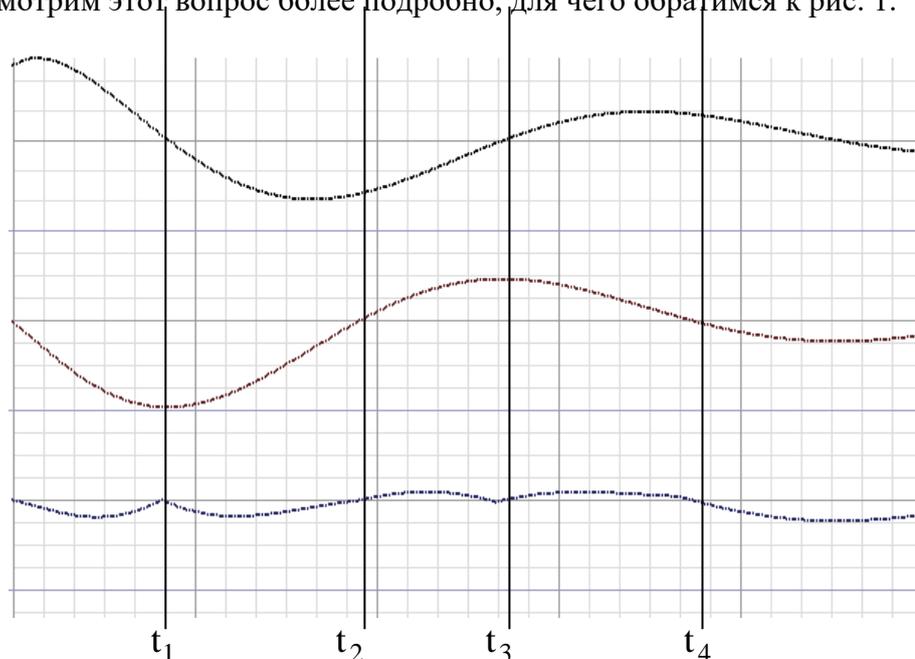


Рис. 1. Снижение бокового смещения судна

На приведенном рисунке изменение инерционной погрешности после окончания маневра показано на верхнем графике. При этом судно, следуя постоянным курсом по гирокомпасу, из-за наличия суммарной инерционной погрешности испытывает боковое смещение, характер которого приведен на среднем графике.

Обращаем внимание на то, что после окончания маневра до момента времени  $t_1$  инерционная погрешность имеет положительное значение, как и боковое смещение от отклонения судна вправо, причем в момент времени  $t_1$  боковое смещение достигает максимального значения  $d_{\max 1}$ . Очевидно, на интервале времени  $[0, t_1]$  для компенсации положительного бокового смещения необходимо выбрать отрицательную дополнительную поправку курса, причем ее величина должна быть такой, чтобы к моменту времени  $t_1$  судно находилось на программной траектории.

Исходя из данного условия, дополнительная поправка  $dK_1$  для компенсации бокового смещения на интервале времени  $[0, t_1]$  рассчитывается из следующего выражения:

$$dK_1 = -57.3 \operatorname{Arctg}\left(\frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c t_1}\right),$$

где  $V_c$  - скорость судна в узлах.

В полученном выражении  $t_1$  выражается в секундах, максимальное боковое смещение  $d_{\max 1}$  - в метрах.

На рис. 1 на нижнем графике показана зависимость результирующего бокового смещения  $d_{\Sigma}$  с учетом компенсации дополнительной поправки  $dK_1$ . С этого графика видно, что к моменту времени  $t_1$  значение  $d_{\Sigma}$  обращается в 0.

После момента времени  $t_1$  суммарная инерционная девиация изменяет знак, поэтому на интервале времени  $[t_1, t_2]$  необходимо изменить величину и знак поправки  $dK_2$  с тем, чтобы к моменту времени  $t_2$  боковое смещение  $d_{\Sigma}$  было равно нулю. Очевидно, значение дополнительной поправки  $dK_2$  следует выбрать с помощью выражения:

$$dK_2 = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c (t_2 - t_1)} \right].$$

Действительно, из рис. 1 следует, что  $d_{\Sigma} = 0$  в момент времени  $t_2$ .

