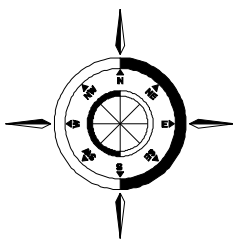


# АВТОМАТИЗАЦИЯ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Научно-технический сборник

ВЫПУСК 23



Одесса  
2017

ББК 39.42-05

А 22

УДК 681.5:629.12(045)

Автоматизация судовых технических средств: научно-технический сборник – 2017. – Вып. 23. – Одесса: НУ "ОМА". – 112 с.

ISSN 1819-3293 (Print)

ISSN 2415-3915 (Online)

Сборник посвящен проблемам расчета, проектирования и эксплуатации судовых автоматизированных технических средств. Обобщен опыт эксплуатации и приведены результаты исследований судовых систем автоматического управления и регулирования.

Для научных работников и специалистов.

Утвержден к печати ученым советом Национальным университетом "Одесская морская академия" 28.09.2017, протокол № 2.

Редакционная коллегия: д.т.н., проф. С. И. Горб (редактор), д.т.н., проф. Л. Л. Вагущенко, д.т.н., проф. Л. В. Вишневский, д.т.н., проф. В. А. Голиков, д.т.н., проф. М. В. Миусов, д.т.н., проф. В. В. Никольский, д.т.н., проф. П. С. Суворов, к.т.н., ст. преп. С. Г. Хнюнин (ответственный секретарь).

Адрес редакционной коллегии: 65029, г. Одесса, ул. Дидрихсона, 8, Национальный университет "Одесская морская академия" (НУ "ОМА"), кафедра ТАУ и ВТ.

Тел./факс (048) 728-75-40. Факс (0482) 34-52-67.

E-mail: [gs@fa.onma.edu.ua](mailto:gs@fa.onma.edu.ua)

Свидетельство о государственной регистрации: серия КВ, № 15286-38588.

А  $\frac{3205030000-1}{2017}$  Без объявления ББК 39.42-05

ISSN 1819-3293

© Национальный университет "Одесская морская академия"

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СМЕШАННЫХ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ОБОБЩЕННЫМ ПУАССОНОВСКИМ ЗАКОНОМ

Как показали статистические исследования последних 30 лет, закон распределения погрешностей навигационных измерений может отличаться от нормального закона [1, 2], что обусловило поиск альтернативных законов распределения вероятностей погрешностей, в качестве которых предложены два типа смешанных законов [3] и обобщенный пуассоновский закон [4].

Сравнительный анализ указанных законов распределения для выявления аспектов их возможного применения является целью настоящей статьи.

Важной особенностью смешанных законов распределения первого и второго типа является ограничение величины их существенного параметра  $n$  [5], причем для смешанного закона первого типа максимальное значение  $n$  равно 6, а для смешанного закона второго типа - 5, а выражения для плотностей распределения первого  $f_1(x)$  и второго  $f_2(x)$  типа соответственно имеют следующий вид [5]:

$$f_1(x) = \frac{2^n \alpha^{\frac{n+1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} \cdot 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+1}}, \quad (n \leq 6)$$

$$f_2(x) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5)$$

где  $n$  – существенный параметр,  $\alpha$  – масштабный параметр.

С помощью смешанных законов распределения описываются погрешности навигационных измерений, гистограммы которых в крайних разрядах имеют избыточное относительно нормального закона число погрешностей.

Как указывается в работе [5], наряду со смешанными законами распределения для описания гистограмм погрешностей навигационных измерений с «утяжеленными хвостами» используется также обобщенный пуассоновский закон распределения, плотность распределения которого

$$f_{\Gamma}(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(-c) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}\right),$$

причем в качестве базовой плотности выбрана плотность Гаусса. В приведенном выражении  $c$  – существенный параметр,  $\sigma$  – масштабный параметр.

Так как смешанные законы и обобщенный пуассоновский закон являются альтернативными в части описания стохастических свойств погрешностей, то необходимо произвести их сравнительный анализ для выявления рамок их возможного применения. Формы кривых плотностей указанных законов распределения зависят, как от существенного, так и масштабного параметров, поэтому корректный сравнительный анализ можно проводить при отсутствии влияния масштабного параметра, т.е. с помощью нормированных плотностей, дисперсии которых равны единице, а значение случайной величины выражается в долях среднего квадратического отклонения.

Рассмотрим выражения вначале для нормированных плотностей смешанных законов распределения. В общем случае нормированная плотность  $g(\eta)$  связана со стандартной плотностью  $f(\xi)$  следующим образом [6]:

$$g(x) = \sqrt{\mu_2} f(\sqrt{\mu_2} x). \quad (1)$$

Для смешанного закона первого типа дисперсия

$$\mu_2 = \frac{2\alpha}{2n-1}, \quad (n > 0)$$

поэтому нормированная плотность  $g_1(\eta)$  смешанного закона первого типа

$$g_1(\eta) = \sqrt{\frac{2\alpha}{2n-1}} \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)} \frac{1}{\left( \frac{2\alpha}{2n-1} \eta^2 / 2 + \alpha \right)^{n+1}}, \quad (n \leq 6)$$

$$\text{или } g_1(\eta) = \frac{2^n n!}{\sqrt{2n-1} \pi 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)} \frac{1}{\left( \frac{\eta^2}{2n-1} + 1 \right)^{n+1}}. \quad (n \leq 6)$$

Для смешанного закона второго типа аналитическое выражение дисперсии:

$$\mu_2 = \frac{\alpha}{n}. \quad (n > 0)$$

Нормированная плотность

$$g_2(\eta) = \sqrt{\frac{\alpha}{n}} \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \frac{1}{\left( \frac{\alpha}{n} \eta^2 / 2 + \alpha \right)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5)$$

или

$$g_2(\eta) = \frac{1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n+1)}{\sqrt{2n} 2^{n+1} n!} \frac{1}{\left( \frac{\eta^2}{2n} + 1 \right)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5)$$

Анализ нормированных плотностей для смешанных законов распределения показывает, что с увеличением существенного параметра  $n$  смешанные законы обоих типов сходятся к закону Гаусса.

Выражение для нормированной плотности обобщенного распределения Пуассона  $g_{Pg}(x)$  находим, используя соотношение между нормированной  $g(x)$  и  $f(x)$  стандартной плотностями (1), учитывая, что в этом случае:

$$\mu_2 = c\sigma^2,$$

поэтому

$$\begin{aligned} g_{Pg}(x) &= \sqrt{c\sigma} f(\sqrt{c\sigma}x) = \frac{\sqrt{c\sigma}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp(-c) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{c\sigma^2 x^2}{2k\sigma^2}\right), \text{ или} \\ g_{Pg}(x) &= \frac{\sqrt{c} \exp(-c)}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для значений существенного параметра  $c = 0,5$  и  $c = 20$  рассчитывались значения нормированной плотности  $g_{Pg}(x)$ . Расчет производился для суммы

для суммы  $\sum_{k=1}^n \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right)$  при значениях

$n = 10, 20, 30$  и  $40$ . Значения  $g_{Pg}(x)$  для  $n = 30$  и  $n = 40$  совпадают до седьмого знака после запятой, поэтому в дальнейшем ограничивались  $n = 30$ , т.е.:

$$\sum_{k=1}^n \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right) = \sum_{k=1}^{30} \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{cx^2}{2k}\right).$$

Так как для практических целей число факторов, формирующих погрешность линии положения, которая подчиняется обобщенному распределению Пуассона, не превосходит 40, то их математическое

ожидание находится в пределах от 5 до 20. С учетом указанного обстоятельства рассчитывались нормированные плотности (2) для  $c = 5 \div 20$ .

В дальнейшем был проведен сравнительный анализ нормированных плотностей обобщенного распределения Пуассона  $g_{Pg}(x)$  со смешанными распределениями первого  $g_1(x)$  и второго  $g_2(x)$  типа, который заключался в том, что вначале находилась аналитическая зависимость между существенным параметром  $c$  обобщенного распределения Пуассона и существенным параметром  $n$  смешанного распределения первого типа с одинаковым значением эксцесса  $Ex^{(1)}$ . Оказалось, что такая зависимость имеет вид  $c = n - 1,5$ . Для существенного параметра  $c$  в пределах от 5 до 20 определялись целочисленные значения параметра  $n$  при условии равенства эксцессов распределений. В табл. 1 приведены соответствующие значения существенных параметров  $c$  и  $n$ , имеющие одинаковый эксцесс  $Ex^{(1)}$ .

Таблица 1

Значения параметров  $c$  и  $n$  с одинаковым эксцессом  $Ex^{(1)}$

$n$	6	11	16	21
$Ex^{(1)}$	0,67	0,316	0,207	0,154
$c$	4,5	9,5	14,5	19,5

Затем для пары нормированных плотностей  $g_{Pg}(x)$  и  $g_1(x)$  с одинаковым эксцессом  $Ex^{(1)}$  определялась максимальная разница между соответствующими кривыми плотностей в процентах. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение плотностей при первом типе смешанного распределения

$n$	6	11	16	21
$c$	4,5	9,5	14,5	19,5
$\Delta$ , %	1,6	1,1	0,45	0,5

Аналогично анализировались расхождения кривых нормированных плотностей  $g_{Pg}(x)$  и  $g_2(x)$ , для чего находилась зависимость между существенными параметрами  $c$  и  $n$  с одинаковым эксцессом

$Ex^{(2)}$ . Упомянутая зависимость имеет вид  $c = n - 1$ . Соответствующие значения  $c$  и  $n$ , имеющие одинаковый эксцесс  $Ex^{(2)}$ , показаны в табл. 3.

Таблица 3

Значения параметров  $c$  и  $n$  с одинаковым эксцессом  $Ex^{(2)}$

$n$	6	11	16	21
$Ex^{(2)}$	0,6	0,3	0,2	0,15
$c$	5	10	15	20

Максимальная разница между соответствующими кривыми нормированных плотностей в процентах, полученная в результате проведенных расчетов, представлена в табл. 4.

Анализ табл. 2 и табл. 4 показывает, что нормированные плотности смешанных распределений обоих типов при значении существенного параметра  $n \geq 6$  практически совпадают с нормированными плотностями обобщенного распределения Пуассона, имеющих такое же значение эксцесса.

Таблица 4

Сравнение плотностей при втором типе смешанного распределения

$n$	6	11	16	21
$c$	5	10	15	20
$\Delta, \%$	2,1	1,0	0,42	0,8

Таким образом, с учетом данного обстоятельства подтверждается ранее принятое ограничение существенного параметра  $n$  обоих типов смешанного распределения, не превосходящего 6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hsu D. A. An analysis of error distribution in navigation / D. A. Hsu // The Journal of Navigation. – Vol. 32. - № 3. – P. 426 - 429.
2. Кондрашихин В. Т. Определение места судна / В.Т. Кондрашихин - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
3. Астайкин Д.В. Идентификация законов распределения навигационных погрешностей смешанными законами двух типов / Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 3 – 9.

4. Сикирин В.Е. Описание навигационных погрешностей с помощью обобщенного распределения Пуассона/ Сикирин В.Е.// Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. - 2016. - Вып. 26. – С. 152 – 156.

5. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrücken, Deutschland/ Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.

6. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Г. - М.: Мир, 1975, 648 с.



СПОСОБ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО  
МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ ПАРЫ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ  
СКОРОСТЕЙ

Обеспечения безопасного расхождения судов при плавании в стесненных водах является одной из наиболее актуальных проблем безопасности судоходства. Как указывается в работе [1], в стесненных районах интенсивного судоходства с помощью систем управления движения судов реализуется принцип внешнего управления опасно сближающимися судами, причем выбор стратегии расхождения осуществляется именно этими системами, а не судами. Хотя при расхождении предпочтительным является маневр изменения курсов судов, однако возникают ситуации, в которых для расхождения необходимо уменьшать скорости судов при их неизменных курсах. Принцип внешнего управления тремя судами для предупреждения столкновения рассмотрен в работе [2]. В настоящей статье анализируется возможность предупреждения столкновения судов маневром снижения скоростей.

Цель публикации - разработка способа аналитического расчета оптимального маневра расхождения судов снижением скоростей.

В работе [3] получено условие существования множества маневров расхождения судов изменением их скоростей, согласно которому необходимо, чтобы разность курсов судов отличалась от значений  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Также требуется, чтобы разность начальных и текущих скоростей судов отличалась от нуля. Если указанные требования выполняются, то для момента времени начала маневра  $t_n = 0$  рассчитывается дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$ . При  $D_{\min} \geq D_d$  множество маневров расхождения судов существует.

Для расчета маневра расхождения изменением скорости исходными являются начальные скорости движения судов  $V_1$ ,  $V_2$ , и выбранные безопасные скорости  $V_{1y}$ ,  $V_{2y}$ . Маневры расхождения отличаются значением момента времени начала маневра расхождения  $t_n$ , причем при неравенстве  $D_{\min} \geq D_d$  значение  $t_n$  изменяется от 0 до значения  $t_n^*$ , при котором  $D_{\min} = D_d$ , т.е.  $t_n \in [0, t_n^*]$ .

Обозначим через  $c_{mx}$  судно, переходной период которого больше

и равный длительности общего переходного процесса  $t_p$ . Судно с меньшим переходным периодом обозначим  $c_{mn}$ . Если время начала маневра расхождения  $t_n$  превосходит начальный момент времени  $t_0$ , то суда в течение переходного процесса  $t_p$  проходят следующие дистанции:

$$\begin{aligned} L_{mx} &= V_{mx}t_n + S_{mx}; \\ L_{mn} &= V_{mn}t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn}), \end{aligned}$$

где  $S_{mx}$  и  $S_{mn}$  - расстояния, которые проходят соответственно суда  $c_{mx}$  и  $c_{mn}$  за время переходного процесса  $\tau_{mx}$  и  $\tau_{mn}$  изменения скоростей.

К моменту времени окончания общего переходного процесса  $t_p$  координаты судов определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} X_{mxp} &= L_{mx} \sin K_{mx} = (V_{mx}t_n + S_{mx}) \sin K_{mx}; \\ Y_{mxp} &= L_{mx} \cos K_{mx} = (V_{mx}t_n + S_{mx}) \cos K_{mx}; \\ X_{mnp} &= L_{mn} \sin K_{mn} = [V_{mn}t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin K_{mn}; \\ Y_{mnp} &= L_{mn} \cos K_{mn} = [V_{mn}t_n + S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \cos K_{mn}. \end{aligned} \quad (1)$$

Значения пеленга  $\alpha_p$  и дистанции  $D_p$  на момент времени  $t_p$  окончания переходного процесса изменения скоростей:

$$\begin{aligned} D_p &= \sqrt{(X_{mxp} - X_{mnp})^2 + (Y_{mxp} - Y_{mnp})^2}; \\ \alpha_p &= \arcsin \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p}, \end{aligned}$$

причем четверть, в которой находится пеленг  $\alpha_p$ , определяется знаками выражений  $(X_{mxp} - X_{mnp})$  и  $(Y_{mxp} - Y_{mnp})$ .

В момент времени  $t_p$  параметры движения обоих судов становятся неизменными, как и относительный курс  $K_{olp}$ . Поэтому дистанция кратчайшего сближения судов

$$D_{\min} = \Delta_p D_p \sin(K_{olp} - \alpha_p), \quad (2)$$

где  $\Delta_p = \text{sign}[\sin(K_{olp} - \alpha_p)]$ .

По смыслу решаемой задачи оптимальным маневром расхождения является такой маневр, при выполнении которого достигают минимума потери ходового времени судов  $\Delta t_{mv}$ , вызванного маневром. Если

суда чисто расходятся, то  $\Delta t_{mv} = 0$ . Если же необходимо торможение судов для расхождения, то потери  $\Delta t_{mv}$  равны интервалу времени от начала времени торможения  $t_n$  до момента времени восстановления начальных скоростей судов после кратчайшего сближения, т.е.:

$$\Delta t_{mv} = \tau_{mx} + \Delta \tau_p + \tau_{mv},$$

где  $\Delta \tau_p$  – интервал времени между окончанием переходного процесса по снижению скоростей судов и моментом времени кратчайшего сближения  $t_{\min}$ , как показано на рис. 1;  $\tau_{mv}$  – интервал времени, необходимый для увеличения скоростей судов до начальных значений  $V_1$  и  $V_2$ .

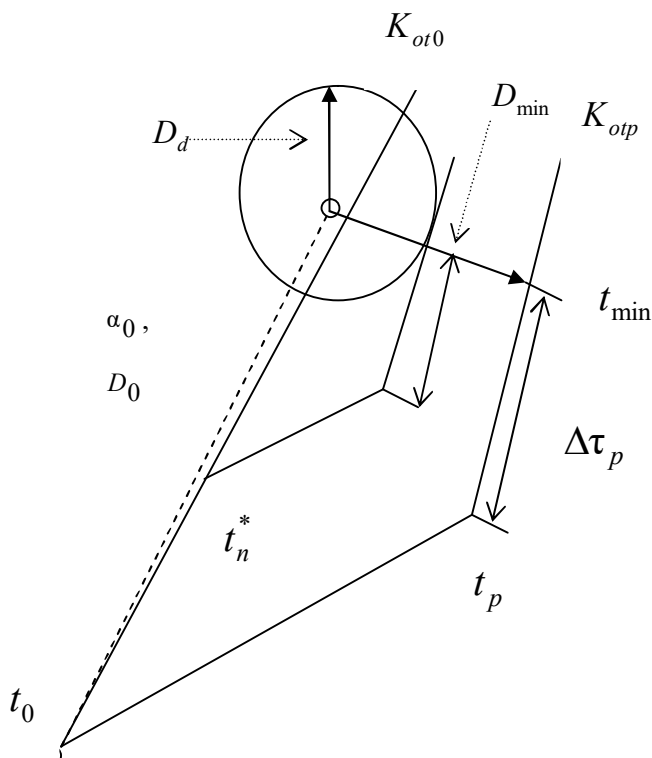


Рис. 1. Выбор оптимального маневра расхождения

Так как все безопасные маневры расхождения отличаются только величиной времени начала маневра  $t_n$ , а интервалы времени  $\tau_{mx}$  и  $\tau_{mv}$  всех маневров одинаковы, то оптимальным будет маневр с минимальным значением  $\Delta t_p$ . Из рис. 1 следует, что величина  $\Delta t_p$  сокращается с уменьшением дистанции кратчайшего сближения, и оптимальным маневром является маневр, при котором  $D_{\min} = D_d$  и  $t_n = t_n^*$ .

Для аналитического расчета момента времени начала маневра  $t_n^*$  вначале найдем зависимость  $D_{\min}$  от  $t_n$ . Для этого воспользуемся выражением (2):

$$D_{\min} = \Delta_p D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p) = \Delta_p D_p (\sin K_{otp} \cos \alpha_p - \cos K_{otp} \sin \alpha_p).$$

Учитывая, что

$$\sin \alpha_p = \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p} \text{ и } \cos \alpha_p = \frac{Y_{mxp} - Y_{mnp}}{D_p},$$

$$\sin K_{otp} (Y_{mxp} - Y_{mnp}) - \cos K_{otp} (X_{mxp} - X_{mnp}) = \Delta_p D_{\min}.$$

Подставляем в последнее равенство ранее полученные выражения (1) для координат судов  $X_{mxp}$ ,  $Y_{mxp}$ ,  $X_{mnp}$ ,  $Y_{mnp}$  и после преобразований получим:

$$t_n [V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})] = \Delta_p D_{\min} + S_{mx} \sin(K_{mx} - K_{otp}) + [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{mn} - K_{otp}).$$

Из последнего выражения находим зависимость  $t_n$  от  $D_{\min}$ :

$$t_n = \frac{\Delta_p D_{\min} - S_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{otp} - K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})}.$$

Очевидно, для оптимального маневра момент времени  $t_n^*$  справедливо выражение:

$$t_n^* = \frac{\Delta_p D_d - S_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - [S_{mn} + V_{mny}(t_p - \tau_{mn})] \sin(K_{otp} - K_{mn})}{V_{mx} \sin(K_{otp} - K_{mx}) - V_{mn} \sin(K_{otp} - K_{mn})}.$$

Расчет значения  $t_n^*$  целесообразно выполнять по следующему алгоритму. Исходным является выражение

$$D_{\min} = \text{Abs}[D_p \sin(K_{otp} - \alpha_p)]. \quad (3)$$

Так как по завершению переходного периода при  $t_n = 0$  справедливо неравенство  $D_{\min} > D_d$  и относительный курс  $K_{opr}$  является постоянным, то с ростом  $t_n$  значение  $D_{\min}$  уменьшается, а также изменяются величины пеленга  $\alpha_p$  и дистанции  $D_p$ . Поэтому для каждого значения  $t_n > 0$  следует рассчитать величины  $\alpha_p$  и  $D_p$ , по которым с помощью формулы (3) определяется величина  $D_{\min}$ . Полученное значение  $D_{\min}$  сравнивается с величиной предельно-допустимой дистанции  $D_d$ . Процесс расчета циклически продолжается до тех пор, пока не достигается равенство  $D_{\min} = D_d$ , при этом  $t_n = t_n^*$ .

В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения судов со следующими параметрами:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $D = 3$  мили,  $V_1 = 18$  узлов,  $V_2 = 21$  узел,  $K_1 = 90^\circ$ ,  $K_2 = 180^\circ$ ,  $D_d = 1$  мили. В данной ситуации кратчайшее сближение достигается при  $D_{\min} = 0,23$  мили. Маневр расхождения предусматривает снижение скорости обоих судов торможением. С помощью области опасных скоростей судов [1] определены безопасные скорости расхождения  $V_{1y} = 6,9$  узла и  $V_{2y} = 20$  узлов, причем первое судно снижает скорость активным торможением, а второе - пассивным. С помощью выше рассмотренного алгоритма определено, что при начале маневра в нулевой момент времени  $t_n = 0$  дистанция кратчайшего сближения будет равна  $D_{\min} = 1,18$  мили. При этом элементы торможения судов принимают значения  $\tau_1 = 80$  с,  $\tau_2 = 13$  с,  $S_1 = 0,248$  мили,  $S_2 = 0,07$  мили. Оптимальное значение момента времени начала торможения судов  $t_n^* = 68$  с, минимальное значение дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min} = 0,99$  мили достигается в момент времени  $t_{\min} = 148$  с.

Таким образом, предлагаемый способ расчета оптимальных параметров маневра расхождения судов снижением скоростей позволяет определить момент времени начала торможения с заданными значениями скоростей расхождения, при которых минимизируются потери ходового времени судов на выполнение маневра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

2. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. - Одесса: ОНМА. - С. 18 - 23.

3. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 27. – С. 32 – 37.

ПОДДЕРЖКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
ДВУХЭТАПНОГО ПЛАНА РАСХОЖДЕНИЯ С СУДАМИ

План безопасного расхождения судна оператора (OS - own ship) с судами-целями (TS - target ships) может включать один маневр (изменение курса, скорости, одновременно курса и скорости), или их последовательность [3]. Даже в самом распространенном случае, когда избежать столкновения можно одним изменением курса или скорости, в этом плане следует предусматривать и второе действие – возвращение к маршруту перехода или к намеченной скорости движения по нему [4]. Особенно это важно в стесненных водах, в частности, для предотвращения выхода OS за пределы безопасной в навигационном отношении акватории. Комбинированный маневр (одновременно курсом и скоростью) за счет большого количества его вариантов (сочетаний курса и скорости) обеспечивает возможность разрешения довольно сложных коллизионных ситуаций [5, 6]. Поэтому нахождению его эффективного варианта в ситуациях с несколькими судами уделяется все большее внимание.

Цель статьи состоит в определении для бортовых систем предупреждения столкновений (CAS - Collision Avoidance Systems) инструментов информационной поддержки, облегчающих выбор эффективного плана расхождения, включающего два комбинированных маневра и обеспечивающего возвращение к выполнению плана перехода.

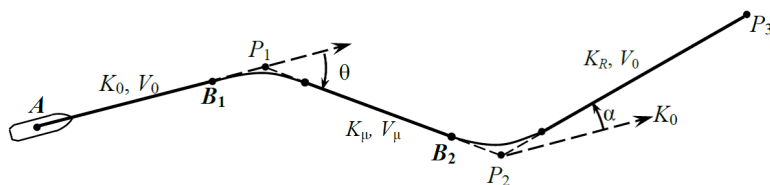


Рис. 1. Траектория движения судна при КД-маневре:

$P_1, P_2, P_3$  и  $B_1, B_2$  – путевые точки и точки начала действий;  $K_0, V_0$  – курс и скорость OS перед расхождением;  $\theta$  – изменение курса в точке  $P_1$ ;  $K_\mu, V_\mu$  – выбранные для расхождения курс и скорость OS;  $K_R, \alpha$  – курс и угол возвращения к маршруту перехода

На рис. 1 показана структура рассматриваемого плана расхождения. Совокупность действий OS в нем назовем комплексным двух-этапным маневром (КД-маневром), а точку  $P_2$  – его определяющей точкой. Выбор для расхождения с судами только двух последовательных изменений курса или скорости является частным случаем планирования КД-маневра.

Определение эффективного КД-маневра основывается на оценке качества его возможных безопасных вариантов с помощью подходящего критерия, отражающего цели действий по устранению угрозы столкновения. Анализ требований к расхождению с судами (МППСС-72, других нормативных документов) и рекомендаций обычной морской практики позволяет установить [1], что такими целями являются: безопасность; заблаговременность; заметность; экономность (минимальное увеличение времени перехода OS).

Отметим, что соответствие требованиям МППСС-72 относительно стороны изменения курса можно обеспечить, применяя для выбираемой стороны при разных видах сближения OS с опасной «целью» различную величину зоны безопасности OS [1]. На любом из путевых отрезков намеченной траектории КД-маневра не должно быть чрезмерного сближения OS с «целями» и возникновения опасности столкновения с ними. Последнее особенно неблагоприятно, когда «цель» становится «give-way» судном и с большой вероятностью может принять действие, в результате которого дальнейшее выполнение OS плана расхождения потеряет смысл.

В CAS должна быть возможность как определения эффективного плана расхождения в режиме диалога с CAS, так и его выработки для рекомендации вахтенному помощнику (OOW - Officer of the Watch) самой системой. Предлагаемые для решения первой задачи инструменты и методика их использования характеризуются ниже на примере выбора КД-маневра в ситуации, показанной на рис. 2. Параметры взаимного расположения и сближения судов в этом примере имеют следующие значения:

$K_0=20^0$ ;  $V_0=17,1$  узл.;

$K_1=278^0$ ;  $V_1=19,1$  узл.;  $\Pi_1=63^0$ ;  $D_1=69,1$  кб;  $d_1=2,0$  кб;  $\tau_1=14,7$  мин;

$K_2=307^0$ ;  $V_2=17,3$  узл.;  $\Pi_2=84^0$ ;  $D_2=58,7$  кб;  $d_2=20,3$  кб;  $\tau_2=13,2$  мин;

$K_3=11^0$ ;  $V_3=14,8$  узл.;  $\Pi_3=272^0$ ;  $D_3=18,5$  кб;  $d_3=8,9$  кб;  $\tau_3=-28,5$  мин;

$K_4=202^0$ ;  $V_4=10,1$  узл.;  $\Pi_4=1^0$ ;  $D_4=49,4$  кб;  $d_4=16,6$  кб;  $\tau_4=10,3$  мин;

$K_5=101^0$ ;  $V_5=15,8$  узл.;  $\Pi_5=343^0$ ;  $D_5=66,3$  кб;  $d_5=12,0$  кб;  $\tau_5=18,3$  мин.

