

УДК 629.5.061
DOI: 10.37890/jwt.vi73.326

Исследование влияния погрешностей измерения навигационных параметров на качество процесса управления безэкипажным судном

М.А. Мельников¹
В.И. Плющаев¹

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Большое внимание уделяется проблемам создания судов с реализацией дистанционного или автономного управления. Для судов такого типа качественным образом меняются требования к судовым системам измерения, обработки и передачи навигационных параметров. Важность данной проблемы определяется возможным существенным ущербом при возникновении аварийных ситуаций при принятии управленческих решений на основе ошибочной информации, возникающей в каналах измерения. В статье рассмотрены погрешности, возникающие в каналах измерения навигационных параметров на примере судна с колесным движительно-рулевым комплексом. Математическая модель судна позволила исследовать влияние погрешностей измерения навигационных параметров на качественные показатели процесса управления судном при реализации различных алгоритмов управления. Приведены результаты исследований влияния погрешностей измерения навигационных параметров на процесс удержания судна на заданной траектории при внешних ветровых воздействиях.

Ключевые слова: колесное судно, динамические характеристики судна, датчики навигационных параметров, погрешности измерения, качественные показатели процесса управления, безэкипажное судовождение.

Investigation of influence of navigation parameters measurement errors on the quality of an unmanned vessel control process

Michael A. Melnikov¹
Valery I. Plyushchaev¹

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Much attention is paid to the problems of creating vessels with the implementation of remote or autonomous control. For vessels of this type, the requirements for ship systems for measuring, processing and transmitting navigation parameters are qualitatively changed. The importance of this problem is determined by the possible significant damage in case of emergency situations while making management decisions based on misinformation arising in the measurement channels. The article considers the errors arising in the measurement channels of navigation parameters by the example of a vessel with a wheeled propulsion and steering unit. The mathematical model of the vessel made it possible to investigate the influence of measurement errors of navigation parameters on the qualitative indicators of the ship management process when implementing various control algorithms. The results of studies of the influence of measurement errors of navigation parameters on the process of keeping the vessel on a given trajectory under external wind influence are presented.

Keywords: wheeled vessel, dynamic characteristics of the vessel, sensors of navigation parameters, measurement errors, qualitative indicators of the control process, unmanned navigation.

Введение

В последнее время много публикаций посвящены безэкипажному судовождению. Появились первые образцы судов, работающих в режимах дистанционного и автоматического управления [1-3].

В «Положении по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)» предусматривается пять категорий, характеризующих режим управления судном [4]: ручное управление, ручное управление с поддержкой принятия решения, дистанционное управление с возможностью перехода на ручное, дистанционное управление и автономное управление. При изменении условий плавания может меняться и характер управления судном.

При реализации элементов безэкипажного судовождения качественно меняются требования к надежности судовых систем. Успешное решение задач безэкипажного судовождения выдвигает на первый план проблему обеспечения высокой надёжности судовых систем, включая системы связи и сбора информации, необходимых для принятия решений. Важность этой проблемы обусловлена возможным существенным ущербом, который может возникнуть при возникновении аварийных ситуаций.

На рис.1 представлены элементы процесса оценки параметров движения судна. При движении судна в различных режимах и условиях (движение по заданной траектории, изменение курса, швартовка, циркуляция, ветровое воздействие и пр.) требуется оценка различных наборов параметров ($x_1 \dots x_n$), а следовательно, должны применяться и различные средства контроля параметров. Качество процесса управления будет в значительной степени определяться надёжностью средств контроля параметров и влиянием внешних условий на эти средства. В процессе эксплуатации возможны отказы датчиков (постоянные или кратковременные); каждый датчик имеет случайные составляющие погрешности измерения; в результате воздействия внешних факторов могут возникнуть систематические погрешности измерений и т.п. (рис. 1). Влияние указанных факторов в каждом канале измерений вносит вклад в результирующие качественные показатели процесса управления, причем вклад каждого канала в конечный результат может отличаться существенным образом.

В связи с вышеизложенным, реализация элементов безэкипажного судовождения требует предварительной проработки ряда вопросов, в том числе:

- изучения влияния погрешностей измерения параметров судовых технологических процессов (как отдельных, так и их сочетания) на качественные показатели процесса управления при различных эксплуатационных режимах судна;
- поиска возможностей компенсации влияния погрешностей измерения параметров судовых технологических процессов на процесс управления режимами движения судна;
- разработки алгоритмов автоматического определения отказов измерительных каналов и компенсационных действия систем управления при сбоях в каналах измерения и т.п.