Второе максимальное смещение  $d_{\max 2}$  снижается аналогично введением дополнительных поправок  $dK_3$  и  $dK_4$  на интервалах времени соответственно  $[t_2, t_3]$  и  $[t_3, t_4]$ . Указанные поправки обращают суммарное боковое смещения  $d_{\Sigma}$  в ноль в моменты времени  $t_3$  и  $t_4$ , как показано на рис. 1. Значения дополнительных поправок курса  $dK_3$  и  $dK_4$  рассчитываются с помощью выражений:

$$dK_3 = -57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_3 - t_2)} \right],$$

$$dK_4 = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_4 - t_3)} \right].$$

Текущее значение суммарного бокового смещения  $d_{\Sigma}(t)$  определяется следующей формулой:

$$d_{\Sigma}(t) = V_c \int_0^t \sin[\delta_j(s) + dK_i(s)] ds,$$

в котором суммарная инерционная девиация:

$$\delta_j(t) = (A_1 e^{-mt} + A_2 e^{-nt} \cos qt + A_3 e^{-nt} \sin qt) \Delta V_N,$$

а дополнительная поправка курса  $dK_i(t)$  определяется из выражений:

$$dK_i(t) = -57.3 \operatorname{Arctg} \left( \frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c t_1} \right), \text{ если } t \in [0, t_1];$$

$$dK_i(t) = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 1}}{0.513 V_c (t_2 - t_1)} \right], \text{ если } t \in [t_1, t_2];$$

$$dK_i(t) = -57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_3 - t_2)} \right], \text{ если } t \in [t_2, t_3]; \quad (1)$$

$$dK_i(t) = 57.3 \operatorname{Arctg} \left[ \frac{d_{\max 2}}{0.513 V_c (t_4 - t_3)} \right], \text{ если } t \in [t_3, t_4].$$

После момента времени  $t_4$  дополнительная поправка к курсу не учитывается, т.е.  $dK_i(t) = 0$ .

Для реализации предложенной процедуры снижения бокового смещения судна после маневра необходимо с помощью компьютера построить кривую зависимости бокового смещения от времени после окончания маневра. Затем с кривой снять значения первого  $d_{\max 1}$  и второго  $d_{\max 2}$  максимального смещения, а также моменты времени  $t_1$ ,  $t_3$  максимального значения бокового смещения и моменты времени  $t_2$ ,  $t_4$  обращения бокового смещения в ноль. С помощью полученных данных по формуле (1) рассчитываются дополнительные поправки курса судна  $dK_i(t)$  ( $i = 1..4$ ), с помощью которых производится компенсация бокового смещения судна после маневра.

Сравнивая на рис. 1 графики бокового смещения от суммарной инерционной погрешности (средний график) и суммарного бокового смещения, компенсированного дополнительной поправкой (нижний график), отмечаем, что суммарное боковое смещение уменьшается в несколько раз, чем подтверждается эффективность предлагаемой процедуры повышения точности судовождения.

Отметим, что если дополнительную поправку курса изменять по такому же закону, как и суммарная инерционная погрешность, но с противоположным знаком, т. е.  $dK(t) = -\delta_j(t)$ , то текущее значение бокового отклонения будет равно нулю.

Для оценки эффективности предлагаемой процедуры компенсации бокового смещения судна была разработана компьютерная программа, позволяющая производить расчет кривой зависимости суммарной инерционной погрешности от времени  $\delta_j(t)$  с последующим графическим отображением. Программа также рассчитывает и строит графики зависимости бокового смещения без компенсации  $d(t)$ , суммарного бокового смещения с частичной компенсацией  $d_{\Sigma}(t)$  и с полной компенсацией  $d_o(t)$ . Для каждой из широт  $0^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $80^\circ$  были рассчитаны кривые  $\delta_j(t)$ ,  $d(t)$ ,  $d_{\Sigma}(t)$ ,  $d_o(t)$ , которые представлены соответственно на рис. 2...4.

На каждом из рисунков кривая  $\delta_j(t)$  представлена на первом (верхнем) графике, кривая  $d(t)$  показана на втором графике, на третьем графике отображена кривая  $d_{\Sigma}(t)$ , а на четвертом графике представлена зависимость  $d_o(t)$ .