В представленном списке:  $K_0$ ,  $V_0$  – исходные курс и скорость OS;  $K_J$ ,  $V_J$ ,  $\Pi_J$ ,  $D_J$ ,  $d_J$ ,  $\tau_J$  – соответственно курс, скорость, пеленг, дистанция, расстояние и время кратчайшего сближения  $TS_J$  ( $J=1, 2, 3, 4, 5$ ) в начальный момент решения задачи (до расхождения);



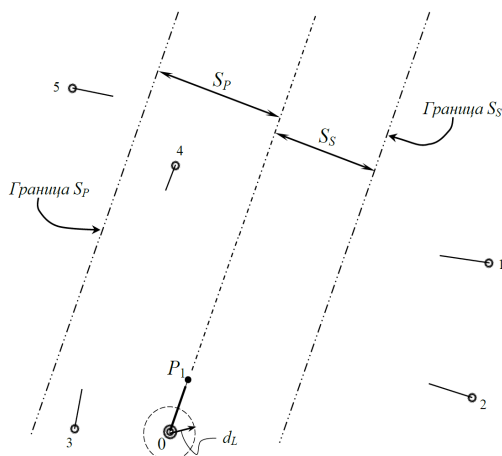


Рис. 2. Ситуация сближения судов: 0 – номер OS; 1, 2, 3, 4, 5 – номера «целей» («цель» 1 опасна);  $P_1$  – положение первой путевой точки траектории КД-маневра;  $d_L$  – радиус домена опасности OS;  $S_P$ ,  $S_S$  – допустимые при КД-маневре боковые отклонения от запланированного пути

Для поиска КД-маневра в режиме диалога с CAS предлагается следующая методика.

Оператором задаются: положение точки  $P_1$ , в которой начало действий по избеганию столкновения является заблаговременным; значения  $d_L$ ;  $S_P$ ,  $S_S$ ;  $\alpha$ ; пределы  $\theta^s$ ,  $\theta^p$  для планируемых изменений курса вправо и влево; нижняя и верхняя границы  $V^m$ ,  $V^M$  интервала для выбора  $V_\mu$ . В используемом примере  $d_L=5$  кб.,  $S_P=25$  кб.,  $S_S=21$  кб.,  $\alpha=15^\circ$ ,  $\theta^s=90^\circ$ ,  $\theta^p=120^\circ$ ,  $V^m=5$  узл.,  $V^M=22$  узл.

Системой по методу [4] расчета секторов относительных опасных курсов (СООК) находится соответствующая точке  $P_1$  область безопасных курсов и скоростей (ОБКС), не приводящих к чрезмерному сближению с «целями» (при условии неизменности их курсов и скоростей). Принцип получения СООК и выбора по нему маневра расхождения без учета инерционности OS характеризуется на рис. 3 [5], где  $K_0$ ,  $V_0$  и  $K_J$ ,  $V_J$  – курс, скорость OS и «цели»  $J$ . Безопасное расхождение обеспечивается, если конец выбираемого вектора скорости OS для уклонения от столкновения будет лежать за пределами СООК.

Соответствующая данным рассматриваемого примера ОБКС показана белым цветом на рис. 4, где СООК опасной «цели» 1 отмечен более темным цветом. ОБКС в CAS рекомендуется представлять на периферии экрана.

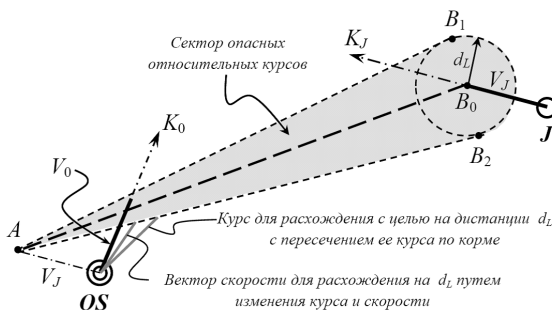


Рис. 3. COOK для облегчения выбора маневров расхождения

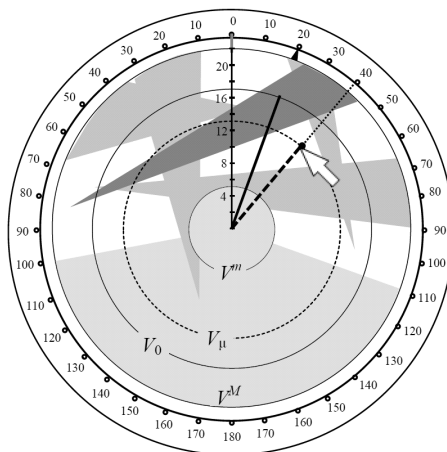


Рис. 4. Область безопасных курсов и скоростей

Оператором с помощью курсора в ОБКС задается предпочтительный, по его мнению, вектор скорости для расхождения. Для этого вектора по процедуре, описанной в работе [2], системой определяется положения точки  $P_2$  для КД-маневра с самым коротким участком  $P_1P_2$ . Также находятся точки  $B_1$ ,  $B_2$  начала действий с учётом динамики OS и точка  $P_3$  участка возвращения к маршруту перехода. В рассматриваемом примере (см. рис. 4), выбран вектор скорости с параметрами  $K_\mu = 40^\circ$ ,  $V_\mu = 13.0$  узл. Соответствующая ему траектория КД-маневра с самым коротким участком  $P_1P_2$  представлена на рис. 5.

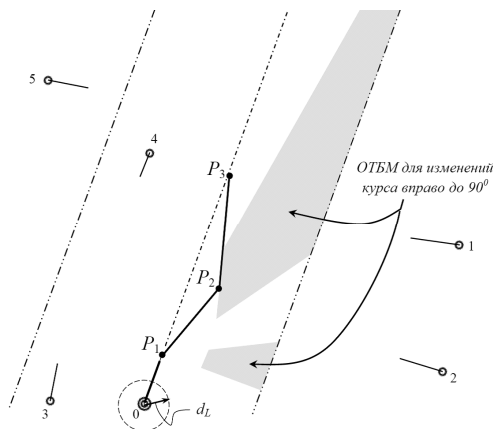


Рис. 5. Вид ситуации при выборе КД-маневра в режиме диалога с системой

По запросу система показывает численную оценку эффективности представляемого на экране варианта маневра, и область определяющих точек безопасных с выбранным  $V_u$  КД-маневров для изменений курса вправо и/или влево в заданных пределах ( $\theta^s$ ,  $\theta^p$ ). Эта область (обозначим ее ОТБМ) выделяется для облегчения, при необходимости, коррекции отображенной траектории КД-маневра путем указания в ОТБМ нового положения точки  $P_2$ . Границы ОТБМ рассчитываются по методу, охарактеризованному в статье [2]. На рис. 5 показана ОТБМ для изменений курса вправо.

Определение системой множества безопасных вариантов маневра и возможность быстрого просмотра любого выбранного из них при использовании предлагаемой методики значительно облегчает выбор для расхождения с судами эффективного КД-маневра в режиме диалога с CAS. Достоверность представленных в статье результатов подтверждена моделированием процессов разрешения коллизионных ситуаций на компьютере. Разработка метода расчета оптимального КД-маневра для расхождения с несколькими судами в стесненных водах с целью его рекомендации ООВ является предметом дальнейшей работы по данному направлению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л.Л. Критерий эффективности маневров расхождения с судами / Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко // Судовождение. – 2012. – Вып. 21. – С. 51 - 57.

2. Вагущенко А.А. Методы облегчения выбора комбинированного маневра для расхождения с несколькими судами /А.А. Вагущенко //Судовождение. - 2016. - Вып. 26. – С. 41 - 47.

3. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении /А.С. Мальцев, Е.Е. Тюпиков, И.И. Ворохобин. – 3-е изд., перераб. и доп. Одесса: Морской тренажерный центр, 2013. – 304 с.

4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

5. Degre T. A collision avoidance system / T. Degre, X. Lefevre //The Journal of Navigation. - 1981. – 34. – P. 294 – 302.

6. Pedersen E. Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways / E. Pedersen, K. Inoue, M. Tsugane //The Journal of Navigation. - 2003. – 56. – P. 411 – 427.

## ОПЕРАТИВНЫЙ СПОСОБ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ С ПОМОЩЬЮ ОБЛАСТИ НЕДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

При опасных сближениях судов высокий риск столкновения в значительной мере обусловлен несовершенными процедурами выявления опасного сближения и оперативного принятия решения по выбору безопасного маневра расхождения в зависимости от степени угрозы столкновения.

В последние годы направлению совершенствования вопросов оценки ситуации опасного сближения и предупреждения возможного столкновения посвящен ряд работ [1 - 4]. В работе [1] показано формирование гибких стратегий расхождения в зависимости от значения ситуационного возмущения, а в работе [2] рассмотрена реализация определенного типа взаимодействия судов в случае опасного сближения при возникновении ситуационного возмущения различного значения. Вопросу определения угрозы ситуационного возмущения при опасном сближении судов посвящена работа [3], а в работе [4] предложена экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближения судов. Вышеуказанные работы носят теоретический характер, хотя существует потребность в разработке оперативных и простых в применении способов оценки ситуации сближения судов и выбора безопасного маневра расхождения.

Также проведены исследования по проблеме обеспечения безопасного расхождения судов методами внешнего управления с использованием недопустимых областей курсов или скоростей судов [5], которые являются эффективными в практическом судовождении. Предлагаемый подход к решению проблемы предупреждения столкновения судов целесообразно использовать и при локально-независимом управлением процессом расхождения [5], что может обеспечить разработку оперативных и эффективных процедур предупреждения столкновений судов. Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

Цель публикации - разработка способа формирования области недопустимых параметров движения оперирующего судна, которая позволяет оценить опасность ситуации сближения судов и в случае необходимости оперативно выбирать маневра расхождения.

При сближении со встречной целью граничной изостадией будем называть линию в системе координат параметров движения судна

(курса  $K_1$  и скорости  $V_1$ ), в каждой точке которой достигается равенство дистанции кратчайшего сближения  $\min D$  с предельно-допустимой дистанцией сближения  $d_d$ , при неизменной относительной позиции судна и цели (пеленга  $\alpha$  и дистанции  $D$ ) и постоянных параметрах движения цели  $K_2$  и  $V_2$ .

Учитывая, что равенство  $\min D = d_d$  достигается при относительном уклонении судов как вправо, так и влево относительно направления пеленга, то имеется две граничные изостадии, которые ограничивают область недопустимых параметров движения судна  $Q_n$ . В этом случае, если точка  $(K_{li}, V_{li})$  принадлежит области  $Q_n$ , то сближение судов опасное, так как  $\min D < d_d$ .

Найдем аналитическое выражение для граничных изостадий. Для этого в равенство  $\min D = d_d$  подставляем формулу для  $\min D$  [4]:

$$\Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) = d_d.$$

Из последнего равенства:

$$K_{ot} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}.$$

Введем обозначение  $\gamma = \alpha - \arcsin(d_d / \Delta D)$ . В зависимости от знака  $\Delta$  получим:

$\gamma^{(1)} = \alpha - \arcsin(d_d / \Delta D)$ , при  $\Delta > 0$  и  $\gamma^{(2)} = \alpha + \arcsin(d_d / \Delta D)$ , при  $\Delta < 0$ . Очевидно:  $\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg} \gamma^{(1,2)}$ , или в развернутом виде [1]:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \gamma^{(1,2)}}{\cos \gamma^{(1,2)}}.$$

После преобразований последнего выражения получаем зависимость:

$$\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)}) = \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1}, \quad (1)$$

из которой следуют уравнения граничных изостадий, связующих курс судна  $K_1$  с его скоростью  $V_1$ , при которых справедливо равенство  $\min D = d_d$ , причем для сближения судов на встречных курсах:

$$\begin{aligned} K_{11}^{(1)} &= \gamma^{(1)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1}; \\ K_{11}^{(2)} &= \gamma^{(2)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1}, \end{aligned} \quad (2)$$

причем необходимо учитывать ограничения на значения скорости судна  $V_1$ . Аргумент  $V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)}) / V_1$  под функцией  $\arcsin$  не может превосходить 1, следовательно, минимальное значение скорости судна в уравнениях граничных изостадий определяется величиной  $V_{1\min} = V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})$ .

Аналогично из (1) получаем уравнения граничных изостадий для сближения судов на попутных курсах:

$$K_{12}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1};$$

$$K_{12}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1},$$

причем в данном случае  $V_1 \geq V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})$ .

На рис. 1 приведена область недопустимых параметров движения судна  $Q_n$  и граничные изостадии, которые ограничивают ее. Предельные изостадии рассчитаны для ситуации сближения судов на встречных курсах с помощью выражений (2) для следующих значений параметров ситуации сближения:  $\alpha = 140^\circ$ ;  $D = 4$  мили;  $d_d = 1$  миля;  $K_1 = 100^\circ$ ;  $V_1 = 15$  узлов;  $K_2 = 350^\circ$ ;  $V_2 = 20$  узлов.

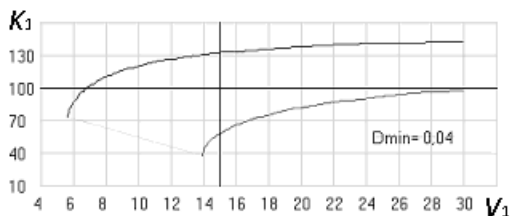


Рис. 1. Область недопустимых параметров движения судна  $Q_n$

С помощью области  $Q_n$  имеется возможность оценить является ли сближение опасным с точки зрения возникновения угрозы столкновения, т. е. имеет ли место неравенство  $\min D < d_d$ . Для этого необходимо оценить положение точки  $(K_1, V_1)$ , соответствующей параметрам движения судна, относительно области  $Q_n$ . Из рис. 1 видно, что данная точка принадлежит области недопустимых параметров движения судна  $Q_n$ , при этом  $\min D < d_d$  и  $\min D = 0,04$  мили. Следовательно, для предупреждения столкновения следует предпринять ма-

невр расхождения. С помощью области  $Q_n$  можно выбрать расхождение судов маневром изменением курса судна при неизменной скорости. Для выбора курса уклонения  $K_{1y}$ , обеспечивающего  $\min D = 1,00$  мили, необходимо найти точку пересечения вертикальной линии  $V_1 = 15$  узлов с граничными изостадиями и определить соответствующий курс уклонения отворотом вправо или влево. Так, на рис. 2 показан курс уклонения судна отворотом вправо, причем  $K_{1y} = 132^\circ$ .

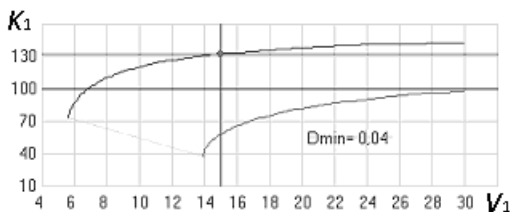


Рис. 2. Выбор безопасного курса уклонения  $K_{1y}$

Как следует из вышеизложенного, использование области недопустимых параметров движения судна, заключенной между двумя граничными изостадиями, позволяет, во-первых, оценить ситуацию сближения судов и, во-вторых, при опасном сближении оперативно выбрать безопасный маневр расхождения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. - 424 с.
2. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. - Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
3. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов/ Пятаков Э.Н., Заичко С.И. // Судовождение. - 2008. - № 15. - С. 166 - 171.
4. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 202 с.
5. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия). - 2016. - 585 с.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КООРДИНАТ СУДНА ПРИ  
ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

При обеспечении безопасного судовождения в стесненных районах плавания снижается числа навигационных аварий, возникающих из-за посадок судов на мель. Одним из существенных факторов, влияющих на безопасность судовождения, является повышение точности обсервации места судна, которое может быть достигнуто использованием избыточных линий положения и расчета обсервованных координат методом, обеспечивающим минимальную ковариационную матрицу позиционной векториальной погрешности.

Цель статьи - формирование процедуры определения эффективных координат судна при наличии избыточных измерений.

Вопросы теории и практики определения места судна методом линий положения изложены в работе [1]. В настоящей статье рассматриваются особенности определения места судна при числе линий положения больше двух, используя двумерную плотность  $f(x, y)$  распределения вероятностей векториальной погрешности.

Уравнение линии положения имеет вид [1]:

$$r_i + \xi_i = x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i \quad (1)$$

и выражает связь элементов линии положения направления градиента  $\alpha_i$  и переноса  $r_i$  с ее координатами  $x$  и  $y$ , учитывая погрешность линии положения  $\xi_i$ .

Найдем аналитическое выражение двумерной плотности распределения вероятностей векториальной погрешности при определении места судна по  $n$  линиям положения с погрешностями  $\xi_i$ . Известно [2], что  $n$  случайных величин  $\xi_i$  (погрешностей линий положения) можно рассматривать как координаты  $n$ -мерного пространства  $R_n$ , в котором распределена единичная плотность, причем совместная плотность распределения  $g(\xi_1, \dots, \xi_n)$  определяется частными (маргинальными) плотностями  $f_i(\xi_i)$  величин  $\xi_i$ . Плоскость  $R_2$ , на которой ищется распределение векториальной погрешности является линейным множеством пространства  $R_n$ , т.е. каждой точке плоскости  $R_2$  соответствует точка в  $R_n$ . Точке с координатами  $(x, y)$  на плоскости  $R_2$  соответствует точка с координатами  $\xi_i = a_i x + b_i y - r_i$  про-

странства  $R_n$  [2]. Для рассматриваемого случая  $a_i = \sin \alpha_i$  и  $b_i = \cos \alpha_i$ . Следовательно, связь координат  $R_2$  и  $R_n$ :

$$\xi_i = x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i, \quad (2)$$

что совпадает с уравнением линии положения (1).

Плотность  $f(x, y)$  находим, подставляя (2) в выражение для совместной плотности  $g(\xi_1, \dots, \xi_n)$ , т.е.:

$$f(x, y) = A_n g[(x \sin \alpha_1 + y \cos \alpha_1 - r_1), \dots, (x \sin \alpha_n + y \cos \alpha_n - r_n)],$$

где  $A_n$  – нормирующий множитель,

$$A_n = \left\{ \int_{R_2} g[(x \sin \alpha_1 + y \cos \alpha_1 - r_1), \dots, (x \sin \alpha_n + y \cos \alpha_n - r_n)] dx dy \right\}^{-1}.$$

Для независимых случайных величин  $\xi_i$  их совместная плотность распределения  $g(\xi_1, \dots, \xi_n)$  равна произведению частных плотностей  $f_i(\xi_i)$ .

Поэтому

$$f(x, y) = A_n \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i),$$

$$\text{где } A_n = \left\{ \int_{R_2} \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) dx dy \right\}^{-1}.$$

Окончательно выражение для  $f(x, y)$  принимает вид:

$$f(x, y) = \frac{\prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)}{\int_{R_2} \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) dx dy}.$$

В случае зависимых погрешностей линий положения плотность распределения векториальной погрешности  $f(x, y)$  может быть получена для устойчивых законов распределения погрешностей линий положения, как показано в работе [3] путем ортогонального преобразования системы зависимых погрешностей в систему независимых.

Покажем, что эффективные обсервованные координаты места судна можно получить, используя двумерную плотность  $f(x, y)$  вектора погрешности определения места судна. Как ранее указывалось, плотность распределения  $f(x, y)$  задана относительно конкретной системы координат, в которой  $x_0$  и  $y_0$  – координаты обсервованной точки.

Основная посылка определения эффективных обсервованных координат с помощью плотности  $f(x, y)$  заключается в допущении, что эффективная обсервованная точка совпадает с наиболее вероятной точкой плотности  $f(x, y)$ . Докажем правомерность указанного допущения. Для этого найдем наиболее вероятную точку двумерной плотности  $f(x, y)$ , т.е. точку, в которой  $f(x, y)$  достигает максимума. Полагаем, что  $f(x, y)$  имеет первые частные производные.

Наиболее вероятностную точку ищем из системы уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = 0 ; \quad \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) = 0 . \quad (3)$$

Так как плотность  $f(x, y)$  для независимой системы линий положения выражается произведением плотностей независимых случайных величин, то система (3) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \{A_n \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)\} &= 0 ; \\ \frac{\partial}{\partial y} A_n \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) &= 0 . \end{aligned} \quad (4)$$

Если учесть, что функция  $f(x, y)$  достигает max в той же точке, что и ее логарифм, т.е.  $\ln[f(x, y)]$  [4], то сокращая в системе (4) множитель  $A_n$  и заменяя произведение плотностей  $f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)$  суммой их логарифмов, получим уравнения правдоподобия [4], из которых находятся обсервованные эффективные координаты  $x_0$  и  $y_0$ . Поэтому можно сделать вывод, что наиболее вероятная точка плотности  $f(x, y)$  совпадает с эффективными (обладающими минимальной ковариационной матрицей) обсервованными координатами, которые могут быть получены решением системы уравнений (4). Приведем систему (4) к более удобному виду. Для первого уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = A_n \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)}{\partial x} \prod_{j \neq i}^n f_j(x \sin \alpha_j + y \cos \alpha_j - r_j) \right\} = 0 .$$

Сократим постоянный множитель  $A_n$  и каждое слагаемое суммы умножим и разделим на  $f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)$ , при этом

$$\prod_{j \neq i}^n f_j(x \sin \alpha_j + y \cos \alpha_j - r_j) f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) = \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) ,$$

следовательно

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = \prod_{i=1}^n f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\frac{\partial f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)}{\partial x}}{f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)} \right\} = 0.$$

Очевидно, выражение перед знаком суммы, отлично от нуля, поэтому

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\frac{\partial f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)}{\partial x}}{f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i)} \right\} = 0.$$

С учетом выражения (2) по правилам дифференцирования сложной функции

$$\frac{\partial}{\partial x} f_i(x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i) = \sin \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi} f_i(\xi).$$

Также справедливо соотношение

$$\frac{\frac{\partial}{\partial \xi} f_i(\xi)}{f_i(\xi)} = \frac{\partial}{\partial \xi} \ln[f_i(\xi)].$$

Поэтому окончательно получаем выражение для первого уравнения системы (4):

$$\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi} \ln[f_i(\xi)] = 0.$$

Аналогично находим выражение для второго уравнения системы (4), имеющее окончательный вид:

$$\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi} \ln[f_i(\xi)] = 0.$$

Таким образом, получена система уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi} \ln[f_i(\xi)] &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi} \ln[f_i(\xi)] &= 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\xi_i = x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i.$$

При решении системы (5) необходимо вначале произвести дифференцирование по переменной  $\xi_i$ , а затем в полученные уравнения подставить выражение  $\xi_i$  из третьего уравнения. Полученную после подстановки систему двух уравнений необходимо решать относи-

тельно неизвестных  $x$  и  $y$ . Решение дает обсервованные эффективные координаты  $x_0$  и  $y_0$ .

Таким образом, используя аналитическое выражение для двумерной плотности распределения векториальной погрешности, полученное в статье, следуя предложенному алгоритму можно рассчитать эффективные обсервованные координаты судна при наличии избыточных линий положения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашихин В. Т. Определение места судна / В.Т. Кондрашихин - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Г. - М.: Мир, 1975, 648 с.
- 3 Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Ворохобин И.И., Алексейчук Б.М. – Saarbrücken, Deutschland/ Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 274 с.
4. Мудров В.М. Методы обработки измерений / Мудров В.М., Кушко В.Л. - М.: Советское радио, 1976. 192 с.

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Программируемые контроллеры – это современная элементная база систем автоматизации технологических процессов. Работа в "жёстком" реальном времени, наличие в ряде моделей встроенного Web-сервера и возможность обмена информацией с использованием сетевых технологий семейства Ethernet позволяют применять контроллеры в различных по назначению устройствах и распределённых иерархических системах управления, в том числе и при автоматизации судового оборудования, а также при удалённом управлении объектами посредством технологий передачи данных GSM/GPRS, Wi-Fi, Ethernet. На рис. 1 представлена структура судовой трёхуровневой распределённой системы управления, заимствованная из технической документации компании Phoenix Contact, которая, помимо перечисленных ранее возможностей, позволяет осуществлять дублирование и резервирование процесса обработки информации, что повышает надёжность и защищённость системы управления.

### • Redundancy

### •Wireless data transfer

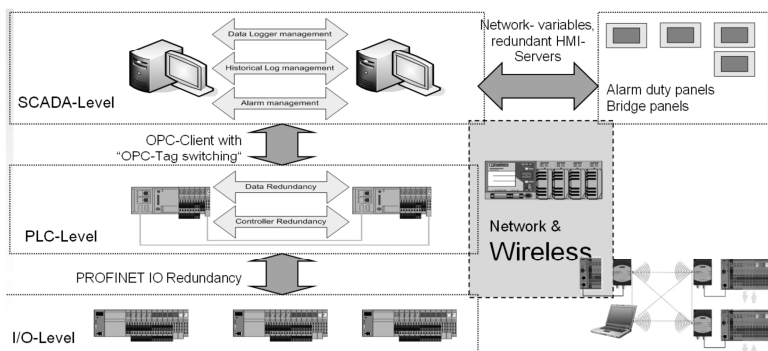


Рис. 1. Структура судовой трёхуровневой распределённой системы

При использовании контроллеров сокращается время проектирования, создания и настройки систем управления. Также контроллеры

можно считать наиболее современными средствами автоматизации технологических процессов среди унифицированных средств.

В то же время активный переход на технологии автоматизации с использованием программируемых контроллеров сдерживается отсутствием комплексного методического обеспечения проектирования и эксплуатации таких систем, которое позволило бы принимать более обоснованные и оптимальные проектные, технологические и эксплуатационные решения.

Задача разработки комплексного методического обеспечения технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров решалась в рамках проекта TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (Тренинги в области технологий автоматизации для Украины), в котором приняли участие: Донецкий национальный технический университет, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Национальный университет «Одесская морская академия», Одесский национальный политехнический университет и Харьковский национальный университет радиоэлектроники, а также пять западноевропейских университетов: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences (Германия); Carinthia University of Applied Sciences (Австрия); Polytechnic University of Valencia (Испания); University of Antwerpen (Бельгия); University of Limerick (Ирландия).

В ходе выполнения проекта показано, что методическое обеспечение целесообразно представить в виде следующих модулей.

1. Программирование контроллеров в одной из инструментальных сред производителя контроллеров и независимой от аппаратного обеспечения среде разработки CoDeSys.

2. Технологии построения промышленных сетей передачи данных с использованием стандартов Profinet и Modbus TCP в сетях Industrial Ethernet и интегрирование систем автоматизации с промышленными сетями передачи данных PROFIBUS.