Данная статья посвящена решению некоторых из поставленных вопросов, в частности, влияния на качественные показатели системы управления отказов датчиков и появления в каналах измерения систематических погрешностей.

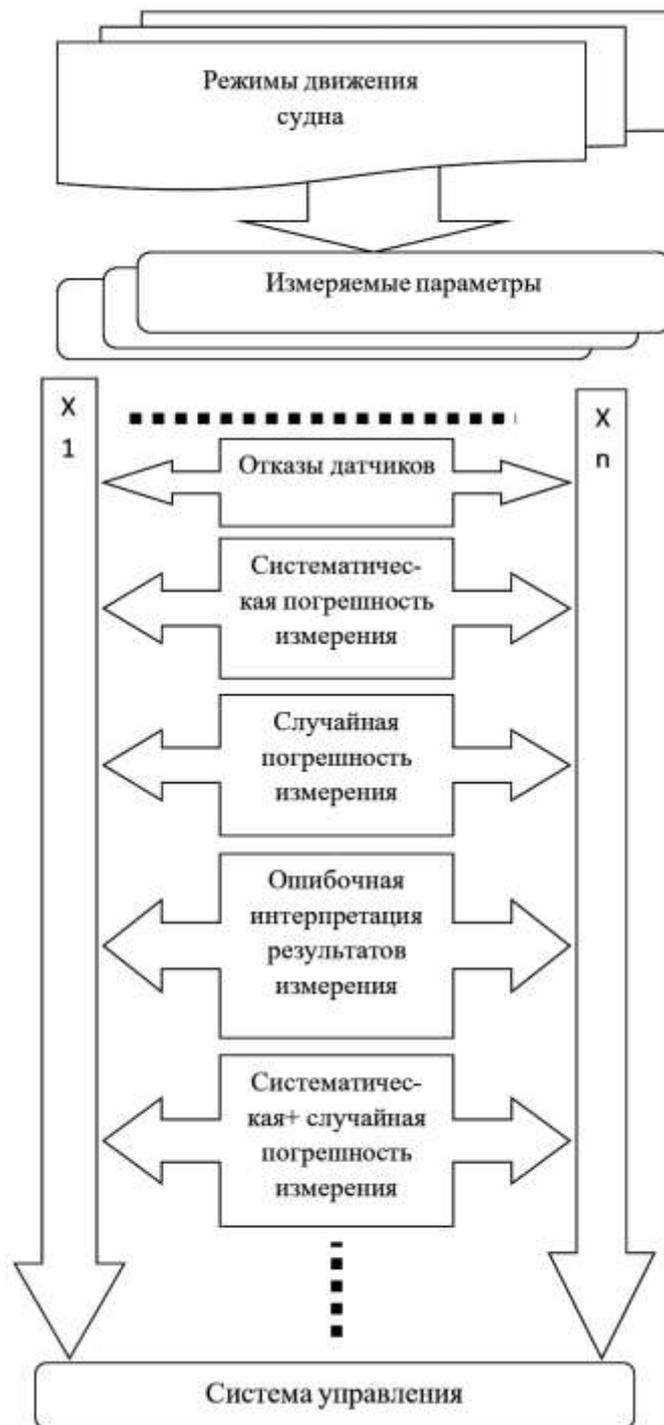


Рис. 1. Процесс оценки параметров движения судна

Методы исследования влияния параметров датчиков на качественные показатели процесса управления судном

В качестве объекта исследований выбран пассажирский теплоход «Золотое кольцо» с колесным движительно-рулевым комплексом. Движение и маневрирование судна осуществляется посредством двух гребных колес в кормовой части судна с независимыми электроприводами. Математическая модель судна приведена в [5].

При движении по заданной траектории для формирования управляющего воздействия на приводы гребных колес используется функция

$$R = k_{\alpha}(\alpha - \alpha_0) + k_{\omega}\omega + k_y(y - y_0),$$

где $(\alpha - \alpha_0)$ – отклонение от заданного курса судна, рад;

ω - угловая скорость поворота судна, рад/с;

$(y - y_0)$ - отклонение от заданной траектории, м;

$k_{\alpha}, k_{\omega}, k_y$ - коэффициенты пропорциональности.

Предложенная в [5] модель позволяет исследовать влияние на качественные показатели процесса управления судном как параметров самого судна, так и внешних воздействий, оценивать динамику судна при реализации различных алгоритмов управления.