Из вышеприведенных результатов компьютерного графического моделирования можно сделать следующие выводы:

1). Анализируя графики суммарной инерционной погрешности  $\delta_j(t)$  и бокового смещения без компенсации  $d(t)$ , обращаем внимание на то, что максимальные значения девиаций и боковых смещений без компенсации увеличиваются с ростом широты, так при широте  $0^\circ$  максимальное значение инерционной погрешности  $\delta_{j\max} = 1^\circ$ , а бокового смещения без компенсации  $d_{\max} = 75$  м. При широте равной  $80^\circ$  упомянутые величины принимают значения  $\delta_{j\max} = 6^\circ$  и  $d_{\max} = 1980$  м.

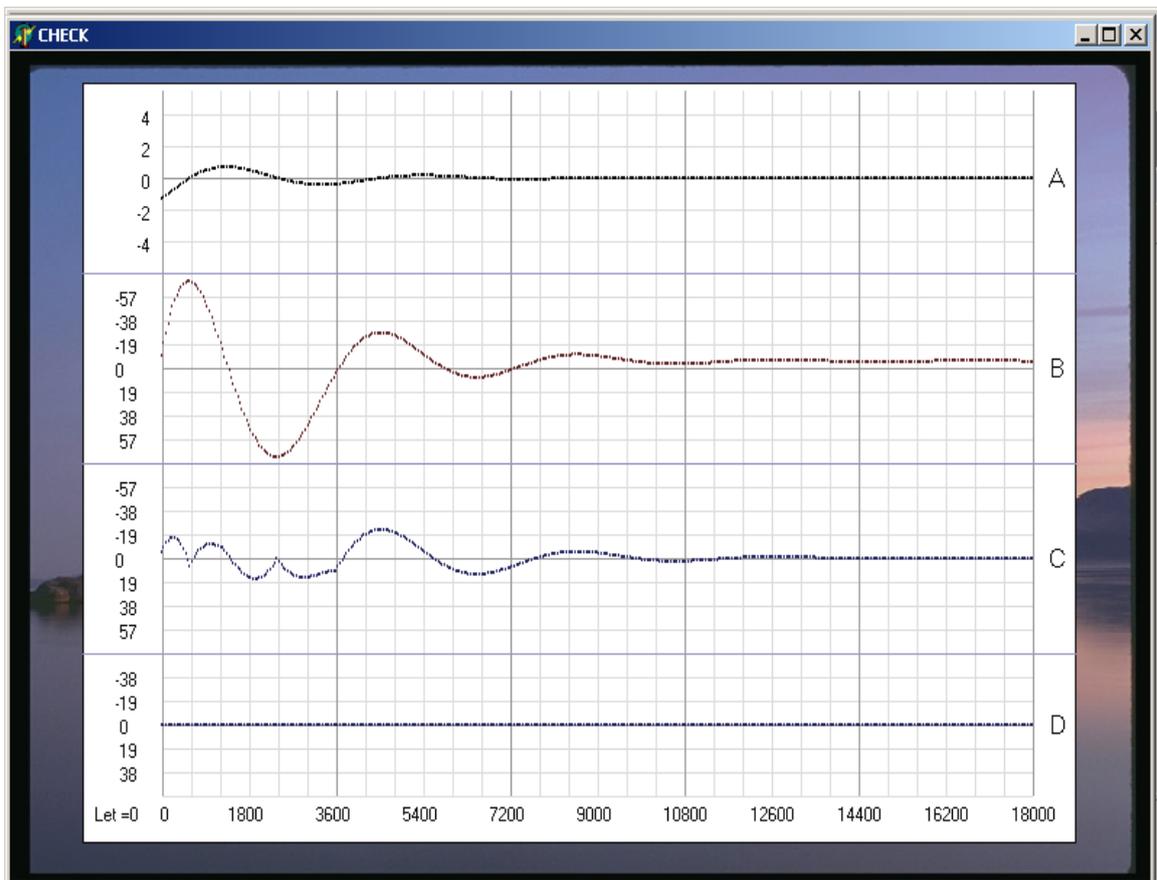


Рис. 2. Графики зниження бокового смещення судна для широти 0°



Рис. 3. Графики зниження бокового смещення судна для широти 40°

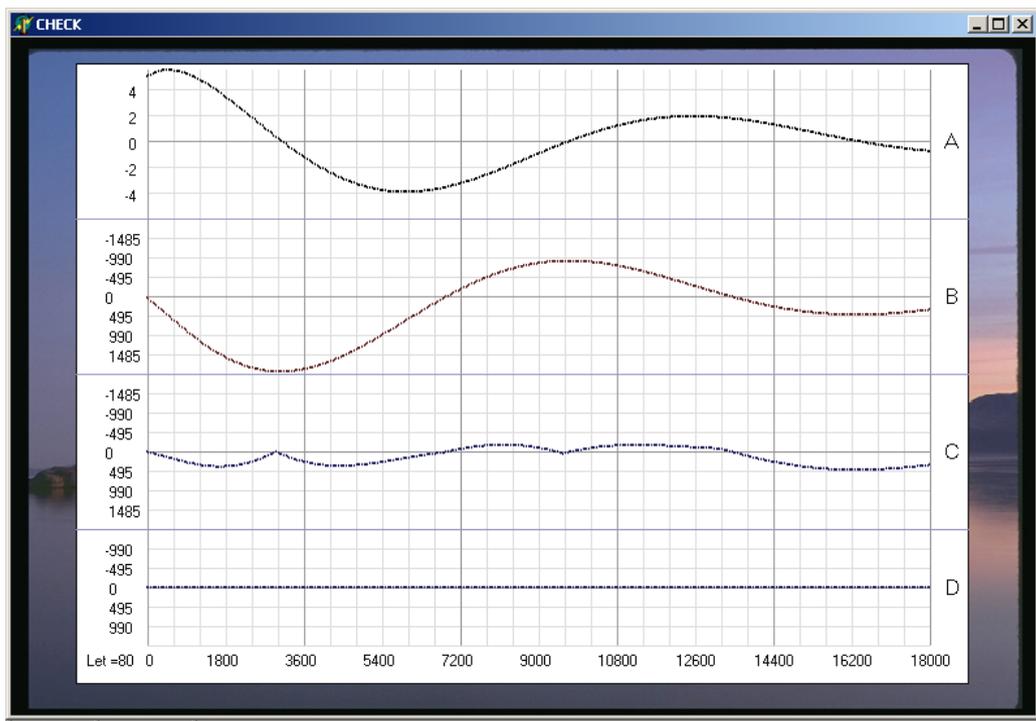


Рис. 4. Графики снижения бокового смещения судна для широты  $80^\circ$

2). При частичной компенсации суммарное боковое смещение  $d_\Sigma(t)$  уменьшается примерно в 5 раз, причем в моменты времени, когда  $d(t)$  достигает максимального значения, суммарное боковое смещение  $d_\Sigma(t)$  обращается в ноль.

3). Боковое смещение судна отсутствует при переменной дополнительной поправке курса, которая определяется равенством  $dK(t) = -\delta_j(t)$ .

### Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В данной статье рассмотрена разработка процедуры снижения бокового смещения судна после маневра введением дополнительной поправки курса.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность снижения суммарной инерционной девиации гирокомпаса способом ее аналитического предвычисления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Е.Л. Технические средства судовождения. / Смирнов Е.Л. - М.: Транспорт, 2002. – 646 с.
2. Чапчай П.А. Технические средства судовождения/ Чапчай П.А. – Одесса: НУ «ОМА», 2019.-298 с.
3. Чапчай П.А. Электронавигационные приборы/ Чапчай П.А. – Одесса: ОНМА, 2012. - 161 с.
4. Чапчай П.А. Современные морские системы курсоуказания/ П.А. Чапчай, Е.П. Чапчай, М.С. Алесейчук.– Одесса: ОНМА, 2014.- 171 с.
5. Морская навигационная техника. Справочник. Под общ. ред. Е.Л. Смирнова. — СПб.: “Элмор”, 2002. — 224 с.
6. Вагущенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика. – Одесса: Латстар, 2003. – 169 с.