3. Беспроводные технологии передачи данных.

4. Системы реального времени.

5. Стандарт обмена данными в реальном времени OPC DA.

В работе [1] обоснован состав этих модулей, а в работах [1 и 2] описаны переносные стенды TSL (TATU Smart Lab, интеллектуальная лаборатория TATU), которые позволяют создать опытные образцы широкого класса систем автоматизации технологических процессов. Эти стенды содержат современные устройства и модули производства немецких компаний Berghof, Phoenix Contact и Siemens (указаны в алфавитном порядке) и отличаются:

полным набором перспективных технологий, которые используются в системах автоматизации;

модульностью построения, которая обеспечивает возможность модернизации стендов;

минимальным набором технических средств для организации комплексного обучения применению программируемых контроллеров; адаптацией оборудования для организации учебного процесса.

Комплекс предлагаемого методического обеспечения представлен следующими публикациями, которые объединены общей концепцией создания проектов автоматизации с программируемыми контроллерами.

В работах [3 и 4] изложена методика программирования контроллеров в инструментальной среде PC Worx, которая имеет хороший функционал и довольно много элементов, схожих с другими развитыми инструментальными средами. Среда PC Worx разработана компанией Phoenix Contact и ориентирована на устройства и модули, выпускаемые этой компанией. Она позволяет:

тестировать программы на ранних стадиях при помощи функции имитации;

диагностировать все компоненты системы;

работать нескольким пользователям с защитой паролями;

вести несколько проектов и сравнивать проекты.

Среда содержит:

каталоги устройств и модулей;

ассистент замены контроллера в случае перехода с одной модели на другую.

Описание среды представлено разделами:

интерфейс и режимы работы PC Worx;

создание нового проекта;

настройка PC Worx при работе с контроллером ILC 151 GSM/GPRS;

настройка PC Worx при работе с контроллером АХС 3050.

Технология программирования рассмотрена с использованием трёх языков программирования, предусмотренных третьей версией стандарта Международной электротехнической комиссии (МЭК) 61131-3, которая вышла в 2012 году:

функциональных блочных диаграмм FBD (Function Block Diagram);

релейно-контактных схем LD (Ladder Diagram);

структурированного текста ST (Structured Text).

Приведены примеры решения задач автоматизации технологических процессов разной сложности.



В работе [5] изложена методика программирования контроллеров с использованием инструментальной среды CoDeSys (CONtroller DEvelopment SYStem), которая распространяется компанией 3S-Smart Software Solutions GmbH (Кемптен, Германия) бесплатно и работает со многими моделями программируемых контроллеров разных производителей.

Описание среды представлено разделами:

- создание проекта;
- создание программы;
- компиляция и загрузка приложения в контроллер;
- запуск приложения и мониторинг данных;
- установка шагов и точек остановки;
- особенности создания проекта для контроллера Berghof.

Также приведены примеры пошаговых действий при создании простой панели управления, программы управления светофором, создании кодового замка.

В работе [6] изложена методика применения технологии (стандарта) передачи данных Profinet, использующей сетевые протоколы TCP/IP (Transmission Control Protocol (TCP) – протокол управления передачей данных; Internet Protocol (IP) – протокол межсетевого соединения) и режим реального времени Ethernet. Протоколы TCP/IP обеспечивают управление устройствами автоматизации удалённо по сети Интернет.

Описание технологии Profinet представлено разделами:

- сравнительный анализ технологий Profinet и Profibus;
- сетевая модель ISO/OSI;
- основы Ethernet;
- Internet Protocol (IP);
- концепция соединения Profinet IO (Input/Output);
- концепция соединения Profinet CBA (Component Based Automation);
- кабельная система Profinet.

В работе [7] изложена методика применения технологии (стандарта) передачи данных Modbus, которая может использоваться для передачи данных через последовательные линии связи и через сети с использованием протоколов TCP/IP. Преимущество этой технологии в том, что практически все системы контроля и управления имеют программные драйверы для работы с Modbus.

Описание технологии Modbus представлено разделами:

- сетевые технологии;
- протоколы промышленных сетей;
- структура протоколов и сетей Modbus I и Modbus TCP.

Также рассмотрены пошаговые действия по построению сети Modbus TCP и мониторингу трафика сети с помощью программного анализатора.

В работе [8] изложена методика применения технологии (стандарта) передачи данных сети Profibus, которая получила широкое применение в предыдущем поколении сетей передачи данных и в миллионах устройств автоматизации, установленных по всему миру за более чем 20 лет (с начала 1990-х годов).

Описание технологии Profibus представлено разделами:

- профили сети DP, PA и FMS;

- реализация сети на материальном уровне;

- обмен данными в сети.

Также в работе [8] приведён пример создания системы управления водоотливом в шахтном блоке.

В работе [9] изложены методические основы и проблемы беспроводных локальных сетей, которые получили распространение в последнее время. Выполнен сравнительный анализ технологий Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi (Wireless Fidelity) и Trusted Wireless 2.0 (беспроводная технология для промышленного применения компании Phoenix Contact).

В работе [10] изложена методика применения компонентов систем управления с расширением реального времени.

Описание представлено разделами:

- расширение IntervalZero RTX для операционной системы Windows;

- программный пакет PC Worx RT компании Phoenix Contact;

- технология создания проекта с использованием пакета PC Worx RT;

- программный пакет WinAC (Windows Automation Center);

- контроллер WinLC RTX компании Siemens в системах управления реального времени.

Также приведены примеры использования контроллера WinLC RTX для:

- интеграции частотного преобразователя Siemens Sinamics G120 в проект;

- создания системы управления электроприводом.

В работе [11] описаны программные технологии при обмене данными в реальном времени в сетях в рамках группы стандартов OPC (OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control, внедрение и связывание объектов для управления технологическими процессами).

Описание представлено разделами:

- OPC DA (Data Access);

OPC HDA (Historical Data Access);

OPC UA (Unified Architecture);

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – программные средства управления технологическими установками, сбора данных и обработки) системы.

Также рассмотрена процедура конфигурации OPC сервера с помощью программного комплекса AutomationWorX компании Phoenix Contact.

В работе [12] приведена подробная информация об участниках проекта TATU, расширены некоторые теоретические фрагменты методического обеспечения и приведены практические упражнения по освоению материала.

Таким образом, предложено комплексное методическое обеспечение для создания систем автоматизации с программируемыми контроллерами.

Однако привлечение к созданию этого методического обеспечения большого количества авторов привело к тому, что в его первой итерации допущены повторы отдельных фрагментов, использован разный стиль изложения материала и разная терминология. В связи с этим можно рекомендовать подготовку второго издания методического обеспечения под общей редакцией текста.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 39 – 46.

2. Макаров О., Рохас Л., Макарова Ю. TATU SMART LAB. Керівництво користувача. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 37 с.

3. Горб С.И., Никольский В.В., Шапо В.Ф., Хнюнин С.Г. Программирование контроллеров в инструментальной среде: учебное пособие. – Харьков: Издатель ФЛП Панов А.Н., 2017. – 172 с.

4. Gorb S.I., Nikolskyi V.V., Shapo V.F., Khniunin S.H. Programming controllers in the integrated development environment: training manual. Practice. – Odessa: National University "Odessa Maritime Academy", 2017. – 164 p.

5. Ключник І, Галкін П., Шапоріна О. Програмне забезпечення CoDeSys. Модуль 1. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 107 с.

6. Шапорін Р., Мілейко І., Шапорін В., Шапоріна О. Промисловий Ethernet для Profinet. Модуль 2. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 67 с.

7. Воропаєва В., Вовна О., Тарасюк В., Воропаєва А., Ступак Г.

Промисловий Ethernet для Modbus. Модуль 2. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 67 с.

8. Воропаєва В., Поцєпаєв В., Бойко В., Єшан Р., Ставицький В., Васи́лець С. Проксі-сервер до мереж Profibus. Модуль 2. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 57 с.

9. Ключник І, Галкін П., Шапоріна О. Бездротові технології. Модуль 2. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 44 с.

10. Захімовський Л.М., Николайчук М.Я., Скрип'юк Р.Б., Левицький І.Т. Керування процесами реального часу. Модуль 3. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 72 с.

11. Шапорін Р., Мілейко І., Шапорін В., Шапоріна О. Введення в технології OPC. Модуль 4. – Одеса: ФОП Побута М.І. – 47 с.

12. Trainings in Automation Technology for Ukraine: TATU Study Book / Collective of authors including Gorb S., Nikolskyi V., Shapo V., Khniunin S. Editors Christian Madritsch and Wolfgang Werth. June 9, 2017. – 211 p.

## ОЦЕНКА ВЕКТОРИАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОВОРОТА СУДНА И МИНИМИЗАЦИЯ ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ

При плавании в стесненных водах судно должно удерживаться на программной траектории движения, которая выбирается заблаговременно и обеспечивает безопасное следование судна относительно навигационных опасностей. При этом непрерывно осуществляется контроль места судна относительно программной траектории и в случае необходимости корректируется его курс для минимизации отклонений обсервованного места от программного пути. Из-за неизбежных погрешностей обсервации и счисления, а также влияния возмущающих факторов, истинное положение судна не совпадает с программной траекторией и возникает позиционная векториальная погрешность, которая носит случайный характер и может повести, например, к посадке на мель или к дугой навигационной аварии.

Одним из аспектов, способствующих повышению безопасности судовождения, является снижение величины позиционной погрешности судна, чем уменьшается риск возникновения навигационной аварийности. Оценка ее влияния на навигационную безопасность впервые рассматривались в работе [1], причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна. Дальнейшее развитие этого вопроса получило в работах [2, 3], причем в работе [2] обоснован критерий навигационной безопасности. В работе [3] рассмотрены разные подходы к оценке вероятности безаварийного плавания судна по заданному стесненному маршруту и показана их эквивалентность. В анализируемых работах для оценки навигационной безопасности учитывается только позиционная погрешность при следовании судна на прямолинейных участках программной траектории.

Однако при переходе судна на очередной линейный участок программной траектории выполняется поворот, и судно следует криволинейной траекторией. При этом необходимо рассчитать момент времени начала поворота с заданным углом кладки пера руля, для чего следует располагать моделью криволинейного движения судна для прогноза траектории поворота. Судно при выходе на новый курс будет иметь векториальную погрешность поворота, величина которой зависит от степени адекватности модели прогноза поворота реальной криволинейной траектории движения судна. Следовательно, помимо по-

зиционной погрешности при плавании в стесненных водах следует также учитывать и векториальную погрешность поворота судна.

Цель статьи – оценка векториальной погрешности поворота судна, которая возникает из-за погрешности угла кладки пера руля, и минимизация ее величины выбором модели прогноза поворота судна.

При повороте судна векториальная погрешность относительно прогнозируемой точки выхода судна на новый курс может появиться из-за погрешности перекадки пера руля  $\Delta\beta_k$  или погрешности в определении момента времени начала поворота [4]. Рассмотрим векториальную погрешность  $S$ , которая возникает из-за погрешности  $\Delta\beta_k$ , имеющую дисперсию  $D_\beta$ . Для этого обратимся к рис. 1. Если угол кладки руля  $\beta_k$  не содержит погрешности, то к концу маневра поворота судно окажется на новом участке программной траектории в точке  $M$  и векториальная погрешность  $S$  будет отсутствовать.

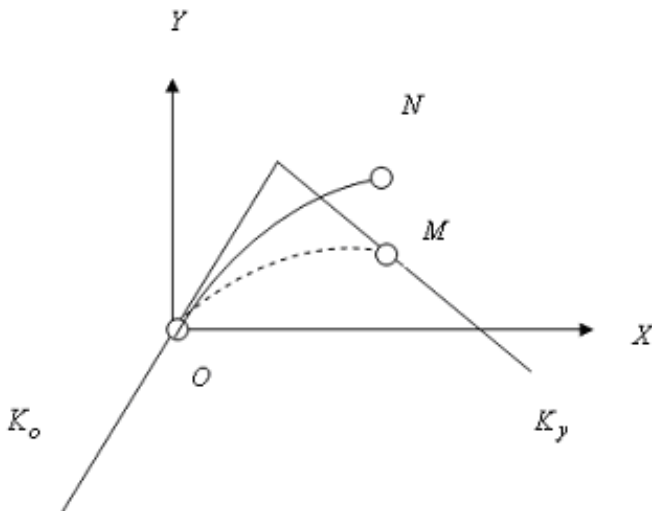


Рис. 1. Векториальная погрешность  $S$

В случае наличия погрешности  $\Delta\beta_k$ , кладка пера руля составит угол  $\beta_k + \Delta\beta_k$  и в завершении маневра, когда судно ляжет на курс  $K_y$ , оно оказывается в точке  $N$ . Погрешность  $S$  определяется величиной отрезка  $MN$  с координатами  $x$  и  $y$ :

$$x = x_N - x_M \text{ и } y = y_N - y_M, \quad (1)$$

где  $x_M$  и  $y_M$  – координаты точки  $M$ ;  $x_N$  и  $y_N$  – координаты точки  $N$ .

Вначале рассмотрим ситуацию, когда прогноз поворота судна производится по простейшей динамической модели первого порядка, которая описывает поворот судна с постоянной угловой скоростью и характеризуется следующим уравнением изменения курса:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k ,$$

где  $k_{\omega}$  – коэффициент эффективности руля.

Очевидно, данное уравнение имеет следующее решение:

$$K = K_o + k_{\omega} \beta_k t .$$

Длительность поворота судна

$$\tau = \frac{\Delta K}{k_{\omega} \beta_k} ,$$

где  $\Delta K = K_y - K_o$ .

Точка  $M$  имеет координаты:

$$x_M = \int_0^{\tau} V_o \sin [K_o + a_{\omega} t] dt = V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \cos (a_{\omega} t) dt + V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \sin (a_{\omega} t) dt ;$$

$$y_M = \int_0^{\tau} V_o \cos (K_o + a_{\omega} t) dt = V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \cos (a_{\omega} t) dt - V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \sin (a_{\omega} t) dt ,$$

где  $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$ .

Так как

$$\int_0^{\tau} \sin (a_{\omega} t) dt = -\frac{1}{a_{\omega}} \cos a_{\omega} t \Big|_0^{\tau} = -\frac{1}{a_{\omega}} [\cos a_{\omega} \tau - 1] ,$$

$$\int_0^{\tau} \cos (a_{\omega} t) dt = \frac{1}{a_{\omega}} \sin a_{\omega} t \Big|_0^{\tau} = \frac{1}{a_{\omega}} \sin a_{\omega} \tau ,$$

то с учетом  $a_{\omega} \tau = \Delta K$  и  $K_o + \Delta K = K_y$ , окончательно получим:

$$x_M = \frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k} (\cos K_o - \cos K_y) ,$$

$$y_M = \frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k} (\sin K_y - \sin K_o) .$$

Координаты точки  $N$  находим аналогично:

$$x_N = \frac{V_o}{k_{\omega} (\beta_k + \Delta \beta_k)} (\cos K_o - \cos K_y) ,$$

$$y_N = \frac{V_o}{k_{\omega} (\beta_k + \Delta \beta_k)} (\sin K_y - \sin K_o) .$$

Согласно (1) составляющие  $x$  и  $y$  векториальной погрешности имеют вид:

$$x = \frac{V_o}{k_\omega} (\cos K_o - \cos K_y) \left[ \frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right],$$

$$y = \frac{V_o}{k_\omega} (\sin K_y - \sin K_o) \left[ \frac{1}{(\beta_k + \Delta\beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right].$$

Учитывая, что  $\beta_k \gg \Delta\beta_k$ ,

$$x = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta\beta_k, \quad y = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta\beta_k. \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда поворот судна прогнозируется по более адекватной реальному процессу поворота динамической модели вращательного движения судна, которая описывается дифференциальным уравнением второго порядка [5]:

$$T_1 \ddot{K} + \dot{K} = k_\omega \beta_k,$$

где  $T_1$  – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства судна.

Решение приведенного дифференциального уравнения имеет следующий вид [6]:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)], \quad (3)$$

где  $\omega_o$  и  $\omega_r$  – соответственно начальное значение угловой скорости поворота и частное решение исходного дифференциального уравнения.

Поворот судна содержит две фазы кладки пера руля. Сначала, на первой фазе, в начальный момент времени производится перекладка руля на угол  $\beta_k$  и руль удерживается в таком положении в течение

интервала времени  $\Delta t_k$ . Затем руль перекалывается на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени  $\Delta t$ , по истечению которого судно выходит на заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, а перо руля приводится в диаметрально плоскость судна.

Найдем выражения для курса судна на первой и второй фазах поворота. На первой фазе поворота, длительность которой составляет интервал времени  $\Delta t_k$ , начальное  $\omega_o$  и установившееся  $\omega_r$  значения угловой скорости:  $\omega_o = 0$  и  $\omega_r = k_\omega \beta_k = a_\omega$ .

В этом случае выражение (3) приобретает следующий вид:

$$K = K_o + a_\omega \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}. \quad (4)$$



На второй фазе поворота происходит перекладка руля на противоположный борт на угол -  $\beta_k$  и в течение интервала времени  $\Delta t$  происходит одерживание судна. Для этой фазы поворота значение текущего курса

$$\tilde{K} = K + a_{\omega} \{ T_1 [ 2 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] [ 1 - \exp(-t / T_1) ] - t \} . \quad (5)$$

Интервалы времени  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$  вычисляются с учетом требований поворота на заданное приращение курса  $\Delta K$ , а также обращение в нуль угловой скорости на момент времени выхода на новый курс и аналитически выражается следующим образом:

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) ; \quad (6)$$

$$\omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 . \quad (7)$$

Уравнение (6) с учетом выражений (4) и (5) принимает вид:

$$\Delta K = a_{\omega} \{ \Delta t_k - T_1 [ 1 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] \} + a_{\omega} \{ T_1 [ 2 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] \times \rightarrow \\ \rightarrow [ 1 - \exp(-t / T_1) ] - \Delta t \} ,$$

из которого получаем выражение расчета методом простых итераций:

$$\Delta t_k = T_1 [ 1 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] + \Delta t - T_1 [ 2 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] [ 1 - \exp(-\Delta t / T_1) ] + \Delta K / a_{\omega} . \quad (8)$$

В качестве начального приближения принимаем из простейшей модели  $\Delta t_k = \Delta K / a_{\omega}$ .

Из уравнения (7) с учетом угловых скоростей на второй фазе поворота  $\omega_o = a_{\omega} [ 1 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ]$  и  $\omega_r = -a_{\omega}$  получим:

$$[ 2 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ]^{-1} = \exp(-\Delta t / T_1) .$$

Логарифмируя обе части последнего уравнения, получим:

$$\Delta t = T_1 \ln [ 2 - \exp(-\Delta t_k / T_1) ] .$$

Последнее полученное уравнение позволяет связать переменные  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$ , чем обеспечивается итерационное вычисление длительностей каждой из фаз поворота судна, а также длительности поворота  $\tau$  с одного заданного курса судна на другой.

Координаты точки  $M$  определяются выражениями:

$$x_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \sin K dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin \tilde{K} dt , \quad (9)$$

$$y_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \cos K dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos \tilde{K} dt , \quad (10)$$

причем в выражениях (4), (5) и (8) применяем  $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$ .

Аналогично находятся выражения для координат  $x_N$  и  $y_N$  точки

$N$ , только при их расчете по формулам (9) и (10) выбираем значение  $a_{\omega} = k_{\omega}(\beta_k + \Delta\beta_k)$ . При расчете координат определенные интегралы, которые входят в эти формулы, не выражаются в элементарных функциях и их значения находятся методами численного интегрирования.

Произведем количественную оценку величины векториальной погрешности поворота  $S$  в зависимости от выбранной модели прогноза поворота судна. Допустим, судно следует со скоростью  $V_o = 20$  узлов курсом  $K_o = 15^\circ$  и выполняет поворот на курс  $K_y = 105^\circ$ . Угол перекладки пера руля выбран  $\beta_k = 15^\circ$  и судно выполняет поворот с угловой скоростью  $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k = 2,7$  град/с с постоянной времени  $T_1 = 10,23$  с [7]. При перекладке руля была допущена погрешность  $\Delta\beta_k = 1^\circ$ . Рассчитаем векториальную погрешность  $S$  в случае прогноза поворота по простейшей модели первого порядка, для чего воспользуемся выражениями (2). Переводя градусную меру в радианную и выражая скорость судна в м/с, рассчитываем проекции  $x$  и  $y$  векториальной погрешности  $S$ :

$$x = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 0,1745 \cdot 2,7} (1,225) 0,1745 = -17,80 \text{ м},$$

$$y = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 2,7} (0,7071) = -10,27 \text{ м}.$$

Продолжительность поворота равна  $\tau = 33,3$  с, а величина векториальной погрешности составляет  $S = 20,6$  м.

При этих же исходных данных при прогнозе поворота судна по динамической модели второго порядка вначале методом простых итераций были рассчитаны продолжительности первой и второй фаз поворота судна  $\Delta t_k = 38$  с и  $\Delta t = 7$  с и продолжительностью поворота  $\tau = 45$  с. Численным интегрированием были определены координаты точки  $M$ :  $x_M = 348$  м и  $y_M = 235$  м, а также координаты точки  $N$ :  $x_N = 333$  м,  $y_N = 222$  м. Проекция векториальной погрешности  $x = -15$  м,  $y = -13$  м, а погрешность  $S = 19,8$  м.

Следует отметить, что реальное значение векториальной погрешности значительно больше, что обуславливается отличием реальной угловой скорости поворота судна от значений, рассчитанных с помощью моделей прогноза поворота судна. Так, в работе [8] указывается, что были выполнены натурные наблюдения траекторий поворота судна, на базе которых производилось имитационное моделирование поворота на  $90^\circ$  и было установлено, что при использовании для прогно-

за криволинейного участка математической модели с постоянной угловой скоростью траекторная погрешность, т. е. максимальное расхождение экспериментальной и модельной траекторий, составила порядка 150 ... 200 м, для модели второго порядка эта величина составила 35 ... 40 м.

Таким образом, значения векториальной погрешности, рассчитанные при прогнозе поворота судна по простейшей модели первого порядка и модели второго порядка, незначительно отличаются друг от друга, однако с учетом реальной криволинейной траектории поворота суммарная векториальная погрешность в первом случае прогноза может достигать до 220 м, а случае прогноза поворота по модели второго порядка - до 60 м, т. е. примерно в четыре раза меньше. Следовательно, для прогноза поворота судна предпочтительно пользоваться моделью второго порядка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения // Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
3. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И.И.Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2015. - Вып. 25. – С. 47 - 55.
4. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна/ И.И.Ворохобин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2016. - Вып. 26. – С. 56 - 59.
5. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления/ Л.Л. Вагущенко - Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.
6. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна/ Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 27. – С. 71 - 76.
7. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И.А. Бурмака // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2005. – №10. – С. 21 – 25.
8. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning./ Y. Kalinichenko, I. Burmaka//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2016. - 6/9 (84). - P. 20 - 31.

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ОПАСНЫХ КУРСОВ СУДОВ С УЧЕТОМ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При плавании судов в стесненных районах с интенсивными судопотоками безопасность судовождения обеспечивается системами управления движения судов, которые выбирают стратегию расхождения опасно сближающихся судов. При расчете момента времени начала уклонения судов необходимо учитывать их инерционность, иначе дистанция кратчайшего сближения будет меньше требуемой предельно-допустимой дистанции, что создает ситуацию их возможного столкновения.

В работе [1] рассмотрены вопросы эффективности парных маневров расхождения, а вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения исследуются в работе [2]. Принцип внешнего управления тремя судами для компенсации ситуационного возмущения с помощью опасной области курсов рассмотрен в работе [3]. В работах [3, 4] предложен способ формирования опасной области курсов сближающихся судов, с помощью которой определяется безопасный маневр расхождения изменением их курсов. Однако при расчете границ опасной области курсов, которые используются для определения курсов уклонения, не учитывается инерционность судов, что ведет к сближению судов на дистанциях меньше запланированных и вызывает угрозу столкновения.

Цель публикации – разработка процедуры формирования опасной области курсов судов с учетом их динамических характеристик поворотливости.

В работе [4] показано, что множество парных состояний двух опасно сближающихся судов можно представлять областью опасных курсов  $\Omega$ , которая отображается на плоскости курсов судов. Причем верхней и нижней границами области  $\Omega$  являются точки  $(K_1, K_2)$ , которые соответственно удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{aligned} K_2^{(1)} &= \gamma^{(1)} + \arcsin\left[\frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma^{(1)})\right]; \\ K_2^{(2)} &= \gamma^{(2)} + \arcsin\left[\frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma^{(2)})\right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\gamma^{(1,2)} = \alpha \pm \arcsin D_d / D$ ;  $\alpha$  и  $D$  - соответственно пеленг и дистанция между судами;  $D_d$  - предельно-допустимой дистанции сближения.

Как показано в работе [4], если точка  $(K_1, K_2)$  находится на границе или вне области опасных курсов  $\Omega$  угроза столкновения отсутствует ( $D_{\min} \geq D_d$ ), в противном случае дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$  меньше предельно-допустимой дистанции  $D_d$ , и сближение судов является опасным. Для безопасного расхождения необходимо выбрать точку  $(K_{1y}, K_2)$ , соответствующую курсу уклонения оперирующего судна  $K_{1y}$ , которая находится на границе области опасных курсов  $\Omega$ .

Если рассчитать границы области опасных курсов  $\Omega$  с помощью выражений (1), то, как следует из рис. 1, не будет учтена инерционность судна при повороте, и расхождение произойдет не в предельно-допустимой дистанции  $D_d$ , а на величину  $\Delta D_d$  ближе. Следовательно, для учета инерционности поворота необходимо предельно-допустимую дистанцию увеличивать до значения  $D_d + \Delta D_d$  и суда разойдутся на дистанции  $D_d$ .

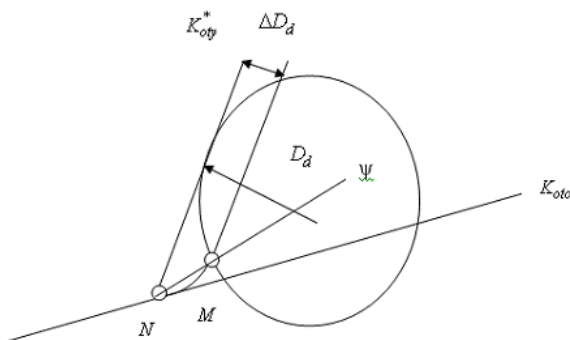


Рис. 1. Определение приращения дистанции  $\Delta D_d$

Найдем выражение для расчета приращения дистанции  $\Delta D_d$ , для чего обратимся к рис. 1, из которого следует:

$$\Delta D_d = MN \sin(K_{oty}^* - \psi),$$

где  $K_{oty}^*$  - относительный курс уклонения, который определяется выражением (рис. 1),

$$K_{oty}^* = \alpha - \arcsin D_d / D .$$

Если обозначить приращения относительных координат  $\Delta x_{ot}$  и  $\Delta y_{ot}$  за время поворота, то

$$\Delta x_{ot} = x_1 - x_2 , \quad \Delta y_{ot} = y_1 - y_2 , \quad (2)$$

где составляющие  $x_1$  и  $y_1$  - криволинейное движение оперирующего судна при повороте, а вторая составляющая  $x_2$  и  $y_2$  - прямолинейное движение цели без изменения параметров движения.