В [6] рассмотрен алгоритм управления, позволяющий судну удерживаться на заданной траектории в условиях ветрового воздействия. На рис. 2 приведены результаты моделирования движения судна при ветровом воздействии при следующих условиях:

- ветер в правый борт появляется при $t = 300$ с, скорость ветра 5 м/с;
- на начальном этапе судно движется с $U_{ход} = 1$ (частоты вращения гребных колес $n_1 = n_2 = n_{max}$);
- $k_{\alpha} = 20$, $k_{\omega} = 70$, $k_y = 0,8$;
- погрешность измерения параметров равна 0 («идеальные» датчики).

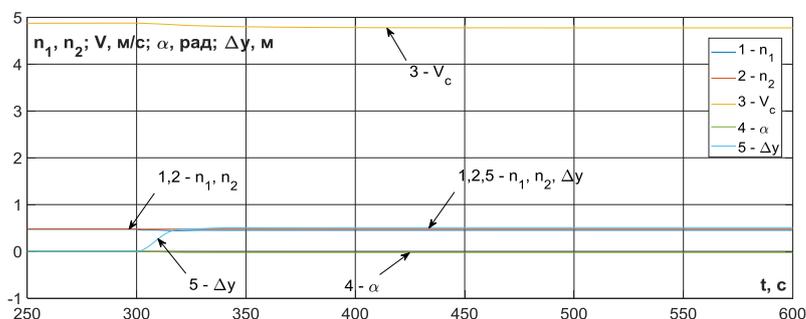


Рис.2. Динамика судна при использовании «идеальных» датчиков

При появлении ветрового воздействия судно смещается на $\Delta y = 0,51$ м (кривая 5) и продолжает двигаться по параллельной траектории. За счет вращающегося момента, создаваемого ветром, диаметральной плоскость (ДП) судна поворачивается по часовой стрелке. Этот момент компенсируется за счет увеличения частоты вращения второго колеса n_2 . В результате судно движется по заданной траектории с отклонением ДП от направления движения с $\Delta\alpha = 1,31^\circ$ (кривая 4). Скорость судна V_c меняется с 4,88 м/с до 4,78 м/с (кривая 3). Высокое качество управления обеспечивают большие значения коэффициентов $k_{\alpha}, k_{\omega}, k_y$.

На практике погрешности измерения датчиков могут принимать значения до нескольких процентов, что приводит к резкому ухудшению качества управления при высоких коэффициентах функции R . Результаты моделирования при использовании реальных датчиков (с шагом квантования реальных каналов измерения $\Delta\alpha_{\text{кв}} = 0,57^\circ$, $\Delta\omega_{\text{кв}} = 5,7^\circ/\text{с}$, $\Delta y_{\text{кв}} = 0,01 \text{ м}$) показаны на рис. 3. Алгоритм не обеспечивает удержание судна на заданном курсе (кривая 1).

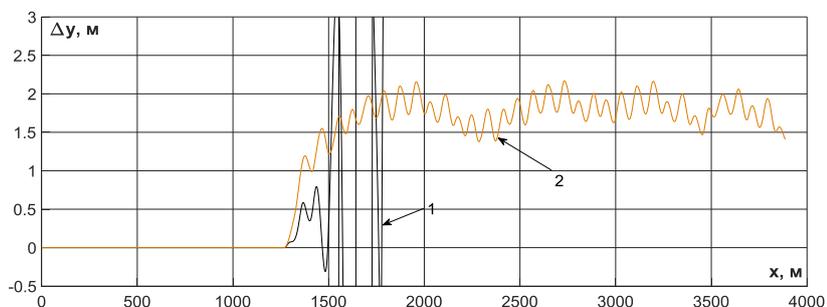


Рис.3. Динамика судна при увеличении погрешностей измерения датчиков

Подбор коэффициентов k_α , k_ω , k_y может обеспечить приемлемые качественные показатели процесса удержания судна на курсе и при рассмотренных шагах квантования измерительных каналов.

На рис. 3 представлены результаты расчетов для шагов квантования $\Delta\alpha_{\text{кв}} = 0,57^\circ$, $\Delta\omega_{\text{кв}} = 5,7^\circ/\text{с}$, $\Delta y_{\text{кв}} = 0,5 \text{ м}$ и $k_\alpha = 10$, $k_\omega = 40$, $k_y = 0,16$ (кривая 2). Судно отклоняется от заданной траектории на $\Delta y \approx 1,8 \text{ м}$ (на рис.2 кривая 1, $\Delta y = 0,51 \text{ м}$). На рис. 4 представлены результаты моделирования при использовании «идеальных» датчиков при $k_\alpha = 20$, $k_\omega = 70$, $k_y = 0,8$ (кривая 1) и для $k_\alpha = 10$, $k_\omega = 40$, $k_y = 0,16$ (кривая 2).