Очевидно, отрезок  $MN = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2}$ , а угол  $\psi = \arctg(\Delta x_{ot} / \Delta y_{ot})$ . Следовательно, окончательно выражение для расчета  $\Delta D_d$  имеет вид:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin[K_{oty}^* - \arctg(\Delta x_{ot} / \Delta y_{ot})] . \quad (3)$$

В работе [4] получены выражения для приращения координат  $x_1$  и  $y_1$  оперирующего судна в результате поворота при расчете их по модели вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью  $\omega_p$ :

$$x_1 = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_y^*) , \quad y_1 = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_y^* - \sin K_1) ,$$

где  $K_y^*$  - курс уклонения судна, причем его величина для встречных курсов судна и цели зависит от относительного курса  $K_{oty}^*$  [2],

$$K_y^* = K_{oty}^* + \arcsin \left[ \frac{V_2}{V_1} \sin(K_2 - K_{oty}^*) \right] .$$

Составляющие прямолинейного движения цели выражаются очевидным образом:

$$x_2 = V_2 \tau \sin K_2 ; \quad y_2 = V_2 \tau \cos K_2 ,$$

где продолжительность поворота  $\tau = (K_y^* - K_1) / \omega_p$ .

Следовательно, приращение относительных координат в рассматриваемом случае:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_y^*) - V_2 \frac{K_y^* - K_1}{\omega_p} \sin K_2 ,$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_y^* - \sin K_1) - V_2 \frac{K_y^* - K_1}{\omega_p} \cos K_2. \quad (4)$$

С учетом полученных приращений  $\Delta x_{ot}$  и  $\Delta y_{ot}$  по выражению (3) рассчитывается величина приращения  $\Delta D_d^{(1)}$  предельно-допустимой дистанции сближения для данной модели вращательного движения судна.

Для формирования модифицированной области опасных курсов  $\Omega$  с учетом инерционности судов при повороте в уравнениях границ необходимо предельно-допустимую дистанцию  $D_d$  увеличить на величину приращения дистанции  $\Delta D_d$ , т.е. уравнения границ (1) с учетом выражения для величины  $\gamma^{(1,2)}$  принимает вид:

$$K_2^{(1,2)} = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D} + \arcsin \left\{ \frac{V_1}{V_2} [\sin(K_1 - \alpha \mp \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D})] \right\}.$$

Произведена численная оценка значения приращения предельно-допустимой дистанции сближения  $\Delta D_d$  для рассмотренной модели вращательного движения судна. В качестве примера выбраны характеристики поворотливости балкера «Sheila Ann» при угле кладки пера руля  $10^\circ$ , которые были получены натурными наблюдениями в реальных условиях эксплуатации [5]:  $\omega_p = 0,5422$  градус/с. В примере рассмотрена следующая ситуация опасного сближения:  $K_1 = 45^\circ$ ,  $V_1 = 15$  узлов,  $K_2 = 315^\circ$ ,  $V_2 = 20$  узлов,  $\alpha = 100^\circ$ ,  $D = 3$  мили,  $D_d = 1$  мили. В данной ситуации прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min} = 0,1$  мили. Расчетом параметров уклонения судна вправо, получено  $K_{ot}^* = 120^\circ$ ,  $K_y^* = 99^\circ$ .

Определены характеристики маневра уклонения при использовании модели вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью. Продолжительность поворота  $\tau = 99,6$  с, приращение координат оперирующего судна за это время  $x_1$ ,  $y_1$  и цели  $x_2$ ,  $y_2$ , рассчитанные с помощью выражений (4):

$x_1 = 703,6$  м;  $y_1 = 228,7$  м;  $x_2 = -724,3$  м;  $y_2 = 723,7$  м, – следовательно  $\Delta x_{ot} = 1427,9$  м,  $\Delta y_{ot} = -495,0$  м, а также  $MN = 1511,2$  м,  $\psi = -70,9^\circ$  и  $\Delta D_d = 0,154$  мили.

Таким образом, при расчете границ области опасных курсов  $\Omega$  с помощью выражения (1) выбор маневра расхождения курсом уклоне-

ния судна  $K_{1y}$ , обеспечивающего положение точки ( $K_{1y}$ ,  $K_2$ ) на границе области  $\Omega$ , вместо ожидаемой дистанции расхождения 1 мили обеспечит меньшую дистанцию, как следует из примера, равную 0,846 мили. Поэтому при расчете границ области опасных курсов  $\Omega$  надлежит предельно-допустимую дистанцию сближения увеличить на  $\Delta D_d$ , т.е. в приведенном примере при расчете границ области опасных курсов следует выбрать предельно-допустимую дистанцию сближения вместо 1 мили, равную 1,154 мили, что обеспечит кратчайшее сближение на расстоянии 1 мили при использовании области  $\Omega$ .

Для расчета границ области  $\tilde{\Omega}$  с учетом инерционности судов при повороте разработана компьютерная программа, в которой приращения координат судов при повороте рассчитывались с помощью модели вращательного движения с постоянной угловой скоростью. Вначале в режиме отсутствия учета инерционности судна при повороте программой рассчитывались границы опасной области  $\Omega$  с предельно-допустимой дистанцией  $D_d$  для ситуации опасного сближения, параметры которой приводились выше. На рис. 2 показана область опасных курсов  $\Omega$ , которая сформирована без учета инерционности судна и по ее верхней границе определяется стандартный курс уклонения равный  $99^\circ$ , при этом расчетное значение  $D_{\min} = 1,00$ , хотя реальная дистанция кратчайшего сближения составляет 0,846 мили. При учете инерционности судна программой рассчитываются границы модифицированной области опасных курсов  $\tilde{\Omega}$  по предельно-допустимой дистанции  $D_d + \Delta D_d$ , в нашем примере равной 1,154 мили, которые показаны на рис. 3. Следует обратить внимание, что размеры области опасных курсов  $\tilde{\Omega}$  увеличились. По верхней границе области  $\tilde{\Omega}$  определен курс уклонения  $K_{1y} = 106^\circ$ , при котором расчетное значение  $D_{\min} = 1,154$  мили, а реальное значение с учетом инерционности равно 1,00 мили.

Для расхождения в заданной предельно-допустимой дистанции сближения с учетом инерционности судна курс уклонения отличается от стандартного курса (в приведенном примере на  $7^\circ$ ). Это обстоятельство учтено при формировании модифицированной области опасных курсов  $\tilde{\Omega}$ .

Предложена процедура формирования опасной области курсов судов с учетом их инерционности, которая позволяет уточнить курс уклонения судна, повышая безопасность процесса расхождения.



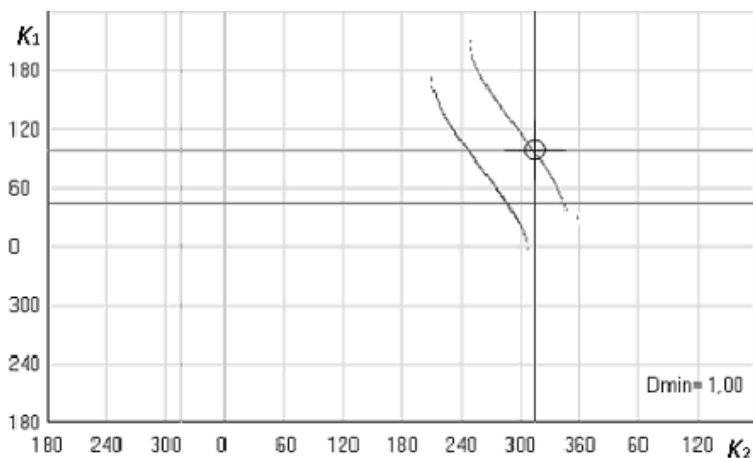


Рис. 2. Определение курса уклонения судна по границе области  $\Omega$

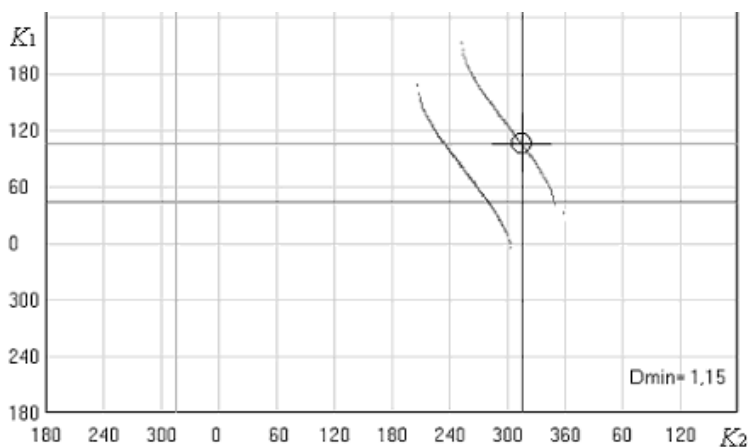


Рис. 3. Выбор курса уклонения судна с помощью границы области  $\tilde{\Omega}$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2008. – Вып. 15. - С. 166 – 171.

2. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
3. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014.– Вып. 20. - Одесса: ОНМА. - С. 18 - 23.
4. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия). – 2016. - 585 с.
5. Чапчай, Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Е.П. Чапчай // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2006. – Вып. 11. - С. 139 – 142.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ СУДОВ ПРИ ВНЕШНЕМ  
УПРАВЛЕНИИ ИХ ПРОЦЕССОМ РАСХОЖДЕНИЯ

Наличие навигационных опасностей или мешающих судов при опасном сближении судов в стесненных водах могут создать ситуации, при которых их расхождение маневром изменения курса невозможно, что обуславливает необходимость использования маневра расхождения изменением скорости.

Работа [1] посвящена вопросам предупреждения столкновений судов маневром изменения скорости при локально-независимом управлении, а процедура расчета оптимального маневра расхождения снижением скоростей судов при внешнем управлении рассмотрена в работе [2].

Цель данной статьи - разработка процедуры выбора оптимального маневра расхождения судов снижением скорости активным и пассивным торможением.

При внешнем управлении процессом расхождения судов [3] в ситуации, когда нет возможности выполнить маневр расхождения изменением курсов, приходится применять маневр снижения скоростей судов торможением. При этом необходимо выбрать режим торможения каждого из судов, после чего требуется определить тип оптимального маневра расхождения снижением скоростей судов. В общем случае различают два типа оптимальных маневров расхождения судов снижением скоростей в зависимости от параметра оптимизации маневра, хотя в обоих случаях критерием оптимальности является потеря ходового времени судов на маневр расхождения, которую необходимо минимизировать [4]. Маневр расхождения снижением скорости при заданных режимах торможения каждого из судов характеризуется следующими параметрами: общим моментом времени начала маневра торможения обоих судов  $t_n$ , безопасными скоростями уклонения первого  $V_{1y}$  и второго  $V_{2y}$  судов [4]. При первом типе оптимального маневра расхождения выбираются допустимые значения  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ , которые обеспечивают существование непустого множества безопасных маневров расхождения снижением скорости. Оптимизация производится по параметру  $t_n$ , величина которого определяется из условия равенства дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min}$  с предельно-

допустимой дистанцией  $D_d$  в момент окончания переходного процесса, т.е.  $D_{\min}(t_n) = D_d$ .

Особенность второго типа оптимального маневра расхождения - фиксированное значение момента начала торможения судов, равное нулевому моменту времени  $t_n = 0$ , а оптимизация производится по параметрам  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ , которые минимально отличаются от начальных значений соответствующих скоростей  $V_1$ ,  $V_2$  и обеспечивают равенство  $D_{\min}(V_{1y}, V_{2y}) = D_d$  к моменту окончания переходного процесса, который совпадает с моментом времени кратчайшего сближения.

В данной статье рассмотрим тип оптимального маневра расхождения, рассматривая ситуацию, когда первое судно снижает скорость активным торможением, а второе – пассивным торможением.

В этом случае, как показано в работе [5], элементы процесса активного торможения первого судна: интервал времени  $\tau_1$  снижения скорости до значения  $V_{1y}$  и пройденное судном расстояние  $S_1$  за этот интервал времени определяются из выражений:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{m_1}{\mu V_{yp1}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{V_1}{V_{yp1}} - \operatorname{arctg} \frac{V_{1y}}{V_{yp1}} \right]; \\ S_1 &= \frac{m_1}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + V_{yp1}^2}{V_{1y}^2 + V_{yp1}^2} \right|,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $m_1$  – масса первого судна;  $\mu$  – коэффициент сопротивления;  $V_{yp1}$  – установившаяся скорость, которая пропорциональна упору винта  $P$ .

Элементами процесса пассивного торможения второго судна являются интервал времени  $\tau_2$ , за который скорость снижается до значения  $V_{2y}$  и пройденное судном за этот интервал времени расстояние  $S_2$ , причем [5]:

$$\begin{aligned}\tau_2 &= \frac{m_2}{\mu} \left( \frac{1}{V_{2y}} - \frac{1}{V_2} \right); \\ S_2 &= \frac{m_2}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $m_2$  – масса второго судна.

В зависимости от соотношения величин  $\tau_1$  и  $\tau_2$  определяются расстояния  $L_1$  и  $L_2$ , которые проходят первое и второе суда до момента времени окончания переходного процесса, что необходимо для расчета значения дистанции кратчайшего сближения. Если справедливо неравенство  $\tau_1 > \tau_2$ , то:

$$L_1 = S_1;$$

$$L_2 = S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2).$$

По окончании переходного процесса  $t_p$  координаты судов  $X_{1p}$ ,  $Y_{1p}$ ,  $X_{2p}$  и  $Y_{2p}$  определяются следующими выражениями:

$$X_{1p} = L_1 \sin K_1 = S_1 \sin K_1;$$

$$Y_{1p} = L_1 \cos K_1 = S_1 \cos K_1;$$

$$X_{2p} = L_2 \sin K_2 = [S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2)] \sin K_2;$$

$$Y_{2p} = L_2 \cos K_2 = [S_2 + V_{2y}(t_p - \tau_2)] \cos K_2.$$

В момент времени окончания переходного процесса  $t_p$  параметры движения обоих судов, как и относительный курс  $K_{оп}$ , становятся неизменными, а дистанция кратчайшего сближения судов

$$D_{\min} = \text{Abs}[D_p \sin(K_{оп} - \alpha_p)], \quad (3)$$

в которой значения пеленга  $\alpha_p$  и дистанции  $D_p$  на момент времени  $t_p$  окончания переходного процесса изменения скоростей определяются выражениями:

$$D_p = \sqrt{(X_{1p} - X_{2p})^2 + (Y_{1p} - Y_{2p})^2};$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{1p} - X_{2p}}{D_p}.$$

В случае же  $\tau_1 < \tau_2$ :

$$L_1 = S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1);$$

$$L_2 = S_2.$$

Координаты судов на момент окончания переходного процесса  $t_p$  определяются выражениями:

$$X_{1p} = L_1 \sin K_1 = [S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1)] \sin K_1;$$

$$Y_{1p} = L_1 \cos K_1 = [S_1 + V_{1y}(t_p - \tau_1)] \cos K_1;$$

$$X_{2p} = L_2 \sin K_2 = S_2 \sin K_2;$$

$$Y_{2p} = L_2 \cos K_2 = S_2 \cos K_2 .$$

Причем для расчета  $D_{\min}$  с помощью формулы (3) принимаются величины  $\alpha_p$  и  $D_p$  :

$$D_p = \sqrt{(X_{2p} - X_{1p})^2 + (Y_{2p} - Y_{1p})^2} ;$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{2p} - X_{1p}}{D_p} .$$

Таким образом, выбирая режимы торможения судов и задаваясь значениями их скоростей расхождения  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ , с помощью выражений (1) и (2) определяются элементы процесса торможения  $\tau_1$ ,  $S_1$ ,  $\tau_2$  и  $S_2$ . Исходя из соотношения величин  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , по формуле (3) рассчитывается дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$ , с помощью которой оценивается степень оптимальности выбранных скоростей расхождения  $V_{1y}$  и  $V_{2y}$ . Так как при начальных скоростях  $V_1$  и  $V_2$  судов сближение является опасным и  $D_{\min} < D_d$ , то для поиска оптимальных значений  $V_{1y}^*$  и  $V_{2y}^*$  надлежит равномерно уменьшать начальные скорости  $V_1$  и  $V_2$  обоих судов на величину  $\Delta V$ , т.е.  $V_{1yi} = V_1 - i\Delta V$  и  $V_{2yi} = V_2 - i\Delta V$ . При этом после каждого уменьшения скоростей для значений  $V_{1yi}$  и  $V_{2yi}$  рассчитывается возрастающее значение  $D_{\min i}$ , величина которого сравнивается с  $D_d$ . Процесс повторяется до тех пор, пока не достигается равенство  $D_{\min}(V_{1y}^*, V_{2y}^*) = D_d$ . При этом определяем оптимальные значения скоростей расхождения  $V_{1y}^*$  и  $V_{2y}^*$ .

Описанный алгоритм определения оптимальных значений скоростей расхождения методом последовательных приближений реализован компьютерной программой, позволяющей генерировать начальные ситуации опасного сближения судов и находить оптимальные значения скоростей расхождения.

Рассмотрим ситуацию опасного сближения судов, которая характеризуется начальными данными  $\alpha = 229^\circ$ ,  $D = 5$  миль,  $V_1 = 18$  узлов,  $V_2 = 19$  узлов,  $K_1 = 267^\circ$ ,  $K_2 = 24^\circ$ ,  $D_d = 1$  миля, причем  $D_{\min} = 0,48$  мили. Маневр расхождения предусматривает снижение скорости первого судна активным торможением, а второго - пассивным торможением.

На рис. 1 показана область недопустимых скоростей судов для за-

данной начальной ситуации, и точка с координатами ( $V_1=18$ ,  $V_2=19$ ) принадлежит недопустимой области. Снижая скорости судов, смещаем положение точки ( $V_{1yi}$ ,  $V_{2yi}$ ) относительно начального положения в сторону границы области, пока при значениях  $V_{1y}^*=16$  и  $V_{2y}^*=11,5$  дистанция  $D_{\min}$  не достигнет значения 1,01 мили, а точка ( $V_{1y}^*$ ,  $V_{2y}^*$ ) – границы недопустимой области скоростей. Корректность полученного результата подтверждена имитационным проигрыванием маневра расхождения.

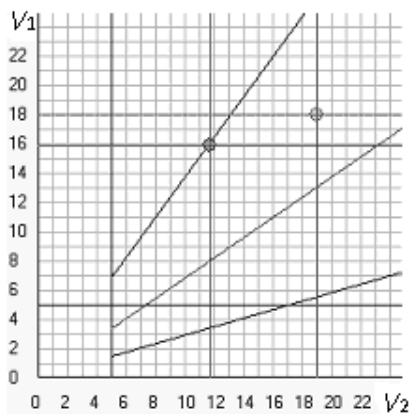


Рис. 1. Определение оптимальных скоростей расхождения  $V_{1y}^*$  и  $V_{2y}^*$

Таким образом, при внешнем управлении процессом расхождения судов в стесненных условиях в ряде ситуаций целесообразно выбрать маневр расхождения одновременным снижением скоростей обоих судов активным или пассивным торможением. При этом получена процедура оптимизации параметров маневра расхождения снижением скорости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюпиков Е.Е. Зависимость момента начала маневра расхождения изменением скорости от инерционных характеристик судна / Тюпиков Е.Е., Цымбал Н.Н. // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА – 2007. – Вып. 14. – С. 130 – 135.
2. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближе-

ния / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия). – 2016. - 585 с.

3. Пятаков Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э. Н., Бужбецкий Р. Ю., Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. – Херсон: Гринь Д.С. - 2015. - 312 с.

4. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. - 2017 - Вып. 27. – С. 32 – 37.

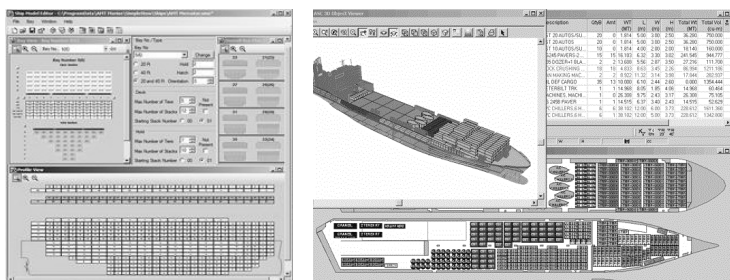
5. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.



## ВЫБОР ДАТЧИКОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЗАГРУЗКИ СУДНА

По данным [1, 2] после преодоления кризисного состояния мировой экономики, резко обозначившегося с 2008 года, начиная с 2010 года наблюдается и прогнозируется рост объема грузоперевозок морским транспортом.

Для автоматизации современных контейнеровозов применяются различные специализированные компьютерные системы по расчету прочности и остойчивость судна, а также проверке плана загрузки (рис. 1).



На рис. 2 представлена схема расположения блока измерения координат контейнера на спредере, который включает в себя программируемый контроллер (PLC) со встроенным Web-сервером, модуль Wi-Fi, блок датчиков [5].

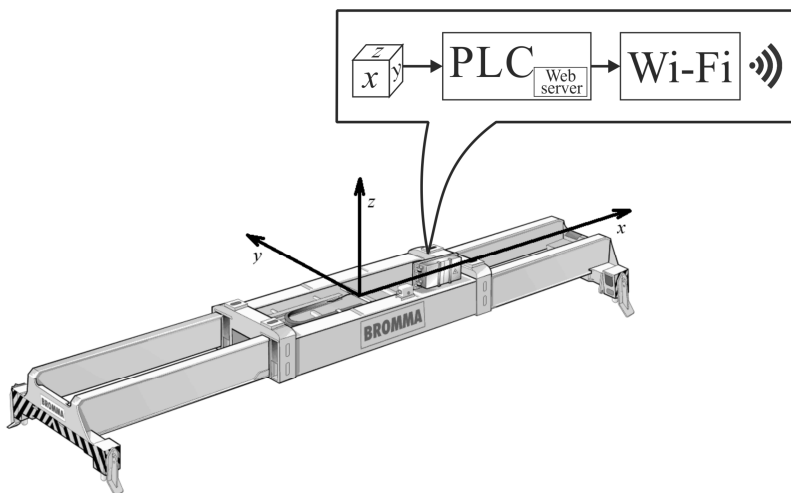


Рис. 2. Установка акселерометра на спредер

В настоящее время для определения координат используются следующие типы систем и датчиков: GPS, ИНС, БИНС, акселерометры, гироскопы, гирокомпасы. Проанализируем возможность использования этих систем и датчиков для компьютерной системы учета загрузки контейнеровоза.

При использовании GPS для регистрации перемещения контейнера в пространстве в качестве основной системы суммарная погрешность при влиянии всех составляющих для измерения псевдодальности составляет более 13 метров, что недопустимо при стандартных габаритных размерах 20-ти футового контейнера 6,1x2,4x2,8 м.

В отличие от GPS инерциальные навигационные системы (ИНС) имеют преимущества [6]:

- высокая информативность и универсальность применения;
- полная автономность действия;
- высокая помехозащищенность;
- возможность высокоскоростной выдачи информации (до 100 Гц и выше).

Однако недостатком таких систем является то, что в своем составе ИНС используют гиросtabilизированные платформы, являющиеся сложными и дорогостоящими техническими устройствами.

Этого недостатка лишены бесплатформенные навигационные системы БИНС, которые по сравнению с ИНС имеют следующие преимущества:

- меньшие размеры, массу и энергоемкость;
- существенное упрощение механической части системы и ее компоновки и, как следствие, повышение надежности системы;
- сокращение времени установки начальных параметров;
- универсальность системы, поскольку переход к определению тех или иных параметров навигации осуществляется алгоритмически.

К главному недостатку БИНС-систем относят ошибки, которые накапливаются при долговременной и непрерывной работе (как правило, более шести часов), однако в разработанной компьютерной системе долговременная и непрерывная работа не предусмотрена спецификой работы – погрузочно/разгрузочными работами (загрузка одного контейнера происходит в течении двух минут).

В данных системах угловые скорости объекта измеряются гироскопами, а переносные ускорения – акселерометрами.

Классификация гироскопов и акселерометров выполнена на основе [7 - 10] после анализа и корректировки (рис. 3 и 4).

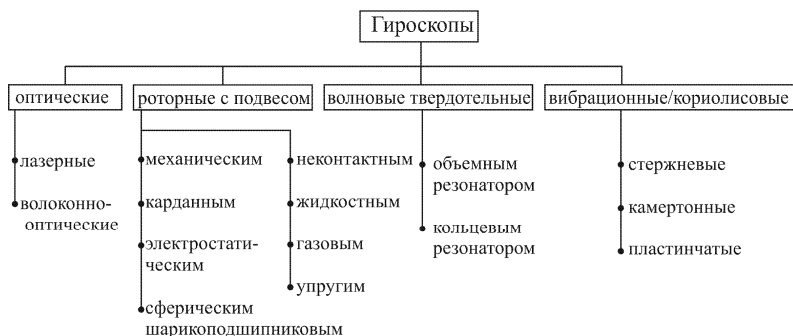


Рис. 3. Классификация гироскопов

Перед выбором гироскопа и акселерометра необходимо определиться с типом измеряемых параметров, которые присутствуют при погрузочно/разгрузочных работах.

В процессе работы эти параметры меняются и проходят три стадии:

- ударное ускорение в начале работы;

движение в процессе перемещения контейнера;  
ударное ускорение в конце погрузки контейнера.

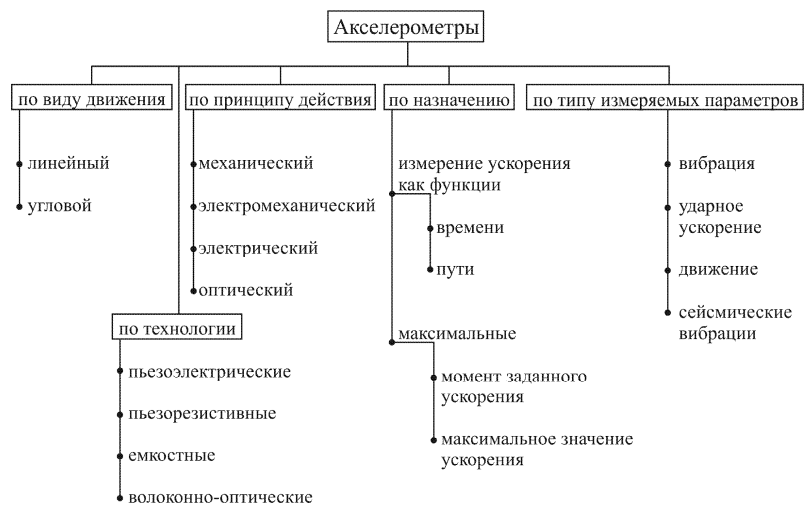


Рис. 4. Классификация акселерометров

В результате анализа [11] была синтезирована табл. по видам ударного ускорения в соответствии с применяемым к объекту воздействием.

Таблица  
Ударное ускорение в соответствии с силой воздействия

Вид ускорения и зона регистрации	Сила воздействия, г
Низкий уровень	< 500
Столкновение	< 2000
Дальняя зона	500 ... 1000, датчик на расстоянии 2 м от точки удара
Ближняя зона	> 5000, датчик на расстоянии менее 1 м от точки удара

Детальный анализ этой группы ударных ускорений позволило сделать следующие выводы.

Для измерения малых ударных ускорений оптимально использовать акселерометры общего применения. Акселерометр должен иметь

линейный диапазон до 500 г и максимально допустимую ударопрочность 500 г. Обычно для этого используются датчики с выходным сигналом по напряжению, т.к. они менее чувствительны к вибрациям кабеля. Для ослабления резонанса рекомендуется использовать усилитель с фильтром нижних частот.

Большие ударные ускорения применяются в случае тестовых испытаний автотранспорта на безопасность при моделировании аварийных ситуаций и в разработанной компьютерной системе не могут быть использованы.

Для измерения ударов в дальней зоне применяются специализированные акселерометры со встроенным фильтром и сдвиговой модой. Электронный фильтр уменьшает собственную резонансную частоту акселерометра, предотвращая перегрузку оборудования.

Рабочий диапазон акселерометров для измерения в ближней зоне может достигать свыше 20 тыс. г. В этом случае используются устройства со встроенным механическим фильтром и параметрами, сопоставимыми с параметрами акселерометров дальней зоны.

Проведем анализ акселерометров (рис. 4), выполненных по различным технологиям, для использования в разработанной компьютерной системе.

Волоконно-оптические акселерометры [12, 13] используются в основном, как датчики вибраций и в разработанной системе могут применяться только как дополнительные датчики нивелирования данного паразитного эффекта. Пьезорезистивные акселерометры имеют низкую чувствительность и используются для измерения ударного ускорения и в меньшей степени – при измерении вибраций. Они широко применяются в испытаниях на ударную прочность при столкновении с препятствием и использование их в нашей системе малоэффективно. Емкостные акселерометры используются для измерений низкочастотных вибраций, движения и установившегося ускорения, но не предназначены для регистрации ударного ускорения.

Пьезоэлектрические акселерометры наиболее широко применяются в устройствах по тестированию и измерениям. Эти устройства работают в очень широком диапазоне частот (от нескольких Гц до 30 кГц) и имеют различную чувствительность, вес, размеры и форму. Они имеют зарядовый выход или выход по напряжению и применяются для измерения движения и ударов.

Однако пьезокерамика обладает следующими недостатками.

1. Нестабильность параметров материала во времени и при изменении температуры окружающей среды. Одним из важнейших параметров акселерометра является крутизна функциональной зависимости

сти выходного сигнала от измеряемого ускорения во всем диапазоне измерений. Если этот параметр линеен, он называется масштабным коэффициентом и зависит от температуры окружающей среды, в которой работает акселерометр. Эта зависимость объясняется влиянием температуры на электромеханические компоненты, составляющие собственно акселерометр – датчик, формирующий выходной электрический сигнал как функцию измеряемого ускорения, и электронные компоненты схемы обработки сигнала акселерометра [14].

2. При возбуждении пьезоэлемента на резонансной частоте на его электродах появляются переменные заряды, величина и фаза которых определяются амплитудой и фазой механических колебаний пьезоэлемента и соответственно внешнего возбуждающего напряжения и тока через него. Возникает резонансная зависимость сопротивления пьезоэлемента от частоты возбуждающего напряжения.

3. Гистерезис и зависимость перемещения при действии постоянной и переменной нагрузками. Режим переменной нагрузки является рабочим режимом. Введение в схему постоянной нагрузки позволяет сместить петлю гистерезиса. При проектировании предварительная нагрузка должна быть не менее  $1/10$  от жесткости пьезоэлемента [15].

4. При воздействии на пьезоэлемент электрического поля, он деформируется и при этом у него, как и у многих других твердых тел, наблюдается релаксация, характеризуемая временем перехода в равновесное состояние. Если при чисто механической деформации это связано только с потерями на внутреннее трение, то в данном случае можно говорить о совокупном влиянии диэлектрических и механических потерь. Механическая релаксация пьезокерамики – это последствие (или ползучесть). Величина деформации ползучести для различных пьезоматериалов может находиться в пределах от 4 до 20 % от общего перемещения. Время релаксации также может колебаться от десятых долей секунды до нескольких часов. В отличие от ползучести, последствие представляет собой деформацию пьезоматериала после снятия электрического напряжения и имеет практически такие же численные значения характеристик.

Нивелирование рассмотренных недостатков возможно путем изменения режимов работы пьезоэлементов [16, 17].

Таким образом, в результате анализа существующих типов компонентов для измерения координат, типа измеряемых параметров, в связи со спецификой перемещаемого объекта проведено обоснование выбора пьезокерамики в качестве материала для блока датчиков в составе измерительного блока компьютерной системы учета загрузки контейнеровоза.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Review of Maritime Transport 2015 [Електронний ресурс]. - Режим доступа: [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf) (дата обращения: 27.08.2017).
2. WTO Annual Report 2015 [Електронний ресурс]. - Режим доступа: [https://www.wto.org/english/res\\_e/booksp\\_e/anrep\\_e/anrep15\\_e.pdf](https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/anrep_e/anrep15_e.pdf) (дата обращения: 02.09.2017).
3. Нікольський В.В. Система підтримки прийняття рішення по навантаженню великотоннажного контейнеровоза / В.В. Нікольський, М.В. Нікольський, Ю.А. Накул // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. – Серія: “Комп’ютерні технології”. – Вип. 271. – Т. 283. – Миколаїв, 2016. – С. 60 – 63.
4. Нікольський В.В., Накул Ю.А., Стовманенко В.С. Система контролю завантаження контейнеровозів / В.В. Нікольський, Ю.А. Накул, В.С. Стовманенко // Судовождение, – 2017. – Вип. 27. Одесса: НУ "ОМА". – С. 127 – 136.
5. Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вип. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 39 – 46.
6. Доросинский Л.Г., Богданов Л.А. Основы и принципы построения инерциальных навигационных систем // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. [Електронний ресурс]. - Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14356> (дата обращения: 04.09.2017).
7. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Отдельное издание для вузов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
8. Сандлер А.К., Никольский В.В., Хнюнин С.Г. Использование волоконно-оптических устройств для предотвращения техногенных катастроф на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. - 2004. - Вип. 9. - Одесса: ОНМА. – С. 82 – 90.
9. Никольский, В.В., Сандлер, А.К., Стеценко, М.С. Пьезоэлектрические датчики перемещений. //Автоматика-2004: матеріали 11 міжнародної конференції по автоматичному управлінню – Київ: НУХТ. – 2004. – С. 46.
10. Никольский, В.В., Сандлер, А.К. П'єзооптичний акселерометр: Деклараційний патент України № 71295А, МПК 7G01M11/00 – заявл. 18.12.2003. // Опубл. 15.11.2004, бюл. № 11.
11. Bruce Lent. Endeveco Corp. Simple Steps to Selecting the Right Accelerometer [Електронний ресурс] – Опубл. 01.03.2009. – Режим доступа:

типа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2193/doc/48429/>,  
<http://www.sensorsmag.com/components/simple-steps-to-selecting-right-accelerometer> (дата обращения: 02.09.2017).

12. Сандлер, А.К., Никольский, В.В. Разработка пьезооптического акселерометра для диагностирования энергоустановок. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кировоград: КДТУ. – 2004. – № 14. – С. 329 – 338.

13. Сандлер, А.К., Никольский, В.В. Разработка пьезооптического акселерометра для диагностирования энергоустановок. // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кировоград: КДТУ. – 2004. – № 14. – С. 329 – 338.

14. Алалуев Р.В., Иванов Ю.В., Малютин Д.М., Распопов В.Я., Дмитриев В.А., Ермилов С.П., Ермилова Г.А. Высоточная алгоритмическая компенсация температурной неустойчивости масштабного коэффициента акселерометра / Р.В. Алалуев, Ю.В. Иванов, Д.М. Малютин, В.Я. Распопов, В.А. Дмитриев, С.П. Ермилов, Г.А. Ермилова // Датчики и системы, 2009. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukarus.com/vysokotochnaya-algoritmicheskaya-kompensatsiya-temperaturnoy-nestabilnosti-masshtabnogo-koeffitsienta-akselerometra> (дата обращения: 02.09.2017).

15. Piezo Motion for Precision Positioning Introduction [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pi-usa.us/tutorial/4\\_24.html](http://www.pi-usa.us/tutorial/4_24.html) (дата обращения: 02.09.2017).

16. Джагулов Р.Г., Плавинский Е.Б., Никольский В.В., Веретенник А.М. Измерительные преобразователи: учебное пособие. – Одесса: Астропринт, 2002. – 216 с.

17. Хнюнін С.Г. Моделі, методи та засоби створення комп'ютерної системи визначення ефекту Коанда на базі п'єзоперетворювачів: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Хнюнін Сергій Герогійович. – Миколаїв, 2017. – 156 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chmnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/04/dis.pdf> (дата обращения: 18.09.2017).



Нікольський В.В., Лисенко В.Є., Нікольський М.В.  
 НУ “ОМА”

## ВИКОРИСТАННЯ П'ЄЗОПРИВОДУ ДЛЯ КЛАПАНА ПОДАЧІ ГАЗУ ДВОХПАЛИВНОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Однією з умов безпечної експлуатації суден LNG є підтримка в вантажних танках постійної температури вантажу. Однак, газ, все одно, випаровується. Можливих варіантів запобігання вибуху судна два: викидати газ в навколишнє середовище або утилізувати в дизелі. Природно, що найбільш прийнятним є другий спосіб, але, в той же час, він є найбільш складним з конструктивної точки зору [1, 2].

Серед загальноновизнаних лідерів з розробки та виробництва суднових дизельних двигунів є компанія Wärtsilä, яка останнім часом часто демонструє свою прихильність до природного газу в якості альтернативного палива. І як результат, на сьогоднішній день, вони вже мають у своєму арсеналі силові установки (тип DF) [3], які працюють на двох видах палива - дизель і газ. Займаючись розробкою двигунів і супутніх систем, в системі подачі палива (рис. 1) компанією використовується електромагнітний соленоїдний клапан для подачі газу фірми Woodward SOGAV-250 (рис. 2) [4].

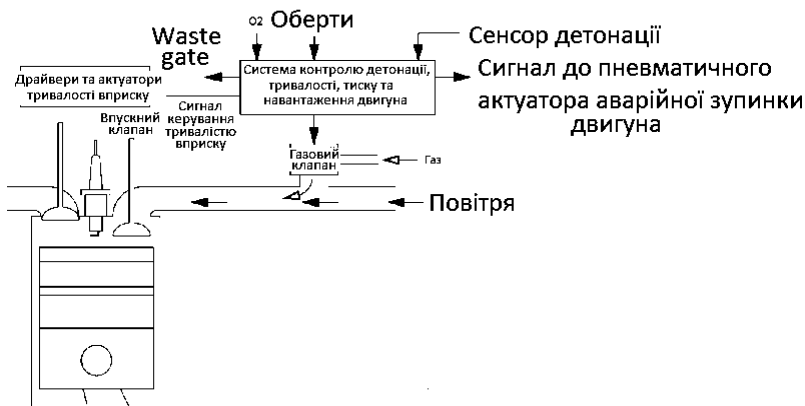


Рис. 1. Структурна схема системи подачі палива

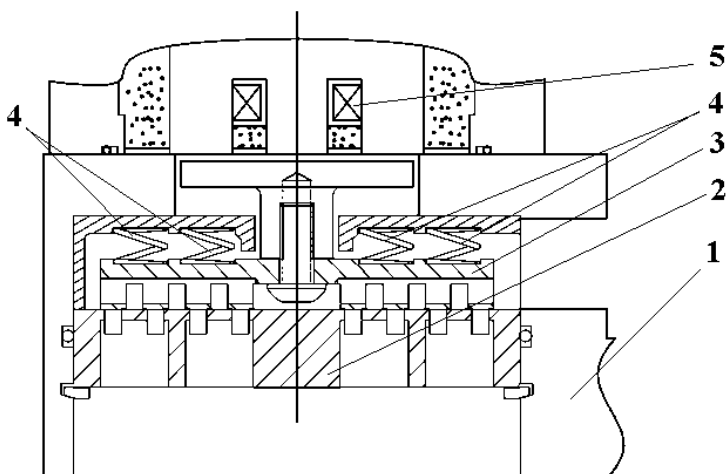


Рис. 2. Конструкція SOGAV – 250: 1 – корпус клапану; 2 – нижній упор; 3 – пластина; 4 – блок пружин; 5 – електромагнітний соленоїд

В процесі експлуатації SOGAV–250 спостерігається погіршення робочих характеристик, а саме:

- залипання електромагнітного клапану, яке призводить до зносу пари клапан-сідро;
- неможливо впоратися з великою різницею тисків. Якщо перепад тиску завеликий, клапан не відкривається;
- термін служби клапану тільки 4000 годин;
- час відкриття та закриття клапану 2 – 4 мс;
- процеси коливання в електромагнітному соленоїду, що приводить до раннього закриття клапану, або неповного відкриття (рис. 3).

Ці недоліки обумовлені використанням соленоїду.



Рис. 3. Часова діаграма відкриття клапану

Метою цього дослідження є визначення самої можливості застосування п'єзоприводу для управління клапаном подачі газу.

Було висунуто гіпотезу, що згідно з аналогією з автомобільним паливним газовим устаткуванням фірми Bosch, де використовуються складальні п'єзоелектричні пакети, використання їх та лінійних п'єзодвигунів для переміщення клапану подачі газу замість електромагнітних соленоїдів, дозволить усунути сучасні недоліки.

Для визначення початкових умов застосування п'єзоприводу проведено аналіз основних експлуатаційних вимог до SOGAV–250: час до повного відкриття / закриття (мах) – 0,002 сек.; ліміт току (не більше ніж 2 сек.) – 10 А; ліміт напруги – 24 В; максимальні витоки в закритому стані (0,0048 м<sup>3</sup>/мін) – 0,28 м<sup>3</sup>/ч; величина переміщення пластини клапану – ~ 0,4 (0,38 - 0,43) мм; максимальний тиск газового палива P1/ продувочного повітря P2 (абсолют) – 5/3 Бар; максимальна різниця тисків P1-P2 – 2 Бар; максимальна температура газового палива – 80 °С; робоча температура газового палива – 5 - 45 °С; робоча температура продувочного повітря – 30 - 55 °С.

В результаті аналізу вимог, які наведені в табл. 1, були встановлені найбільш критичні: час до повного відкриття / закриття; величина переміщення пластини клапану; максимальна різниця тисків.

В [5] наведені результати дослідження причини поведінки клапану SOGAV–250. Встановлено, що основна причина такої поведінки – виникнення коливань в електромагнітному соленоїді. І, як варіант, були проведені дослідження цифрової гідравлічної системи з гідравлічним циліндром з використанням два і чотири DFCUs [5, 6] і цифрової пневматичної системи клапанів. Також проведено дослідження трьох варіантів управління цими клапанами, а також оптимізація. Проте, у всіх випадках, все-рівно, залишається електромагнітний привод виконавчого механізму зі всіма недоліками, які притаманні їм.

У ряді досліджень [7] згадується про використання п'єзокерамічних стовпів і реверсивних лінійних двигунів, яким притаманні переваги в порівнянні з електромагнітними приводами.

В [7, 8] наведено порівняльні дослідження електромагнітних і електромеханічних приводів зі складальними п'єзостовпами та двигунами. Встановлено, що питоме зусилля до площі активної поверхні на порядок більше для п'єзоелектричної кераміки.

Застосування п'єзоприводу також дозволить збільшити термін служби клапану від 5000 год. до 50000, зберегти характеристики його роботи (табл. 1) та зменшити експлуатаційні витрати на обслуговування дизеля.

Аналіз табл. 1 дозволяє зробити висновок, що для заміни соленоїду можливе використання від біморфного ПР до роторного ПЕД.

## Конструктивні рішення

Тип приводу	Маніпулятори			Двигуни	
Конструкція п'єзореzonатору (ПР)	циліндр	біморф	стовп	лінійні (ЛПД)	роторні (ПЕД)
Довжина ходу рухомого циліндра	<0,1 мкм		<0,5 мм	>5 мм	$n=0\div 5$ Гц

В основі всіх ПР лежать п'єзоелементи з двома типами поляризації: поперечної і подовжньої. На рис. 4 наведені три типа ПР, які на теперішній час використовуються у виконавчих механізмах: актуаторах та п'єзодвигунах.

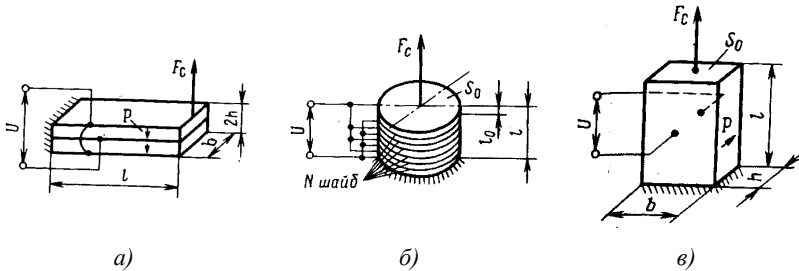


Рис. 4. Типи ПР: а - біморфна, консольно закрита пластина (деформація кінця консолі); б - складальний пакет пластин, що працює на подовжньому п'єзо-ефекті; в - елемент, що працює на поперечному п'єзоелекті;  $F_c$  – розвинуте зусилля;  $U$  – напруга, яка подається до ПР;  $S_0$  – площа ПР;  $l$  – довжина;  $b$  – товщина;  $p$  – поляризація

Слід зазначити, що сучасні ПР працюють в широкому діапазоні температур. Однак, використання 3-D принтерів при виготовленні двигунів, з одного боку, спростило процес виготовлення, а з другого – знизило температурний діапазон використання за рахунок пластмас, які застосовуються. Тому перевагу слід віддавати конструктивним елементам, які виготовлені з металу. Це дозволяє розширити температурний діапазон до  $+80$  °С. Лінійні двигуни забезпечують швидкості до 0,7 м/с, роторні ПЕД до 300 об/хв. [9, 10].

Таким чином, подальші дослідження доцільно направити на розробку конструкції приводу клапану подачі газу, визначення варіанту управління, розробки програмно-технічного комплексу - комп'ютерної системи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tajima, H. and Tsuru, D. 2013. Reduction of Methane Slip from Gas Engines by O<sub>2</sub> Concentration Control using Gas Permeation Membrane: <http://papers.sae.org/2013-01-2618/> Cited 12.06.2017.
2. Masters of gas engine technology. Twenty-four7, 01/2013. Available: <http://www.wartsila.com/file/Wartsila/en/1278531145652a1267106724867-Masters-of-Gas-Engine-Technology.pdf>. Cited 17.10.2013.
3. Wartsila Service Letters #444 SL87-223/UM MC/MCE Engines. Super-VIT Fuel Pumps: Adjustment & Maintenance: <http://marengine.com/ufiles/SL87-223.pdf>. 12.06.2017.
4. SOGAV 250. Solenoid Operated Gas Admission Valve. Product Specification. Available: <http://www.woodward.com/EngineAdmissionValves.aspx>. Cited 12.06.2017.
5. JUSSI PEURALA Model-based design, modelling and simulation of digital hydraulic GAS admission valve / Master of Science Thesis, 132 pages, 12 Appendix pages May 2014, <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22251/peurala.pdf;sequence=1>
6. Bucher Directional Seat Valve Series WS22G ... / WS22O <http://www.as-hydraulic.com/bucher-directional-seat-valve-series-ws22g-...---ws22o.html>. Cited 12.06.2017.
7. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 160 с.
8. Нікольський В.В. Основи створення пристроїв п'єзоактивної механіки для систем керування двигунами внутрішнього згоряння // Автореферат дис. на здоб. вченої ступені докт. техн. наук. - Одеса.: ВидавІнформ, 2005. - 36 с.
9. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.
10. Петренко С.Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – К.: «Корнійчук», 2002. – 96 с.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ  
РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІДИН

В [1] приведено структурну та функціональну схеми комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин, яка включає зонд-реометр, що занурюється та який працює на основі методу співвісних циліндрів [2]. Переміщення рухомого циліндру здійснюється за допомогою п'єзоелектричного приводу з повільною швидкістю, що надає можливість комплексного аналізу "нен'ютонівських" рідин, до яких належать мастило та важке моторне паливо, та вивчення ефекту тиксотропії в режимі перманентного моніторингу, або в режимі реального часу.

Основним завданням роботи є розробка програмного забезпечення для комп'ютерної системи, яка дозволяє в "реальному часі" визначати часовий інтервал переміщення рухомої частини вимірювального зонду – співвісного циліндру, який за допомогою жорсткої тяги з'єднано з рухомою частиною лінійного п'єзоелектричного двигуна (ЛПД), між двома контрольними точками.

При програмуванні слід взяти до уваги, що ЛПД, який застосовано в комп'ютерній системі може змінювати швидкість переміщення тільки за рахунок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) сигналів керування, які подані на осцилятор. Для роботи у складі комп'ютерних систем драйвер керування ЛПД має два входи.

Апаратну реалізацію виконано на базі першого навчального модуля «Програмовані контролери та Profinet» TATU SmartLab, який розроблено в рамках проекту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES (рис. 1) [3]. Зі складу модуля були задіяні контролер ILC 151 GSM/GPRS та Switch, до якого приєднані персональний комп'ютер та сенсорна Web-панель.

Програмне забезпечення розроблено за допомогою інтегрованого середовища PC Worx [4].

На рис. 2 представлено дерево проекту, до якого входять наступні функціональні блоки: DIO\_PWW, PWM, Select\_Speed, GEN\_1, Main.

Основний функціональний блок програми – Main, змінні якого наведені в табл. 1, а на рис. 3 зображено схему, яка виконана на мові FBD. Змінні ONBOARD\_OUTPUT\_BIT0 та ONBOARD\_OUTPUT\_BIT1 потрібні для керування ЛПД в прямому та зворотному напрямках, тим

самим пересуваю рухомий циліндр вимірювального зонду; до входів I\_0\_1\_1\_1\_1 та I\_0\_1\_1\_2\_1 підключаються оптичні первинні перетворювачі, сигнал з яких свідчить про знаходження рухомого циліндру в крайніх положеннях; змінна Start\_1 відповідає за примусовий пуск двигуна у разі знаходження рухомого циліндру в проміжку між крайніми положеннями; функціональний блок (ФБ) R\_TRIG\_1 формує короточасний імпульс запуску ЛПД, який поступає на ФБ OR; сигнали з оптичних первинних перетворювачів поступають на асинхронні тригери RS\_1 та RS\_2 (рух в прямому та зворотному напрямках) і далі на ФБ вибору швидкості ЛПД Select\_Speed\_1 та Select\_Speed\_2, функціональна схема яких наведена на рис. 4.

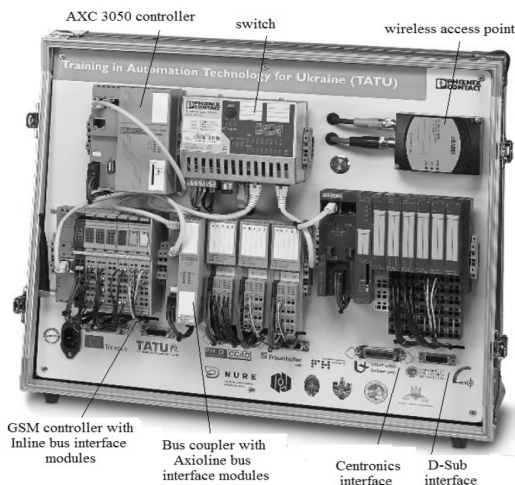


Рис. 1. Перший навчальний модуль TATU SmartLab

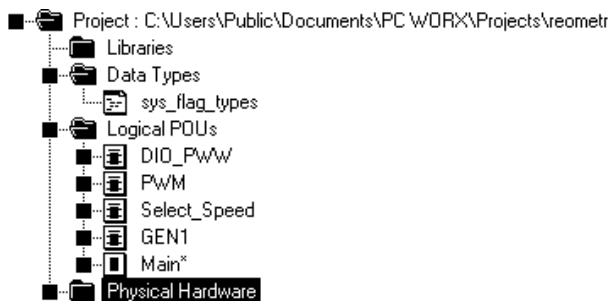


Рис. 2. Дерево проекту reometr

Таблиця 1

Змінні блоку Main

Name	Type	Usag	Description
PWM_1	PWM	VAR	
Select_Speed_1	Select_Speed	VAR	
ONBOARD_OUTPUT_BIT0	BOOL	VAR_EXTERNAL	Local output OUT1
PWM_2	PWM	VAR	
Select_Speed_2	Select_Speed	VAR	
Start_1	BOOL	VAR	
I_0_1_1_1_1	BOOL	VAR_EXTERNAL_PG	
I_0_1_1_2_1	BOOL	VAR_EXTERNAL_PG	
ONBOARD_OUTPUT_BIT1	BOOL	VAR_EXTERNAL	Local output OUT2
R_TRIG_1	R_TRIG	VAR	
RS_1	RS	VAR	
RS_2	RS	VAR	
TP_1	TP	VAR	

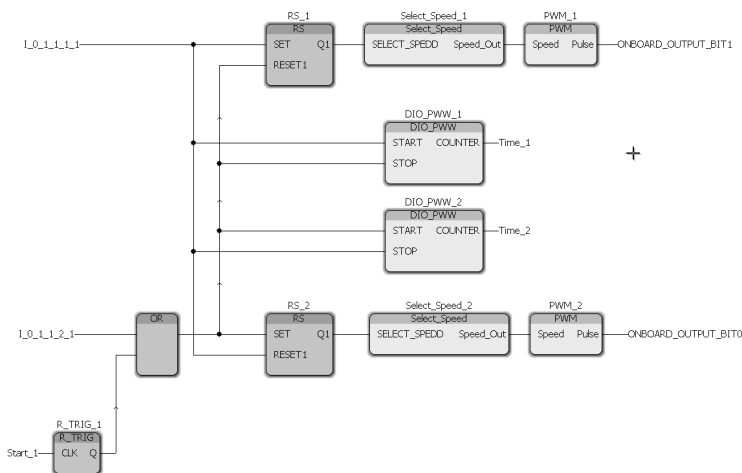


Рис. 3. Функціональна схема блоку Main

До складу ФБ Select\_Speed увійшли наступні блоки: GEN1\_1, ..., GEN1\_4, які відповідають за формування цифрового коду швидкості пересування рухомої частини ЛПД разом з рухомим циліндром. Змінні speed1, ..., speed9 (табл. 2) мають дискретні значення, які наведені в колонці Int. Склад ФБ GEN1 приведено на рис. 5, який розроблено, в свою чергу, за допомогою ФБ TON та AND з бібліотеки <all FUs and FBs>.



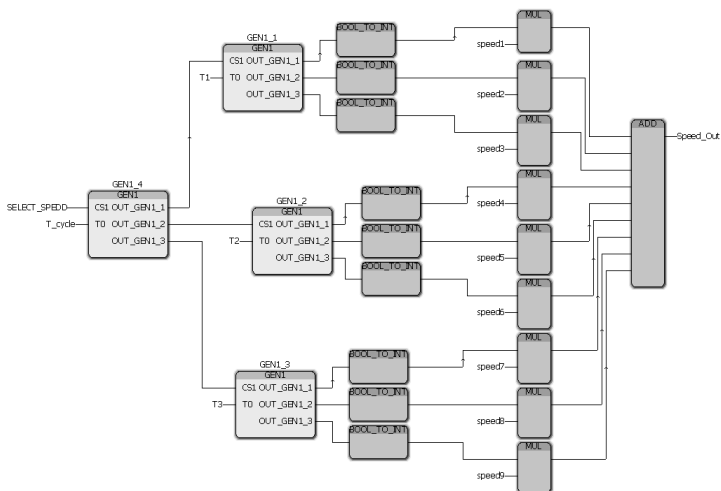


Рис. 4. ФБ Select\_Speed

Таблиця 2

Змінні блоку Select\_Speed

Name	Type	Usag	Description	Int
SELECT_SPEDD	BOOL	VAR INPUT		
Speed Out	INT	VAR OUTPUT		
T cycle	TIME	VAR		t#15s
T1	TIME	VAR		t#5s
T2	TIME	VAR		t#5s
T3	TIME	VAR		t#5s
GEN1_1	GEN1	VAR		
GEN1_2	GEN1	VAR		
GEN1_3	GEN1	VAR		
GEN1_4	GEN1	VAR		
speed1	INT	VAR		100
speed2	INT	VAR		200
speed3	INT	VAR		300
speed4	INT	VAR		400
speed5	INT	VAR		500
speed6	INT	VAR		600
speed7	INT	VAR		700
speed8	INT	VAR		10000
speed9	INT	VAR		20000

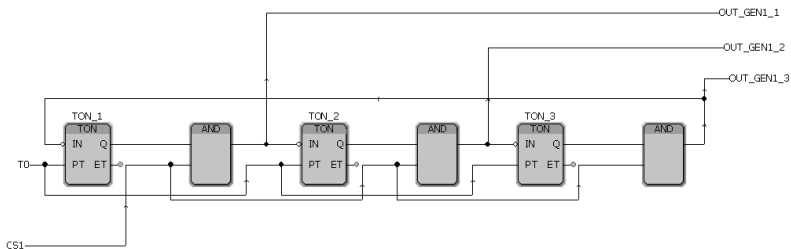


Рис. 5. Блок GEN1

З виходів ФБ Select\_Speed\_1 та Select\_Speed\_2 сигнали надходять на ФБ PWM\_1 та PWM\_2 [5], які реалізують ШИМ управління ЛПД LPM-5 (рис. 6), а саме перетворює значення змінної Speed\_Out (рис. 4) в імпульси постійної напруги, які надходять на блок живлення ЛПД.

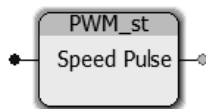


Рис. 6. ФБ, який реалізує ШИМ

Таблиця 3

Змінні блоку PWM

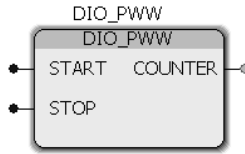
Name	Type	Usag	Description
Speed	INT	VAR_INPUT	input
Pulse	BOOL	VAR_OUTPUT	output
c	INT	VAR	counter

Код ФБ PWM виконано на мові Structured Text:

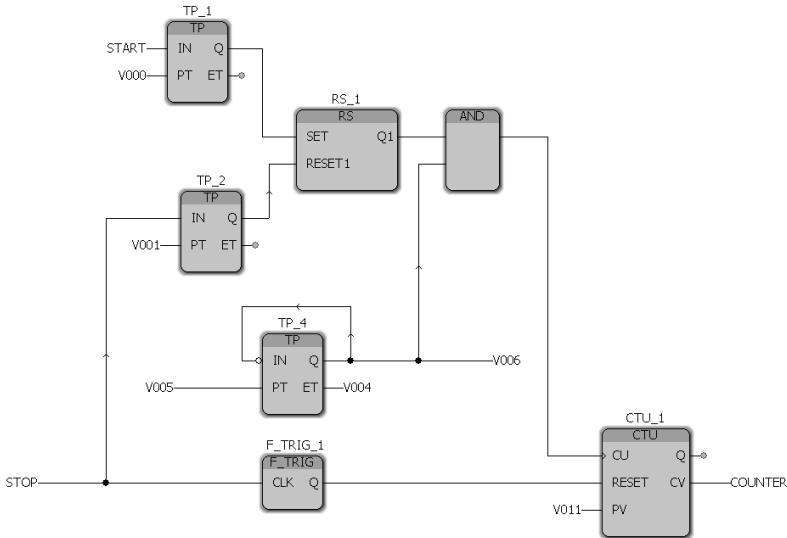
```

1 c:=c+100;
2 if c>3032 then c:=0; end_if;
3 if c<speed then pulse:=true;
4 else pulse:=false;
5 end_if;
```

Таким чином, було здійснено управління ЛПД. А далі для вимірювання часу пересування рухомої частини в числовому коді створено ФБ DIO\_PWW (рис. 7, а), який відсутній у стандартній бібліотеці <all FUs and FBs>, та склад якого наведено на рис. 7, б.



a)



б)

Рис. 7. Блок DIO\_PWW

З виходів Counter ФБ DIO\_PWW\_1 та DIO\_PWW\_2 числове значення змінних Time\_1 та Time\_2 в форматі INT надходить для подальшої обробки в MS Excel, SCADA, або на Web-панель, де здійснюється візуалізація. Крім того, PC Worx дозволяє також зберігати данні виміру інтервалу часу або в масиві даних, або в файлі.

Таким чином, поставлена задача створення програмного забезпечення для комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик виконана.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Нікольський, В. В., Комп'ютерна система визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин /

В. В. Нікольський, К. Ю. Бережний, М.В. Нікольський // Інформаційні технології та компютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017 року. – Івано-Франківськ: 2017 – С. 261 – 264.

2. Нікольський В.В., Бережний К. Ю., Нікольський М.В. Заява на патент на корисну модель, Віскозиметр, U2017 03735, від 18.04.17.

3. Горб С.И., Техническое обеспечение подготовки судовых инженеров по системам автоматизации с программируемыми контроллерами / С.И. Горб, В.В. Никольский, С.Г. Хнюнин, В.Ф. Шапо // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ «ОМА». – С. 39 - 46.

4. Горб С.И., Никольский В.В., Шапо В.Ф., Хнюнин С.Г. Программирование контроллеров в инструментальной среде: учебное пособие. – Харьков: Издатель ФЛП Панов А.Н., 2017. – 172 с.

5. Бурцев А.Г., Программное обеспечение систем управления. Лабораторный практикум. Часть 2 [Электронный ресурс]: методические указания / А.Г. Бурцев // Сборник «Методические указания» Выпуск 3. - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2,9 Mb) – Волжский: ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2016. – 29 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ

В районах интенсивного судоходства зачастую возникает ситуация опасного сближения трех судов, которая не координируется существующими МППСС-72. Поэтому актуальным является разработка рекомендаций при опасном сближении трех целей с учетом требований системы бинарной координации и применения методов формирования гибких стратегий расхождения.

В работе [1] исследуются вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения, а в работе [2] рассмотрены вопросы эффективности парных маневров расхождения.

Целью публикации является разработка процедуры формирования полной стратегии расхождения оперирующего судна в ситуации сближения трех судов с учетом требований существующей системы бинарной координации и особенностей отображения истинных траекторий расхождения в относительные.

В данной публикации исследуется ситуация опасного сближения оперирующего судна  $c_1$  с целью  $c_2$  при наличии в районе плавания третьего судна  $c_3$ . Ситуация сближения упомянутых трех судов характеризуется матрицами пеленгов  $A = \{\alpha_{ij}\}$  и расстояний  $D = \{d_{ij}\}$ , а также векторами скоростей  $V = \{V_i\}$  и курсов  $K = \{K_i\}$ , с помощью которых определяются параметры относительного движения пар судов, выраженные матрицами относительных курсов  $K_{ot} = \{K_{otij}\}$  и скоростей  $V_{ot} = \{V_{otij}\}$ .

Степень опасности ситуации сближения характеризуется матрицей ситуационного возмущения  $W = \{\omega_{ij}\}$  [1], для оценки которой необходимо воспользоваться матрицами пеленгов  $A = \{\alpha_{ij}\}$ , расстояний  $D = \{d_{ij}\}$  и относительных курсов  $K_{ot} = \{K_{otij}\}$ . Матрица ситуационного возмущения имеет вид [1]:

$$W = \begin{Bmatrix} 0 & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & 0 & \omega_{23} \\ \omega_{32} & \omega_{31} & 0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\omega_{ij}$  - ситуационное возмущение, которое характеризует уровень опасности столкновения пары судов  $c_i$  и  $c_j$ .

Ситуационное возмущение  $\omega_{ij}$  возникает при прогнозируемом попадании судов в область недопустимых позиций и оно выявляет грядущую опасную позицию заблаговременно, исходя из прогноза изменения относительной позиции пары судов. Следовательно, ситуационное возмущение возникает тогда, когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min ij}$  меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения  $D_d$ . В первом приближении, с учетом требований МППСС-72, ситуационное возмущение  $\omega_{ij}$  при стандартных ситуациях опасного сближения, исключая экстренное расхождение, может принимать значения [3]:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0, & D_{\min ij} > D_d, S_{ij} \in S_0; \\ 1, & D_{\min ij} \leq D_d, S_{ij} \in S_1; \\ 2, & D_{\min ij} \leq D_d, S_{ij} \in S_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_{ij}$  - начальная ситуация сближения  $i$ -го и  $j$ -го судов;  $S_0$  - подмножество безопасных ситуаций;  $S_1$  и  $S_2$  - подмножества ситуаций соответственно с первой и второй областями взаимных обязанностей (правило 17 МППСС-72).

Дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min ij}$  определяется из формулы [4]:

$$D_{\min ij} = \text{Abs}[d_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{out ij})].$$

Так как по условию начальной ситуации суда  $c_1$  и  $c_2$  сближаются опасно, т.е.  $D_{\min 12} \leq D_d$ , то значения ситуационных возмущений  $\omega_{12}$  и  $\omega_{21}$  не равны нулю. Следовательно, между этими судами возникает взаимодействие, которое предписывается бинарным координатором  $Coor_{(2)}$  (МППСС-72 в части маневрирования судов при расхождении) и суда предпринимают согласованный маневр расхождения, обеспечивающий обращение значений ситуационных возмущений  $\omega_{12}$  и  $\omega_{21}$  в нуль.

При этом координатор  $Coor_{(2)}$ , исходя из относительной позиции судов  $S_{12}$  и их статусов  $St_1$  и  $St_2$ , предписывает взаимодействующим судам координирующие сигналы  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{21}$  [3, 4]. Эти сигналы опре-

деляют их поведение в процессе расхождения, предписывая каждому из них взаимные обязанности, что позволяет судам выбрать стратегии расхождения, при реализации которой одно из судов сохраняет свои параметры движения, в то время как второе судно выполняет маневр расхождения или оба судна предпринимают согласованные маневры расхождения.

Так как в районе предполагаемого маневрирования находится судно  $c_3$ , то, как видно из матрицы ситуационного возмущения  $W$  (1), возникают ситуационные возмущения  $\omega_{13} = \omega_{31}$  и  $\omega_{23} = \omega_{32}$ , которые в общем случае, согласно (2), могут принимать значения от 0 до 2. Следовательно, обобщенный координатор  $Coor_{(2)}$  в рассматриваемой ситуации сближения помимо  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{21}$  формирует также координирующие сигналы  $\gamma_{13}$ ,  $\gamma_{31}$ ,  $\gamma_{23}$  и  $\gamma_{32}$ , значения которых определяют структуру полной стратегии расхождения оперирующего судна  $c_1$ . Под полной стратегией подразумевается совокупность возможных альтернативных частных маневров уклонения судна  $c_1$  в зависимости от значений реализовавшихся сигналов координации  $\gamma_{ij}$  и текущего развития ситуации сближения. Если значение ситуационного возмущения  $\omega_{13}$  отлично от нуля, то судну  $c_1$  от координатора  $Coor_{(2)}$  адресуются сигналы координации  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{13}$  0, которые могут предписывать ему один тип маневра ( $\gamma_{12}=1$ ,  $\gamma_{13}=1$  или  $\gamma_{12}=0$ ,  $\gamma_{13}=0$ ), т.е. уклоняться или сохранять неизменные параметры движения, также они могут противоречить друг другу ( $\gamma_{12}=1$ ,  $\gamma_{13}=0$  или  $\gamma_{12}=0$ ,  $\gamma_{13}=1$ ), т. е. одновременно одному из судов уступать дорогу, а относительно другого сохранять неизменными курс и скорость.

В случае согласованных координирующих сигналов  $\gamma_{12}=1$  и  $\gamma_{13}=1$  оперирующее судно  $c_1$  должно уступить дорогу судам  $c_2$  и  $c_3$  маневром расхождения, который может реализоваться либо общим маневром для обоих судов  $c_2$  и  $c_3$ , или двумя последовательными маневрами для каждого из них.

Если координирующие сигналы  $\gamma_{12}=0$  и  $\gamma_{13}=0$  предписывают оперирующему судну сохранять неизменными курс и скорость относительно обоих судов  $c_2$  и  $c_3$ , то оперирующее судно выполняет данное требование при условии, что цели  $c_2$  и  $c_3$  выполняют предписан-

ные маневры уклонения. Если же хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то последнее следует постоянным курсом и скоростью до некоторого момента времени, после которого оно вынуждено собственным маневром предупредить возможное столкновение. Если координирующие сигналы противоречат друг другу, то оперирующее судно предпринимает маневр расхождения в нулевой момент времени, который является безопасным для обеих судов  $c_2$  и  $c_3$ . При формировании полной стратегии оперирующим судном учитывается значение ситуационного возмущения  $\omega_{23}$  и при отклонении его от нуля – также и координирующие сигналы  $\gamma_{23}$  и  $\gamma_{32}$ .

Рассмотрим формирование полной стратегии расхождения оперирующим судном в случае начальной ситуации сближения, которая характеризуется следующими переменными: параметрами движения оперирующего судна  $c_1 - K_1 = 244^\circ$ ,  $V_1 = 20$  узлов, цели  $c_2 - K_2 = 52^\circ$ ,  $V_2 = 18$  узлов, цели  $c_3 - K_3 = 332^\circ$ ,  $V_3 = 27$  узлов; относительной позицией  $\alpha_{12} = 238^\circ$ ,  $d_{12} = 5$  миль,  $\alpha_{13} = 176^\circ$ ,  $d_{13} = 4,76$  миль,  $\alpha_{23} = 115^\circ$ ,  $d_{23} = 5,0$  миль. Начальная ситуация сближения судов  $c_1$ ,  $c_2$  и  $c_3$  показана на рис.

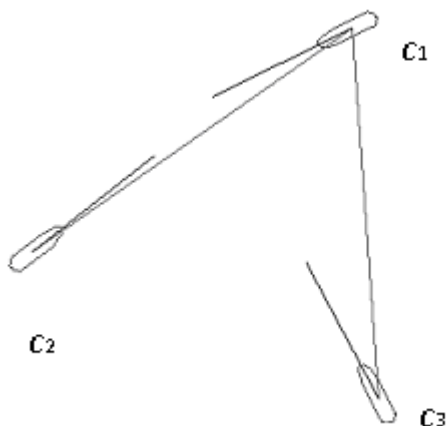


Рис. Начальная ситуация сближения судов

По исходным данным были рассчитаны дистанции кратчайшего сближения судов:  $D_{\min 12} = 0$  миль,  $D_{\min 13} = 0,0$  мили,  $D_{\min 23} = 0,9$



мили. Все три сближающиеся судна имеют одинаковый статус, так как являются судами с механическим двигателем. С учетом их относительного положения координатором формируются следующие координирующие сигналы:  $\gamma_{12} = 0$ ,  $\gamma_{21} = 1$ ,  $\gamma_{13} = 0$ ,  $\gamma_{31} = 1$ ,  $\gamma_{23} = 1$  и  $\gamma_{32} = 0$ .

В рассматриваемом примере координирующие сигналы  $\gamma_{12} = 0$  и  $\gamma_{13} = 0$  являются согласованными, поэтому если суда  $c_2$  и  $c_3$  выполнят предписанные координатором маневры уклонения  $D_2(1)$  и  $D_3(1)$ , то оперирующее судно  $c_1$  должно сохранять неизменные параметры движения, реализуя стратегию  $D_1(0)$ . В случае, когда хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то последнее следует постоянным курсом и скоростью  $D_1(0)$  до момента времени  $\tilde{t}$ , после чего оно собственным маневром расхождения  $\tilde{D}_1(\tilde{t})$  предупреждает возможное столкновение. В данном примере момент времени  $\tilde{t}$  определяется уменьшением дистанций  $d_{12}$  и  $d_{13}$  до значений  $d_{12} = 3,4$  мили и  $d_{13} = 2,9$  мили. В этот момент времени оперирующее судно  $c_1$  реализует частную стратегию  $\tilde{D}_1(\tilde{t})$ , которая заключается в уклонении  $c_1$  на курс  $K_{1y} = 286^\circ$ , в результате чего оперирующее судно безопасно расходится с целями  $c_2$  и  $c_3$  на расстояниях  $D_{\min 12} = 1,7$  мили и  $D_{\min 13} = 1,0$  мили.

Таким образом, в рассмотренной ситуации полная стратегия оперирующего судна:

$$D_1 = \begin{cases} D_1(0), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(1), D_3(1); \\ D_1(0), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(0), D_3(0), t \leq \tilde{t}; \\ \tilde{D}_1(\tilde{t}), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(0), D_3(0), t > \tilde{t}. \end{cases}$$

Если две первые частные стратегии не предусматривают маневрирования оперирующего судна, то реализации частной стратегии  $\tilde{D}_1(\tilde{t})$  требует вначале уклонения судна  $c_1$  с программной траектории движения, а затем, после безопасного расхождения, - его возвращения к начальному режиму движения. Таким образом, выполняя маневр расхождения, оперирующее судно вначале отклоняется от программной траектории движения, безопасно расходится с целью в заданной дистанции, а затем ложится на курс выхода на заданную траекторию. Форму истинной траектории расхождения будем характеризовать

двумя параметрами: истинным уклонением  $\delta_y$  и истинным выходом  $\delta_b$ , причем каждый из параметров принимает значение «1», если последующий курс больше предыдущего и - «-1» в противном случае. В рассматриваемом примере  $K_1 = 244^\circ$ ,  $K_{1y} = 286^\circ$ ,  $K_b = K_1 - 40 = 244^\circ$ , следовательно,  $\delta_y = 1$ ,  $\delta_b = -1$ . Однако, если маневр расхождения выполняет судно, скорость которого меньше скорости цели, то, как показано в работе [4], относительный курс может как увеличиваться, так и уменьшаться с ростом истинного курса маневрирующего судна. Поэтому форма относительной траектории может в общем случае отличаться от формы истинной траектории. Относительная траектория расхождения характеризуется относительным уклонением  $\Delta_y$  и относительным выходом  $\Delta_b$ , причем относительные характеристики принимают также значения «1» или «-1» в зависимости от соотношения смежных относительных курсов. Обратимся к приведенному примеру, при маневрировании оперирующего судна  $c_1$ , с учетом неизменных параметров целей  $c_2$  и  $c_3$  изменяются относительные курсы  $K_{ot12}$  и  $K_{ot12}$ . Для относительных курсов судна  $c_1$  и цели  $c_2$   $K_{ot12o} = 238^\circ$ ,  $K_{ot12y} = 261^\circ$ ,  $K_{ot12b} = 217^\circ$ , поэтому  $\Delta_{12y} = 1$ ,  $\Delta_{12b} = -1$ . Для относительных курсов оперирующего судна  $c_1$  и цели  $c_3$   $K_{ot13o} = 189^\circ$ ,  $K_{ot12y} = 199^\circ$ ,  $K_{ot12b} = 174^\circ$ , поэтому  $\Delta_{13y} = 1$ ,  $\Delta_{13b} = -1$ . Обе относительные траектории расхождения имеют такую же форму, как и истинная траектория. Значения относительных характеристик  $\Delta_y$  и  $\Delta_b$  определяют процедуру расчета необходимых относительных курсов маневра расхождения, на основании которых рассчитываются соответствующие истинные курсы оперирующего судна. С учетом данного обстоятельства необходимо разработать способ отображения истинных траекторий расхождения в относительные траектории для расчета параметров маневра расхождения.

Таким образом, преимуществом полной стратегии оперирующего судна является учет возможного изменения процесса сближения с целями и предварительно сформированные частные маневры уклонения, предусматривающие различные исходы меняющейся ситуации сближения, множество которых зависит от действующей системы бинарной координации и отображения истинной траектории расхождения в относительные.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, – 2008. – Вып.15. - С. 166 – 171.
3. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
4. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия). – 2016. – 585 с.

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

В процесі технологічних операцій суднового енергетичного та вантажного обладнання відбувається накопичення статичної електрики в елементах і деталях обладнання, робочих матеріалів і середовищ, що може служити причиною виникнення відмов і збоїв в роботі, а також пожеж і вибухів.

Для контролю електростатики застосовується широкий спектр датчиків на основі різноманітних фізичних принципів роботи, які серійно виробляються промисловістю.

У той же час, застосування існуючих пристроїв виявило їх недостатню стійкість до впливу неконтрольованих дестабілізуючих факторів, що генеруються компактно розташованими об'єктами суднової енергетичної установки [1, 2, 3].

Для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характеристик пристроїв контролю електростатичного поля проаналізовані конструкції найпоширеніших типів датчиків обертів [3, 4, 5].

Відомий датчик контролю електростатичного поля, який містить чутливий елемент у вигляді ідентичних сегнетоелектричних електродів - конденсаторів змінної ємності (вариконди), включених в протилежні плечі мосту електричної схеми, ідентичні конденсатори постійної ємності, електричну антену, блок живлення і блок реєстрації (рис. 1) [4].

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням сегнетоелектричних електродів – конденсаторів та електричного живлення:

- необхідність постійного корегування геометрії та властивостей електродів - конденсаторів в умовах впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних та кліматологічних факторів;

- необхідність забезпечення додаткових технологічних заходів щодо пожежевибухобезпечності процесу вимірювання;

- необхідність компенсації впливу випадкових електромагнітних імпульсівна антену для уникнення створення умов для появи паразитної модуляції інформаційного сигналу;

- складність електричної схеми та конструкції;

- необхідність використання крім сенсорних елементів, великої кількості додаткових елементів і устаткування.

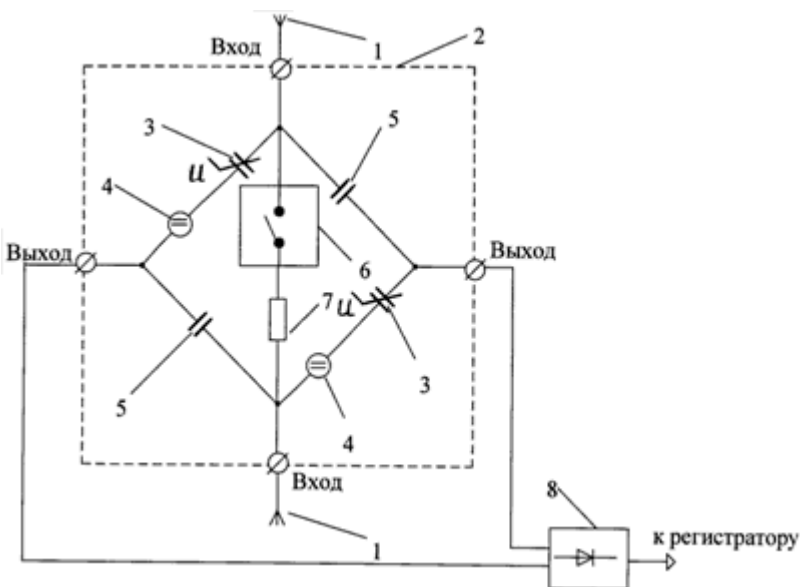


Рис. 1. Датчик контролю електростатичного поля: 1 - електрична антена; 2 – електрична мостова схема; 3 - вариконди; 4 - джерело електричного зсуву варикондів; 5 - конденсатори постійної ємності; 6 - комутатор; 7 - низькоомний резистор; 8 - синхронний детектор

У меншій мірі експлуатаційні та конструктивні фактори впливають на характеристики датчику, який складається з чутливого елемента на основі електродів-конденсаторів з сегнетоелектричної плівки змінної ємності, розташованої на підкладці, зарядочутливого підсилювача, блоку живлення і блоку реєстрації [5].

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням електродів-конденсаторів з сегнетоелектричної плівки та електричного живлення: необхідність постійної корекції деградації властивостей сегнетоелектричної плівки, яка використовуються в умовах концентрованого впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних факторів;

необхідність забезпечення додаткового захисту тонкої сегнетоелектричної плівки від впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних та кліматологічних факторів;

необхідність забезпечення додаткових технологічних заходів щодо пожежебезпечності процесу вимірювання;

складність електричної схеми та конструкції.

В умовах, що склалися, доцільною стала розробка нового схемотехнічного рішення датчику електростатичного поля. Передбачалося, що конструктивне виконання на основі волоконно-оптичних та електрооптичних елементів повинне забезпечити вимірювальному пристрою:

відсутність необхідності корекційних дій з підтримки геометрії та властивостей елементів датчика;

пожежовивбухобезпечність процесу вимірювання;

високий рівень чутливості та швидкодія пристроїв відомих типів.

Для розв'язування поставленої задачі запропонована схема волоконно-оптичного датчика електростатики.

Суть запропонованого схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 2), де зображені предметна котушка 1 та опорна котушка 4.

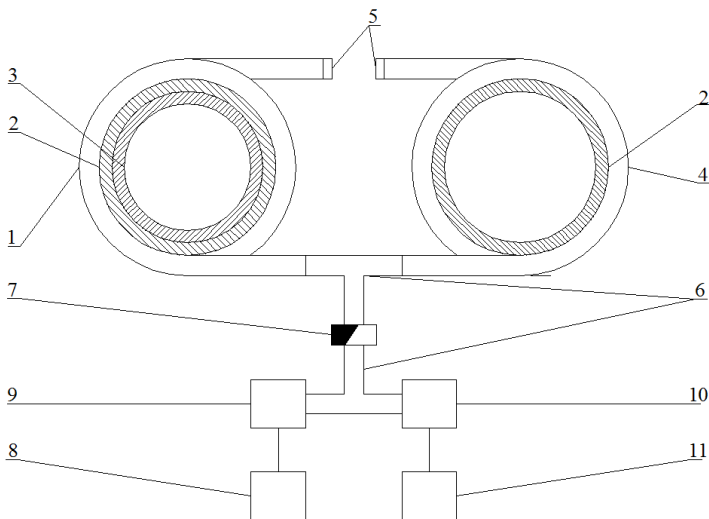


Рис. 2. Волоконно-оптичний датчик електростатичного поля: 1 – предметна котушка; 2 – основа; 3 – контрольований трубопровід; 4 – опорна котушка; 5 – віддзеркалюючий шар з сапфірового скла; 6 – оптичний розгалужувач; 7 – мультиплексор/демультиплексор; 8 – джерело живлення; 9 – джерело випромінювання; 10 – фотоприймач; 11 – блок ресстрації

Котушки намотані на циліндричній основі 2, яка вмонтовується у контрольований трубопровід 3. Кожна з котушок має на вихідному кінці віддзеркалюючий шар з сапфірового скла 5. Від джерела 8 над-

ходить живлення до джерела випромінювання 9. Далі оптичне випромінювання крізь оптичні розгалужувачі 6, та мультиплексор/демультиплексор 7, надходить одночасно до обох котушок. Після відбивання від віддзеркалюючого шару, крізь оптичні розгалужувачі, та мультиплексор/демультиплексор, перетворене випромінювання повертається до фотоприймача 10 та блоку реєстрації 11.

При русі середовища у контрольованому трубопроводі створюється електростатичне поле. В наслідок цього, у предметній котушці змінюються електрооптичні коефіцієнти ніобату літію, з якого вироблено світловод. Це призводить до виникнення у світловоді ефекту Поккельса – явища утворення подвійного променепереломлення в оптичному середовищі.

Наслідком цих процесів є зміна інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить крізь предметну котушку, відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається назад до мультиплексора/ демультиплексора [5, 6, 7].

Величина зареєстрованої електростатики буде пропорційною до інтенсивності частки оптичного випромінювання, яке відбилося від віддзеркалюючого шару та повернулося до мультиплексора/ демультиплексора. Випромінювання при проході крізь мультиплексор/ демультиплексор, розподіляється за довжинами хвиль.

У статичному режимі (відсутність статичної електрики), випромінювання у прямому напрямку надходить до мультиплексора/демультиплексора. У останньому відбувається розподіл випромінювання за довжинами хвиль, кожна з яких відповідає випромінюванню, що прямуватиме у прямому та зворотному напрямку. Після надходження до предметної та опорної котушок відбувається зменшення частки випромінювання яке обумовлено впливом неконтрольованих негативних експлуатаційних та кліматологічних факторів [5, 6, 7]. Опорна котушка при цьому розташовується поза контрольованим трубопроводом. Решта випромінювання у котушках відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається крізь розгалужувачі до мультиплексора/ демультиплексора. До блоку реєстрації сигнали з предметної та опорної надходять з протилежними знаками та методом диференційної селекції калібрування датчику для компенсації впливу неконтрольованих фізичних полів.

У динамічному режимі, тобто появі електростатичного поля при русі середовища у контрольованому трубопроводі, у предметній котушці змінюються електрооптичні коефіцієнти ніобату літію, з якого вироблено світловод. Це призводить до виникнення у світловоді

ефекту Поккельса – явища утворення подвійного променепереломлення в оптичному середовищі.

Наслідком цих процесів є зміна інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить крізь предметну котушку, відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається назад до мультиплексора/ демультиплексора [5, 6, 7].

Величина зареєстрованої електростатики буде пропорційною до інтенсивності частки оптичного випромінювання, яке відбилося від віддзеркалюючого шару та повернулося до блоку реєстрації [8].

Випромінювання при проході крізь мультиплексор/ демультиплексор, розподіляється за довжинами хвиль. Подальша обробка випромінювання, що надходить з демультиплексора, дозволить отримати електричний сигнал який буде пропорційний величині електростатичного поля.

Запропоноване схемотехнічне рішення відрізняється тим, що чутливий елемент являє собою предметну та опорну котушки оптичного світловоду з ніобату літію з віддзеркалюючим шаром з сапфірового скла на вихідних кінцях, на циліндричній основі зі сплаву інвар, випромінювання до яких надходить крізь мультиплексор/демультиплексор та оптичні розгалужувачі від джерела лазерного випромінювання та повертається до фотоприймача, зв'язаного з блоком реєстрації.

Таким чином, в розробленому датчику комбінація електрооптичних елементів забезпечує:

- більш стійке до дестабілізуючих факторів перетворення параметрів обертального руху у зміни інформаційного сигналу;

- компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику;

- пожежевибухобезпечність процесу вимірювання;

- відсутність необхідності постійного корегування геометрії елементів датчика.

Застосування запропонованої моделі датчика, крім того, дозволить підвищити безпеку і ефективність різних типів технологічних процесів у суднової енергетичної установці і судні в цілому. А також проводити контроль та моніторинг накопичення статичного заряду як в суднових нафто- і газопроводах, так при транспортуванні сипучих дрібнодисперсних середовищ.

Пристрій дасть змогу вимірювати напруженості електричного поля в широкому діапазоні від постійного до швидкоперемінного електричних полів при високій чутливості і широкому діапазоні вимірювання.



#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гуляев, Ю.В., Меш, М.Я., Проклов, В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.
2. Аш, Ж. Датчики измерительных систем. В 2 книгах. Кн. 2. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
3. Гавричев, В. Д., Дмитриев, А. Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 83 с.
4. Пат. 2485528 Российская Федерация, МПК G01R 29/00. Широкополосное устройство для измерения напряженности электрического поля./ Заявители Гончаров, В. П., Молочков, В. Ф., Филатов, М. М. Патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова" (ФГУП "ВНИИА"); заявл. 28.12.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. №30 (II ч.). – 3 с.
5. Датчик статического электричества. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poleznayamodel.ru/model/14/147601.html>.
6. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
7. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
8. Бусурин, В.И., Носов, Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ОБЕРТІВ РОТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

Останнім часом все більш широке поширення набувають інформаційно-вимірювальні системи, побудовані на основі волоконно-оптичних датчиків. Ця тенденція обумовлена низкою переваг волоконно-оптичних датчиків над традиційними - вони мають високу чутливість, стійкі до електромагнітних перешкод, електрично пасивні, мають малу вагу і габарити, легко мультиплексуються і мають низьку вартість виготовлення чутливих елементів [1].

У той же час, застосування існуючих волоконно-оптичних пристроїв виявило їх недостатню стійкість до впливу неконтрольованих дестабілізуючих факторів, що генеруються компактно розташованими об'єктами суднової енергетичної установки [1, 2, 3].

Для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характеристик пристроїв контролю роторного обладнання проаналізовані конструкції найпоширеніших типів датчиків обертів [3, 4, 5].

Відомий датчик контролю обертального руху, який складається з корпусу, з ввареним в нього вікном, волоконно-оптичних світловодів, джерела та приймача оптичного випромінювання та світловідбиваючої мітки на контрольованому роторі (рис. 1) [3, 4].

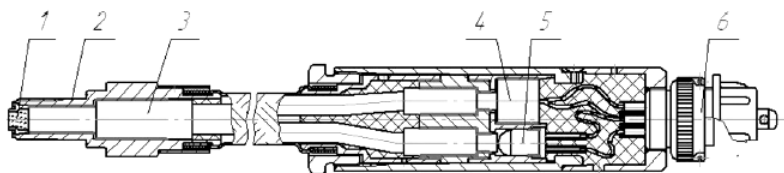


Рис. 1. Датчик контролю обертального руху: 1 – вікно; 2 – корпус; 3 – волоконно-оптичні світловоди; 4 – фотоприймач; 5 – джерело випромінювання; 6 – з'єднувач

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням наявності відкритого оптичного каналу випромінюючий світловод - мітка - приймаючий світловод:

необхідність постійного корегування геометрії відкритого оптичного каналу в умовах впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних факторів;

необхідність компенсації впливу кліматологічних та експлуатаційних факторів (забруднення повітря, мітки та поверхні вікна у відкритому оптичному каналі);

необхідність компенсації випадкових засвітлення приймального світловода для уникнення створення умов для появи паразитної модуляції інформаційного сигналу.

У меншій мірі експлуатаційні та конструктивні фактори впливають на характеристики волоконно-оптичного датчику обертів, який складається з основи, джерела лазерного випромінювання, фотоприймача, оптичних світловодів, що утворюють котушку навколо ротора та підводять-відводять випромінювання,  $\lambda/4$  пластини, поляроїда, призми Волластона та джерела струму, що подається на контрольований ротор (рис. 2) [5].

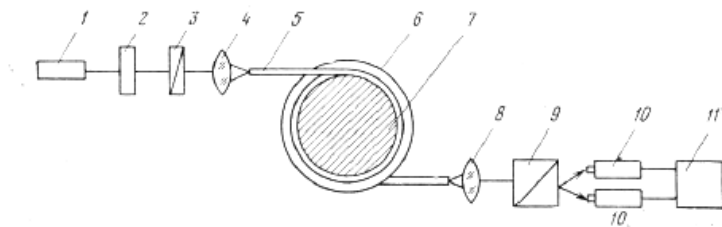


Рис. 1. Датчик контролю обертального руху: 1 – джерела лазерного випромінювання; 2 –  $\lambda/4$  пластини; 3 – поляроїд; 4, 8 – об'єктиви; 5 – оптичний світловод; 6 – котушка; 7 – ротор; 9 – призма Волластона; 10 – фотоприймач; 11 – блок обробки інформації

Недоліки пристрою, які обумовлені використанням волоконної котушки,  $\lambda/4$  пластини, поляроїда та призми Волластона:

необхідність постійної корекції деградації властивостей оптичних елементів, які використовуються в умовах концентрованого впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних факторів;

необхідність забезпечення додаткового захисту оптичних елементів від впливу негативних неконтрольованих експлуатаційних факторів та підшипникових вузлів від впливу електроструму [6];

застосування додаткових оптичних елементів для перетворення інформаційного сигналу.

В умовах, що склалися, доцільною стала розробка нового схемотехнічного рішення волоконно-оптичного датчику обертів. Передбачалося, що конструктивне виконання на основі волоконно-оптичних елементів повинне забезпечити вимірювальному пристрою:

застосування деталей, виконаних з матеріалів з близькими фізико-механічними характеристиками;

відсутність необхідності корекційних дій з підтримки геометрії оптичного каналу та елементів датчика;

відсутність механічного впливу на світловодні елементи;

збереження високого рівня чутливості та швидкодія пристроїв відомих типів.

Для розв'язування поставленої задачі запропонована схема волоконно-оптичного датчику обертів.

Суть запропонованого схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 3), де зображено сегмент зі сплаву з магнітострикційними властивостями (Fe – Ni, 42 % Ni) 2 з обох боків до якого приварені сегменти зі сплаву платиніт (Fe – Ni, 48 % Ni) 1. До сегментів 1 плазменою зваркою закріплені первинний 3 та вторинний 4 оптичні світловоди.

Первинний світловод з одного кінця має віддзеркалюючий шар з сапфірового скла 8. З іншого кінця первинний світловод зварено з оптичним волокном 5 для підводу/відводу випромінювання, що надходить у прямому та зворотному напрямку крізь мультиплексор/демультиплексор 6.

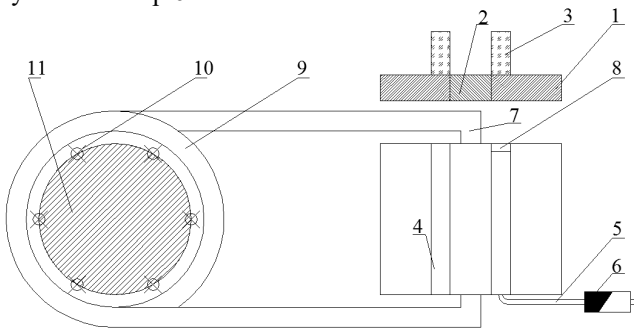


Рис. 3. Волоконно-оптичний датчик обертів роторного обладнання: 1 – сегмент з платиніту; 2 – сегмент зі сплаву Fe - Ni; 3 – первинний оптичний світловод; 4 – вторинний оптичний світловод; 5 – оптичне волокно для підводу/відводу випромінювання; 6 – мультиплексор/демультиплексор; 7 – циліндричний сегмент для сполучення з струмопроводом; 8 – віддзеркалюючий шар з сапфірового скла; 9 – котушка з двосегментною рамкою; 10 – неодимовий магніт; 11 – ротор

Для сполучення з котушкою 9 у сегменті 2 зроблені циліндричні сегменти 7. Котушка монтується на розбірній рамці, яка фікується поблизу опори ротору 11. На роторі, у площині котушки, монтуються неодимові магніти 10 з відповідною орієнтацією полюсів.

При обертанні ротору з закріпленими неодимовими магнітами, у котушці, яка оточує ротор, генерується електрострум. В наслідок цього, у сегменті 2, завдяки явищу магнитострикції, відбудеться зміна (збільшення) лінійних розмірів. Зміна лінійних розмірів викличе зміну відстані між первинним та вторинним світловодами, що обумовить порушення умов тунельного оптичного зв'язку між світловодами. Тобто, частина оптичного випромінювання, що перекачувалася до вторинного світловода буде змешуватися. Наслідком цих процесів є збільшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить крізь первинний світловод, відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається назад до мультиплексора/ демультиплексора [5, 6, 7].

Величина сили електроструму буде пропорційною до інтенсивності частки оптичного випромінювання, яке відбилося від віддзеркалюючого шару та повернулося до мультиплексора/ демультиплексора після процесу тунелювання до вторинного світловода. Випромінювання при проході крізь мультиплексор/ демультиплексор, розподіляється за довжинами хвиль.

Для здійснення винаходу застосовано комбінацію сегментів зі сплавів Fe – Ni, оптичних елементів та неодимових магнітів. Сегменти зі сплавів використовуються для монтажу та взаємної фіксації елементів датчика.

У статичному режимі (відсутність обертання ротору та виникнення електроструму), випромінювання у прямому напрямку надходить до мультиплексора/демультиплексора. У останньому відбувається розподіл випромінювання за довжинами хвиль, кожна з яких відповідає випромінюванню що прямуватиме у прямому та зворотному напрямку. Після надходження до первинного світловода, завдяки малої відстані до вторинного світловода, відбувається тунелювання частки випромінювання до вторинного світловоду [5, 6, 7]. Решта випромінювання у первинному світловоді відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається крізь оптичне волокно до мультиплексора/ демультиплексора. На цьому етапі також відбувається калібрування датчику для компенсації впливу неконтрольованих фізичних полів.

В першому динамічному режимі, тобто початку обертання ротору та появи електроструму у котушці та при стандартних умовах навколишнього середовища, у сегменті 2, завдяки явищу магнитострикції, відбудеться зміна (збільшення) лінійних розмірів.

Зміна лінійних розмірів викличе зміну відстані між первинним та вторинним світловодами, що обумовить порушення умов тунельного оптичного зв'язку між світловодами. Тобто, частина оптичного випромінювання, що перекачувалася до вторинного світловода буде змешуватися. Наслідком цих процесів є збільшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить крізь первинний світловод, відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається назад до мультиплексора/ демультиплексора [8, 9, 10].

Величина сили електроструму буде пропорційною до інтенсивності частки оптичного випромінювання, яке відбилосся від віддзеркалюючого шару та повернулося до мультиплексора/ демультиплексора після процесу тунелювання до вторинного світловода.

Подальша обробка випромінювання, що надходить з демультиплексора, дозволить отримати електричний сигнал який буде пропорційний величині електричного струму.

В другому динамічному режимі, тобто появі електроструму при підвищеній температурі навколишнього середовища, у сегменті 2, завдяки явищу магнітострикції, відбудеться зміна (збільшення) лінійних розмірів. Така ж зміна, завдяки температурному поширенню, відбудеться й у сегментах з платиніту. Деформації геометрії сполуки сегментів не відбудеться за рахунок несуттєвої різниці у коефіцієнтах лінійного поширення. Крім того, коефіцієнти лінійного поширення скла світловодів та платиніту не відрізняються, то будуть виключені умови для виникнення паразитної модуляції інформаційного сигналу за рахунок виникнення додаткових термічних деформацій у склі.

Подальша обробка інтенсивності отриманого випромінювання аналогічна до першого динамічного режиму.

Запропоноване схемотехнічне рішення відрізняється тим, що вторинний світловод та первинний світловод, який з одного боку має віддзеркалюючий шар з сапфірового скла, а з іншого боку сполучений з оптичним волокном для підводу/відводу випромінювання, що надходить та відводиться крізь мультиплексор/ демультиплексор, приварені до зовнішніх боків основи, яка складається двох зовнішніх сегментів з платиніту та центрального сегменту зі сплаву Fe – Ni, зполученого зі струмопроводом, який утворює багатовиткову котушку навколо контрольованого ротору на двосегментній рамці, та 24 неодимових магніти, прикріплених до ротору в одній площині з котушкою.

Таким чином, в розробленому датчику комбінація електрооптичних елементів забезпечує:

більш стійке до дестабілізуючих факторів перетворення параметрів обертального руху у зміни інформаційного сигналу;

компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику;

відсутність деформації світловодного елементу датчика;

відсутність необхідності постійного корегування геометрії елементів датчика;

підвищення стабільності функціонування за рахунок використання матеріалів з близьким коефіцієнтом гнучкості та теплового поширення.

Використання пристрою, що пропонується, дозволить адекватно і достовірно оцінювати кількісні показники обертального руху роторів суднового обладнання.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Оптико-електронні засоби контролю параметрів обертального руху на основі методу просторової модуляції : монографія / М. Й. Юкиш, В. В. Кухарчук, Й. Й. Білинський. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 138 с.

2. Аш, Ж. Датчики измерительных систем. В 2 книгах. Кн. 2. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 424 с.

3. Рязанцев, Д. А. Бесконтактный датчик частоты вращения вала, предназначенный для жестких условий эксплуатации // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 98 - 101.

4. Кирьянов, В. Л., Колганов, В. Н., Конаков, Н. Д., Куприянов, А.В. Датчики частоты вращения для изделий ракетно-космической техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukarus.com/datchiki-chastoty-vrascheniya-dlya-izdeliy-raketno-kosmicheskoy-tehniki> (дата обращения 17.03.2017).

5. Гуляев, Ю.В., Меш, М.Я., Проклов, В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 150 с.

6. Пикарников, В.П., Червяков, В.В., Вековищев, В.С. Испытания трасс оптических кабелей на виброустойчивость // Судостроение. – 1989. – № 5. – С. 31-32.

7. Гавричев, В. Д., Дмитриев, А. Л. Волоконно-оптические датчики магнитного поля. – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 83 с.

8. Белов, К. П., Магнитострикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука. 1987. – 160 с.

9. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

10. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.

AUTOMATED LUBRICATION SYSTEM OF GUIDES  
TO MOVE HEAVY CARGOES

Recently the hydrostatic lifting systems designed for horizontal loading of heavy cargoes on vessel are becoming more widespread. This trend is due to a number of advantages of the lifting cargo guides over the traditional - they are of low cost, easy to use and could be easily mounted as systems for loads of different weights [1]. At the same time, application of the existing hydrostatic lifting systems showed their incomplete correspondence to the modern tasks of safe cargo operations [1, 2, 3]. To find ways to improve the cargo lifting guides performance the design solutions of their lubrication systems were analyzed [3, 4, 5]. The current lubrication system of the guides consists of triangular pockets on the guide's surface, oil-lines and a pump with electric drive [4].

Disadvantages of the device, which are caused by use of a pump with electric drive and direct supply of lubricant to the lubrication pockets:

- excessive consumption of lubricant;
- possibility of lifting the load bearing surface over the guide and creation of tipping moments for cargo;
- dependence of the low-viscous oils from climatic conditions;
- dependence of the system's working capacity on availability of electrical power.

To a lesser extent the operational and structural factors affect the characteristics of the guides' lubrication system, consisting of a group of triangular pockets on the guide's surface, oil-lines, throttles and electric power pump [4, 5, 6]. Disadvantages of the device, which are caused by use of the complex "electric power pump – throttle":

- dependence of the low-viscous oils from climatic conditions;
- dependence of the system's working capacity on availability of electrical power.

In the circumstances, development of the new design solution for lubrication system of guides, became appropriate. It was assumed that constructive implementation must provide:

- possibility of using the consistent high viscosity lubricant with the necessary and sufficient consumption of these materials;
- minimized impact of climatic factors in cargo operations;
- independency of electric power;



high level of fluid friction in the entire range of speeds and loads when moving cargo;

simplicity and reliability of design solutions of the known types of systems.

The scheme of guides' lubrication system is proposed for solution of the problem. The essence of the proposed design solution is explained by drawing (Fig. 1), which shows the guides' lubrication system to move heavy cargo, consisting of a guide 1, pockets 2, throttles 3, oil-lines 4, tank for lubricant cartridge 5, secondary hydraulic cylinder 6 with piston-rod 8, primary hydraulic cylinders 7, system converting the translational movement into the rotary 9 and a toothed rack 10 with a return spring 11.

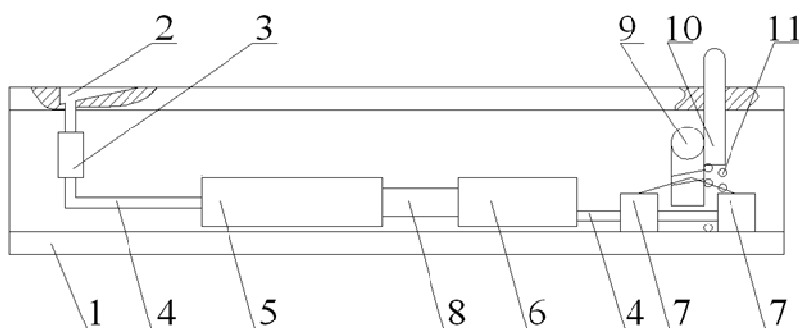


Fig. 1. Lubrication system of guides to move heavy cargo: 1 – consisting of a guide; 2 – pockets; 3 – throttles; 4 – oil-lines; 5 – tank for lubricant cartridge; 6 – secondary hydraulic cylinder; 7 – primary hydraulic cylinders; 8 – piston-rod; 9 – system converting the translational movement into the rotary; 10 – toothed rack; 11 – return spring

Starting up of the cargo transportation along the guides leads to contact of the cargo bearing with the spherical edge of the toothed rack. Under the cargo weight the toothed rack moves down in the guide bore. When moving the rail it turns on the system converting the translational movement into the rotary. In turn, the interaction of the system's drum surface with profiled cam groove with six primary hydraulic cylinders leads to increase of pressure in hydraulically bound secondary cylinder. At increasing pressure the piston-rod of the secondary hydraulic cylinder presses out the material of lubricant cartridge, in the relevant volume, through the throttles to the lubricant pockets. Thus the oil comes into the contact area of the cargo and the guide [6, 7].

For the invention a combination of hydro-mechanical elements was used. In the static mode (before beginning of the cargo operation) the lubricant cartridge is placed to a tank and the tank is closed. Rod-piston of the secondary hydraulic cylinder is located in the secondary hydraulic cylinder. The toothed rack is raised to the top position by the return spring.

In dynamic mode (movement of cargoes) there is a contact of the cargo bearing with spherical edge of the toothed rack. Under the cargo weight the toothed rack moves down in the guide bore. When moving the rail it turns on the system converting the translational movement into the rotary. In turn, the interaction of the system's drum surface with profiled cam groove with six primary hydraulic cylinders leads to increase of pressure in hydraulically bound secondary cylinder. At increasing pressure the piston-rod of the secondary hydraulic cylinder presses out the material of lubricant cartridge, in the relevant volume, through the throttles to the lubricant pockets. The throttles, on which the pressure is decreased, are used to ensure that at different loads on the pockets, the pressure could not match, and was maximal only in the contact zone. Thus the oil comes into the contact area of the cargo and the guide.

After the cargo passes the contact area with the edge of the toothed rack, it rises upwards under the influence of the reverse spring, unloading valves of the "primary hydraulic cylinders – secondary hydraulic cylinder" subsystem, open, the pressure in the secondary hydraulic cylinder decreases and the rod piston returns to the hydraulic cylinder. Thus, there is a full cycle of the lubrication system.

The proposed design solution has a peculiar feature that its system includes a tank for lubricant cartridge, a power secondary hydraulic cylinder, rod-piston which, under the pressure created by six primary hydraulic cylinders that are driven by the government the system converting the translational movement into the rotary and the toothed rack, compresses lubricant cartridge and directs lubricant to the lubrication pockets.

Thus in the developed lubrication system the combination of hydro-mechanical elements provides:

- creation of more adequate conditions for lubrication of guides;
- possibility of lubrication process without additional power supply to the power equipment;
- consideration and compensation of meteorological factors influence that affect cargo operations;
- reduction of lubricant costs.

Use of the proposed device will allow the adequate and economic lubrication when moving heavy cargoes along the guides.

## LITERATURE

1. Подобед, В.А., Подобед, Р.В., Папуша, А.Н., Вульфович, Б.А. Транспортировка крупногабаритных особо тяжелых грузов морем // Вестник МГТУ. – 2014. – Том 17. – № 1. – С. 87 – 91.
2. Коробейников, А. Ф. Исследование гидростатических направляющих // Вестник Хакасского технического института - филиала КГТУ. – Абакан, 2006. – № 22. – С. 42 – 47.
3. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). – М.: ГРНТИ, 2002. – 426 с.
4. Бушуев, В.В. Гидростатическая смазка в станках. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.
5. Гидродинамические направляющие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.linear.com.ua/catalog/hiwin-linear-motion.pdf> (дата обращения 17.03.2017).
6. Фещенко, В.Н. Справочник конструктора. Книга 2. Проектирование машин и их деталей. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 400 с.
7. А.с. 982867 СССР, М.Кл<sup>3</sup> В 23 Q 1/02. Гидростатические направляющие металлорежущего станка /С.Н. Аграновский, Г.В. Гаврилова, Б.С. Шейнин; заявитель и патентообладатель Особое конструкторское бюро станкостроения. – № 3297247/25-08; заявл. 05.06.81; опубл. 23.12.82. Бюл. № 47. – 2 с.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 656.61.052

Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е. Сравнительная характеристика смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений с обобщенным пуассоновским законом // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 3 – 8.

Для описания случайных погрешностей навигационных измерений с «утяжеленными хвостами» предлагаются смешанные законы распределения двух типов и обобщенный пуассоновский закон распределения. Степень отличия указанных законов распределения от закона Гаусса характеризуется эксцессом распределения.

Путем сравнения кривых нормированных плотностей смешанных законов распределения с обобщенным пуассоновским законом распределения, имеющих одинаковый эксцесс, показано, что при значениях существенного параметра смешанных законов более шести нормированные плотности смешанного закона совпадают с нормированными плотностями обобщенного пуассоновского закона.

Для опису випадкових похибок навігаційних вимірювань з «хвостами, що обважнюють», пропонуються змішані закони розподілу двох типів і узагальнений пуассонівський закон розподілу. Ступінь відмінності вказаних законів розподілу від закону Гауса характеризується ексцесом розподілу.

Шляхом порівняння кривих нормованої щільності змішаних законів розподілу з узагальненим пуассонівським законом розподілу, що мають однаковий ексцес, показано, що при значеннях істотного параметра змішаних законів більше шести нормована щільність змішаного закону співпадає з нормованою щільністю узагальненого пуассонівського закону.

For description of random error terms of the navigation measurings with the «made heavier tails» the mixed laws of distributing of two types and generalized Puasson law of distributing are offered. The degree of difference of the indicated laws of distributing from the law of Gauss is characterized by the excess of distributing.

By comparison of the crooked rationed closenesses of the mixed laws of distributing with the generalized Puasson law of distributing, having an identical excess, it is shown that at the values of substantial parameter of the mixed laws more than six rationed closenesses of the mixed law coincide with the rationed closenesses of the generalized Puasson law.

Табл. 4. Список лит.: 6 назв.

УДК 656.61.052.484

Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 9 – 14.

Предложен способ расхождения опасно сближающихся судов снижением скоростей на неизменном курсе. Предполагается, что торможение судов производится с заданными скоростями уклонения и требуется найти момент времени начала торможения судов, при котором минимизируются потери их ходового времени.

Рассмотрен процесс снижения скорости одного судна активным торможением, а второго – пассивным торможением. Получены аналитические выражения для расчета оптимальных параметров маневра расхождения.

Запропоновано спосіб розходження суден, що небезпечно зближуються, зниженням швидкостей на незмінному курсі. Передбачається, що гальмування суден проводиться із заданими швидкостями ухилення і вимагається знайти момент часу початку гальмування суден, при якому мінімізуються втрати їх ходового часу.

Розглянуто процес зниження швидкості одного судна активним гальмуванням, а другого – пасивним гальмуванням. Одержані аналітичні вирази для розрахунку оптимальних параметрів маневру розходження

The method of divergence of the dangerously drawn together vessels by the decline of speeds on an unchanging course is offered. It is assumed that braking of courts is produced with the set speeds of deviation and it is required to find moment of time of beginning of braking of vessels, which the losses of their working time are minimized at.

The process of decline of speed of one ship is considered by the active braking, and second – passive braking. Analytical expressions for the calculation of optimum parameters of maneuver of divergence are got.

Ил. 1. Список лит.: 3 назв.

УДК 656.61.052

Вагушенко Л.Л. Поддержка определения эффективного двухэтапного плана расхождения с судами // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 15 – 20.

Предлагаются для использования в бортовых системах предупреждения столкновений инструменты информационной поддержки, облегчающие выбор эффективного плана расхождения с судами, включающего два одновременных изменения курса и скорости: одно - для избегания чрезмерного сближения с судами, второе – для возвращения к выполнению плана перехода.

Пропонуються для використання в бортових системах попередження зіткнень інструменти інформаційної підтримки, що полегшують вибір ефективного плану розходження з судами. План включає дві одночасних зміни курсу і швидкості: одну – для уникнення надмірного зближення з судами, другу – для повернення до виконання плану переходу.

Informational support tools to facilitate the selection of effective plan to avoid collision, which includes two consecutive changes in course and speed, are proposed in the article. The first alteration of course and speed is intended to avoid a close-quarters situation with ships, and the second - to return to the implementation of the passage plan.

Ил. 5. Список лит.: 6 назв.

УДК 656.61.052

Волков Е.Л. Оперативный способ предупреждения столкновения судов с помощью области недопустимых параметров движения // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 21 – 24.

Показано, что оценка уровня опасности сближения судов и выбор маневра расхождения судов при существовании угрозы их столкновения возможны при использовании области недопустимых параметров движения оперирующего судна, полученной с помощью граничных изостадий.

Получены аналитические выражения для граничных изостадий при относительном уклонении судна вправо и влево, а также приведен графический вид области недопустимых параметров.

Описаны процедуры оценки ситуации сближения судов и оперативного выбора маневра расхождения.

Показано, що оцінка рівня небезпеки зближення суден і вибір маневру розходження суден при існуванні загрози їх зіткнення можливі при використанні області неприпустимих параметрів руху оперуючого судна, одержаної за допомогою граничних ізостадій.

Одержано аналітичні вирази для граничних ізостадій при відносному ухиленні судна управо і вліво, а також приведений графічний вид області неприпустимих параметрів.

Описано процедури оцінки ситуації зближення суден і оперативного вибору маневру розходження.

It is shown that estimation of level of danger of rapprochement of vessels and choice of maneuver of divergence of vessels at existence of threat of their collision is possible at the use of region of impermissible parameters of motion of operating ship, got by limit izostadys.

Analytical expressions are got for limit izostadys at relative deviations of ship to the right and to the left, the graphic type of region of impermissible parameters is also resulted.

Procedures of estimation of situation of rapprochement of vessels and operative choice of maneuver of divergence are described.

Ил. 2. Список лит.: 5 назв.

УДК 656.61.052

Ворохобин И.И. Определение эффективных координат судна при избыточных измерениях // Автоматизация судовых технических средств: науч. - техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 25 – 29.

При наличии избыточных линий положения точность координат судна можно повысить, применяя корректный алгоритм их расчета. Показано, что при использовании метода максимального правдоподобия точность оценки координат судна будет максимальной.

Однако уравнивания правдоподобия, обеспечивающие минимальную ковариационную матрицу обсервованных координат, можно получить, как указывается в статье, используя аналитическое выражение двумерной плотности векториальной погрешности, которое определяется числом линий положения,

их геометрическим фактором и законами распределения погрешностей линий положения.

За наявності надмірних ліній положення точність координат судна можна підвищити, застосовуючи коректний алгоритм їх розрахунку. Показано, що при використанні методу максимальної правдоподібності точність оцінки координат судна буде максимальною.

Проте рівняння правдоподібності, які забезпечують мінімальну коваріаційну матрицю координат судна, можна одержати, як вказується в статті, використовуючи аналітичний вираз двовимірної щільності векторіальної похибки, який визначається числом ліній положення, їх геометричним чинником і законами розподілу похибок ліній положення.

At presence of surplus lines of position exactness of coordinates of ship can be promoted, applying the correct algorithm of their calculation. It is shown that at the use of maximum likelihood method exactness of estimation of coordinates of ship will be maximal.

However got equalizations of verisimilitude, providing the minimum variance-covariance matrix of coordinates, can be, as is specified in the article, using analytical expression of closeness of vector's error, which is determined by the number of lines of position, their geometrical factor and laws of distributing of errors of lines of position.

Список лит.: 4 назв.

УДК 681.516

Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 30 – 36.

Предложено комплексное методическое обеспечение для создания систем автоматизации с программируемыми контроллерами, которое разработано в рамках проекта TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (Тренинги в области технологий автоматизации для Украины), в котором приняли участие: Донецкий национальный технический университет, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Национальный университет «Одесская морская академия», Одесский национальный политехнический университет и Харьковский национальный университет радиоэлектроники, а также пять западноевропейских университетов: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences; Carinthia University of Applied Sciences; Polytechnic University of Valencia; University of Antwerpen; University of Limerick. Даны рекомендации по совершенствованию этого методического обеспечения.

Запропоновано комплексне методичне забезпечення для створення систем автоматизації з програмованими контролерами, яке розроблено в рамках проекту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU - "Trainings in Automation Technologies for Ukraine" (Тренінги в області технологій автоматизації для України), в якому взяли участь: Донецький національний технічний університет, Івано-Франківський національний технічний

університет нафти і газу, Національний університет «Одеська морська академія», Одеський національний політехнічний університет і Харківський національний університет радіоелектроніки, а також п'ять західноєвропейських університетів: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences; Carinthia University of Applied Sciences; Polytechnic University of Valencia; University of Antwerpen; University of Limerick. Дано рекомендації щодо вдосконалення цього методичного забезпечення.

The complex methodical support for the creation of automation systems with programmable controllers was proposed, which was developed within the framework of the TEMPUS project 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU - "Trainings in Automation Technologies for Ukraine", which was attended by: Donetsk National Technical University, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, National University "Odessa Maritime Academy", Odessa National Polytechnic University and Kharkov National University The University of Radio Electronics, as well as five Western European universities: Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences; Carinthia University of Applied Sciences; Polytechnic University of Valencia; University of Antwerpen; University of Limerick. Recommendations are given for improving this methodological support.

Ил. 1. Список лит.: 12 назв.

УДК 656.61.052

Казак Ю.В., Северин В.В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 37 – 43.

Рассмотрена позиционная векториальная погрешность, обусловленная погрешностью угла кладки пера руля при использовании двух моделей прогноза поворота судна первого и второго порядка. Приведены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности в зависимости от погрешности перекладки пера руля и выбранной модели прогноза поворота судна.

Произведена численная оценка векториальной погрешности и показано, что векториальная погрешность, возникающая при использовании модели прогноза второго порядка, примерно в четыре раза меньше погрешности в случае прогноза поворота по простейшей модели первого порядка.

Розглянуто позиційну векторіальну похибку, яка обумовлена похибкою кута кладки керма при використанні двох моделей прогнозу повороту судна першого і другого порядку. Приведено аналітичні вирази для оцінки величини векторіальної похибки в залежності від похибки перекладання керма і вибраної моделі прогнозу повороту судна.

Проведена чисельна оцінка векторіальної похибки і показано, що векторіальна похибка, що виникає при використанні моделі прогнозу другого порядку, приблизно в чотири рази менше похибки у разі прогнозу повороту по простій моделі першого порядку.

The position vector error conditioned by the error of corner of laying of feather of helm at the use of two models of prognosis of turn of ship of the first and second order is considered. Analytical expressions for estimation of size of vector error de-



pending on the error of position of feather of helm and chosen model of prognosis of turn of ship are resulted.

Numerical estimation of vector error is produced and it is shown that error arising up at the use of model of prognosis of the second order, approximately in a four times less error in the case of prognosis of turn on the simplest model of the first order.

Ил. 1. Список лит.: 8 назв.

УДК 656.61.052.484

Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 44 – 50.

Проанализировано влияние инерционных характеристик поворотливости судна на величину дистанции кратчайшего сближения судов при выполнении маневра расхождения судов изменением курса. Представлена ситуация, когда оперирующее судно выполняет поворот на курс уклонения, а цель сохраняет неизменные параметры движения.

Применена модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью поворота. Получены аналитические выражения характеристик поворота и величина уменьшения дистанции кратчайшего сближения. Показано влияние этого обстоятельства на размеры области опасных курсов и предложены рекомендации по обеспечению безопасного расхождения судов в таких ситуациях. Приведен численный пример, подтверждающий корректность полученных результатов.

Проаналізовано вплив інерційних характеристик поворотності судна на величину дистанції найкоротшого зближення суден при виконанні маневру розходження змінюю курсу. Запропонована ситуація, коли судно виконує поворот на курс ухилення, а ціль зберігає незмінні параметри руху.

Використана модель обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю повороту. Одержано аналітичні вирази характеристик повороту і величина зменшення дистанції найкоротшого зближення. Показано вплив цієї обставини на розміри області небезпечних курсів і запропоновані рекомендації по забезпеченню безпечного розходження суден в таких ситуаціях. Приведено чисельний приклад, підтверджуючий коректність отриманих результатів.

Influencing of inertia descriptions of agility of ship on the size of distance of the shortest rapprochement of vessels at implementation of maneuver of divergence of vessels is considered the change of course. A situation is represented, when an operating ship executes a turn on the course of deviation, and a target saves the unchanging parameters of motion.

Model of rotatory motion of ship with permanent angular speed of turn is analyzed. Analytical expressions of descriptions of turn and size of diminishment of distance of the shortest rapprochement are got. Influence of this circumstance is shown on the sizes of region of dangerous courses and recommendations on providing of safe divergence of vessels in such situations are offered. A numeral example confirmative correctness of the got results is resulted.

Ил. 3. Список лит.: 5 назв.

Кулаков М.А. Выбор оптимальных скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 51 – 56.

При внешнем управлении процессом расхождения судов их совместную стратегию расхождения выбирает система управления движением судов и показано, что в ряде ситуаций такой стратегией является одновременное снижение скоростей обоих судов активным и/или пассивным торможением.

В статье рассматривается выбор оптимальных скоростей уклонения судов, одного активным, а второго пассивным торможением, при условии начала торможения в нулевой момент времени. Критерием оптимальности являются возможные потери ходового времени судов.

Получены аналитические выражения и алгоритм расчета оптимальных скоростей уклонения судов, разработана компьютерная программа расчета оптимального маневра, а корректность полученных результатов расчета подтверждена имитационным моделированием.

При зовнішньому управлінні процесом розходження суден їх сумісну стратегію розходження вибирає система управління рухом суден і показано, що у ряді ситуацій такою стратегією є одночасне зниження швидкостей обох суден активним або пасивним гальмуванням.

У статті розглядається вибір оптимальних швидкостей ухилення суден, одного активним, а другого пасивним гальмуванням, за умови початку гальмування в нульовий момент часу. Критерієм оптимальності є можливі втрати ходового часу суден.

Одержано аналітичні вирази і алгоритм розрахунку оптимальних швидкостей ухилення суден, розроблена комп'ютерна програма розрахунку оптимального маневру, а коректність одержаних результатів розрахунку підтверджена імітаційним моделюванням.

At the external process control of divergence of vessels their joint strategy of divergence is chosen by the traffic control system of vessels and it is shown that in a number of situations the simultaneous decline of speeds of both vessels is such strategy by the active and/or passive braking.

The choice of optimum speeds of deviation of vessels is examined in the article, one active, and second by the passive braking, on condition of beginning of braking in the zeroing moment of time. The possible losses of working time of vessels are the criterion of optimum.

Analytical expressions and algorithm of calculation of optimum speeds of deviation of vessels are got, the computer program of calculation of optimum maneuver is developed, and correctness of the got results of calculation is confirmed by the imitation design.

Ил. 1. Список лит.: 5 назв.

Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Накул Ю.А. Выбор датчиков определения координат контейнера для компьютерной системы учета загрузки судна // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 57 – 64.

Проведено обоснование выбора компонентов компьютерной системы загрузки контейнеровоза устанавливаемых на спредер контейнерного перегружателя для определения его координат в пространстве. Составлена классификация и проведен анализ существующих типов гироскопов и акселерометров с учетом требуемых измеряемых параметров. Проанализированы основные недостатки выбранного материала компонентов.

Проведено обґрунтування вибору компонентів комп'ютерної системи завантажів контейнеровоза встановлених на спреди контейнерного перегрузочного пристрою для визначення його координат у просторі. Составлена класифікація та проведено аналіз існуючих типів гіроскопів та акселерометрів з урахуванням необхідних заміряних параметрів. Аналізуються основні недостатності вибраної матеріалу компонентів.

The substantiation of the choice of the components of the computerized system for loading the container carrier of the conveyor overloader mounted on the spreader for determining its coordinates in space has been made. A classification was made and an analysis of existing types of gyroscopes and accelerometers was performed taking into account the required parameters to be measured. The basic non-abilities of the selected material components are analyzed.

Табл. 1. Ил. 4. Список лит.: 17 назв.

УДК 681.587.72:004,3'144:621.4(045)

Нікольський В.В., Лисенко В.Є., Нікольський М.В. Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двофазного двигуна внутрішнього згоряння // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 65 – 69.

Проведено аналіз недоліків роботи електромагнітного приводу клапана подачі газу для двофазних двигунів внутрішнього згоряння. Запропонована заміна приводу на п'єзоелектричні актуатори та двигуни.

Проведен анализ недостатков работы электромагнитного привода клапана подачи газа для двухтопливных двигателей внутреннего сгорания. Предложено замена привода на пьезоэлектрические актуаторы и двигатели.

The analysis of the shortcomings of the solenoid operation gaz admission valve (SOGAV) for dual-fuel internal combustion engines is carried out. Proposed replacement of the drive to the piezoelectric actuators and motors.

Табл. 1. Ил. 4. Список лит.: 10 назв.

УДК 681.2.082: 681.586.773: 532.133: 532.137

Нікольський М.В., Бережний К.Ю. Програмне забезпечення для визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 70 – 76.

Запропоновано програмне забезпечення комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин, яка реалізована на базі першого навчального модуля «Програмовані контролери і Profinet» SmartLab, якого розроблено в рамках проекту TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-

TEMPUS-JPHES TATU - Тренінги в області технологій автоматизації для України.

Предложено программное обеспечение компьютерной системы определения реологических характеристик судовых технических жидкостей, которая реализована на базе первого учебного модуля «Программируемые контроллеры и Profinet» SmartLab, разработанного в рамках проекта TEMPUS 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU – Тренінги в області технологій автоматизації для України.

The software of the computer system for determining the rheological characteristics of ship's technical fluids is proposed, which is implemented on the basis of the first training module "Programmable Controllers and Profinet" from SmartLab developed under the TEMPUS project 544010-TEMPUS-1-2013-1-DE-TEMPUS-JPHES TATU - Trainings in Automation Technologies for Ukraine.

Табл. 3. Ил. 7. Список лит.: 5 назв.

УДК 656.61.052.484

Пятаков Э.Н., Омельченко Т.Ю. Формирование полной стратегии расхождения судов // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 77 – 83.

В стесненных районах интенсивного судоходства возникают ситуации опасного сближения трех судов, которые не координируются МППСС-72. Поэтому в статье рассмотрена ситуация опасного сближения трех судов и показано, что для предупреждения столкновения каждому из судов системой координации предписывается определенный тип поведения (маневрирование или сохранение параметров движения). Оперирующее судно для предупреждения столкновения формирует гибкую стратегию расхождения, которая содержит приоритетный маневр, учитывающий предписанный тип поведения взаимодействующих судов, и резервный маневр для случая игнорирования партнером предписанных обязанностей.

Для предупреждения столкновения более предпочтительным является маневр изменения курса судна. Поэтому расчет параметров маневра уклонения требует учета соответствия форм траекторий истинного и относительного движения.

В стислих районах інтенсивного судноплавства виникають ситуації небезпечного зближення трьох суден, які не координуються МППСС-72. Тому в статті розглянута ситуація небезпечного зближення трьох суден і показано, що для попередження зіткнення система координації для кожного із суден вимагає певного типу поведінки (маневрування або збереження параметрів руху). Судно, яке оперує, для попередження зіткнення формує гнучку стратегію розходження, яка містить пріоритетний маневр, що враховує тип поведінки взаємодіючих суден, який вимагається координатором, і резервний маневр для випадку ігнорування партнером своїх обов'язків.

Для попередження зіткнення переважним є маневр зміни курсу судна. Тому розрахунок параметрів маневру ухилення вимагає урахування відповідності форм траекторій істинного і відносного руху.

In the straitened districts of intensive navigation there are the situations of dangerous rapprochement of three vessels which are not coordinated by CollReg-72. Therefore in the article the situation of dangerous rapprochement of three vessels is considered and it is shown that for warning of collision to each of ships the system of coordination orders the certain type of conduct (maneuvering or saving of parameters of motion). An operating ship for warning of collision forms flexible strategy of divergence, which contains a priority maneuver, taking into account the prescribed type of conduct of interactive vessels, and reserve maneuver, for the case of ignoring by the partner of the prescribed duties.

For warning of collision the maneuver of change of course of ship is more preferable. Therefore the calculation of parameters of maneuver of deviation requires the account of accordance of forms of trajectories of veritable and relative motion.

Ил. 1. Список лит.: 4 назв.

#### УДК 681.51

Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. Волоконно-оптический датчик электростатического поля // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 84 – 89.

Вірішено завдання автоматизації контролю параметрів електростатичного поля. Побудовано модель волоконно-оптичного датчику, що дозволяє ефективного здійснювати вимірювання. Проведено експерименти з перетворенням світлового випромінювання в електрооптичному датчику електростатичного поля.

Решена задача автоматизации контроля параметров электростатического поля. Создана модель волоконно-оптического датчика, позволяющая эффективно осуществлять измерения. Проведены эксперименты по преобразованию светового излучения в электрооптическом датчике электростатического поля.

The task of automating the control of the parameters of the electrostatic field is solved. A model of a fiber-optic sensor has been created, which makes it possible to effectively perform measurements. Experiments have been carried out on the conversion of light radiation into an electro-optical sensor of an electrostatic field.

Ил. 2. Список лит.: 8 назв.

#### УДК 681.7.0068.4

Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. Волоконно-оптический датчик обертів роторного обладнання // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 90 – 95.

Вірішено завдання автоматизації контролю параметрів обертального руху роторного обладнання. Побудовано модель волоконно-оптичного датчику, що дозволяє ефективного здійснювати вимірювання. Проведено експерименти з перетворенням світлового випромінювання в оптичному датчику обертів.

Решена задача автоматизации контроля параметров вращательного движения роторного оборудования. Создана модель волоконно-оптического датчика, позволяющая эффективно осуществлять измерения. Проведены экспе-

рименты по преобразованию светового излучения в оптическом датчике оборотов.

The task of automating the control of rotational motion parameters of rotary equipment is solved. A model of a fiber-optic sensor has been created, which makes it possible to carry out measurements efficiently. Experiments have been carried out on converting light radiation in an optical speed sensor.

Ил. 3. Список лит.: 10 назв.

УДК 621.86

Sandler A.K., Drozd E.V. Automated lubrication system of guides to move heavy cargoes // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 96 – 99.

Для построения системы навигационной безопасности при погрузке сверхтяжелых грузов необходимо осуществлять эффективное управление системами смазки направляющих для перемещения груза. Существующие системы смазки не в полной мере по своим спецификационным и техническим характеристикам соответствуют задачам перемещения груза с берега на судно. Возможности существующих известных систем имеют ограничения по эффективности и качеству использования смазки.

Предложено новое схмотехническое решение системы управления процессом подачи смазки на такелажные направляющие.

В разработанной системе реализовано автоматическая подача смазки, адекватная весу и геометрии груза.

Для побудови системи навігаційної безпеки при навантаженні надважких вантажів необхідно здійснювати ефективне управління системами змащення напрямних для переміщення вантажу. Існуючі системи змащення не в повній мірі за своїми специфікаційними і технічними характеристиками відповідають завданням переміщення вантажу з берега на судно. Можливості існуючих відомих систем мають обмеження за ефективністю та якістю використання мастила.

Запропоновано нове схмотехнічне рішення системи управління процесом подачі мастила на такелажні напрямні.

У розробленій системі реалізовано автоматична подача мастила, адекватна вазі і геометрії вантажу.

For the construction of a navigation safety system when loading super-heavy loads, it is necessary to effectively control the lubrication systems of the guides for moving the load. The existing lubrication systems do not fully comply with the specifications and technical characteristics of the tasks of moving cargo from shore to ship. The capabilities of existing known systems have limitations on the efficiency and quality of lubricant use.

A new circuit-based solution for the control system for the lubricant supply to the rigging guides has been proposed.

In the developed system, an automatic lubricant supply is realized that is adequate for the weight and geometry of the load.

Ил. 1. Список лит.: 7 назв.

## СОДЕРЖАНИЕ

Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е. Сравнительная характеристика смешанных законов распределения погрешностей навигационных измерений с обобщенным пуассоновским законом .....	3
Бурмака И.А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей .....	9
Вагущенко Л.Л. Поддержка определения эффективного двух-этапного плана расхождения с судами .....	15
Волков Е.Л. Оперативный способ предупреждения столкновения судов с помощью области недопустимых параметров движения .....	21
Ворохобин И.И. Определение эффективных координат судна при избыточных измерениях .....	25
Горб С.И., Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Шапо В.Ф. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров .....	30
Казак Ю.В., Северин В.В. Оценка векториальной погрешности поворота судна и минимизация ее величины .....	37
Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик ..	44
Кулаков М.А. Выбор оптимальных скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения .....	51
Никольский В.В., Хнюнин С.Г., Накул Ю.А. Выбор датчиков определения координат контейнера для компьютерной системы учета загрузки судна .....	57
Нікольський В.В., Лисенко В.Є., Нікольський М.В. Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двохпаливного двигуна внутрішнього згоряння .....	65
Нікольський М.В., Бережний К.Ю. Програмне забезпечення для визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин .....	70
Пятаков Э.Н., Омельченко Т.Ю. Формирование полной стратегии расхождения судов .....	77
Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. Волоконно-оптический датчик электростатического поля .....	84
Сандлер А.К., Цюпко Ю.М. Волоконно-оптический датчик обертів роторного обладнання .....	90
Sandler A.K., Drozd E.V. Automated lubrication system of guides to move heavy cargoes .....	96
Рефераты .....	100

ПРАВИЛА  
оформления и представления рукописей для сборника  
"Автоматизация судовых технических средств"

1. Рукопись представляется в электронном виде *на украинском или русском языке и/или английском языке*: текст в формате \*.doc, набранный на листах формата А5 кеглем 10, гарнитура Times New Roman. Использование списков в редакторе Word не допускается. К рукописи прикладывается дубликат рисунков в виде отдельных файлов в любом графическом битовом формате. Электронная версия рукописи сопровождается распечаткой, которая должна быть подписана всеми авторами.

2. Объём статьи (с иллюстрациями, подрисовочными подписями и рефератом) не должен превышать 0,5 авторского листа.

3. На первой странице рукописи должны быть построчно указаны: индекс УДК; инициалы и фамилии авторов; сокращенное наименование учреждения, в котором выполнялась работа; название статьи. В конце рукописи приводится реферат на трёх языках – русском, украинском и английском, – включающий фамилии авторов с инициалами, название статьи, краткое содержание и ключевые слова.

4. Таблицы печатаются в тексте и должны быть снабжены поясняющими заголовками. Ссылки на таблицы даются в сокращенном виде (таб.).

5. В формулах, буквенных обозначениях и индексах латинский шрифт должен иметь наклон (за исключением тригонометрических функций), а греческий шрифт и кириллица должны быть набраны прямым шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Единицы физических величин должны соответствовать ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрология. Единицы физических величин" и иметь общепринятые обозначения.

6. Библиографическое описание произведений печати должно соответствовать ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 166 с.

7. Текст статей должен соответствовать требованиям постановления Президиума ВАК Украины от 15.01.03, № 7-05/1, "О повышении требований к специальным изданиям, внесенных в перечни ВАК Украины".

Подписано в печать 28.09.2017.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная №1. Гарнитура Times new Roman.

Усл. печ. л. 7,1. Тираж 100 экз. Заказ №

"ИздатИнформ" НУ "ОМА"

Свидетельство ДК №1292 от 20.03.2003

65029, г. Одесса, ул. Дидрихсона, 8, корп. 7, к. 206

Тел./факс: (0482) 34-14-12

publish@onma.edu.ua