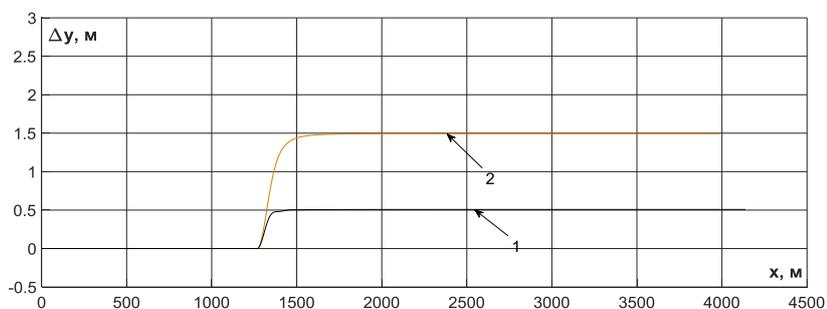


Рис.4. Динамика судна при базовых коэффициентах и нулевой погрешности измерительных каналов.

Отклонение от заданной траектории выросло с $\Delta y = 0,51 \text{ м}$ до $\Delta y = 1,495 \text{ м}$, а угол с $\Delta\alpha = 1,31^\circ$ до $\Delta\alpha = 1,45^\circ$. Данный вариант при дальнейших исследованиях будет принят за базовый для сравнения полученных вариантов.

Влияния погрешностей измерения навигационных параметров на качество процесса управления безэкипажным судном

Факторы, связанные с измерением навигационных параметров, влияющих на качество процесса управления судном приведены на рисунке 1.

Отказ датчиков. Можно выделить четыре основных типа отказов: полный отказ, при котором датчик выдает нулевые значения (например, при обрыве информационной линии), полный отказ, при котором датчик выдает последние значения (например, при заклинивании подвижных частей датчика), кратковременный отказ с выдачей нулевых и кратковременный отказ с выдачей последних значений.

Рассмотрим поведение судна при полном отказе датчика и выдаче им нулевого сигнала (рис.5).

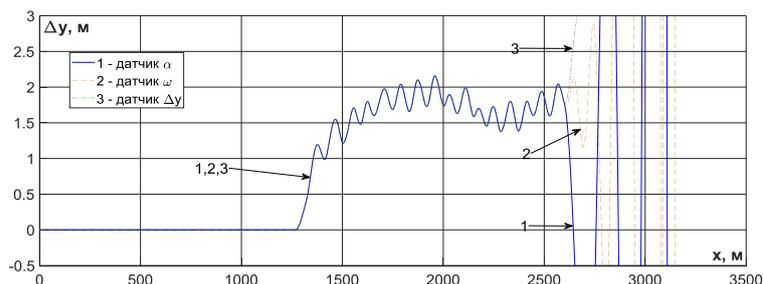


Рис.5. Динамика судна при базовых коэффициентах и полном отказе датчиков с выдачей нулевых значений

На рис. 5 представлены результаты моделирования движения судна при ветровом воздействии при следующих условиях:

- ветер в правый борт появляется при $t = 300$ с, скорость ветра 5 м/с;
- на начальном этапе судно движется с $U_{ход} = 1$ (частоты вращения гребных колес $n_1 = n_2 = n_{max}$);
- $k_\alpha = 10$, $k_\omega = 40$, $k_y = 0,16$;
- управляющий алгоритм штатно обрабатывает ветровое воздействие при $300 \leq t < 600$
- при $t \geq 600$ управляющий алгоритм получает недостоверные данные из каналов измерения (нулевые), судно уходит с траектории.

На рис. 6 представлены траектории движения судна при отказе датчиков с выдачей ненулевых значений.

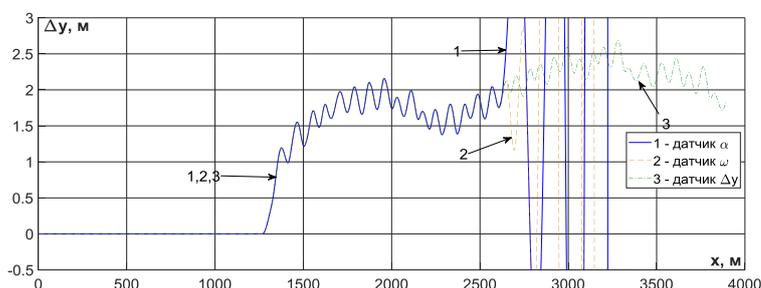


Рис.6. Динамика судна при базовых коэффициентах и полных отказах датчиков с выдачей ненулевых значений

При некоторых сочетаниях измеренных навигационных параметров возможно удержание судна на заданной траектории при неисправном датчике (кривая 3 на рис. 6 при неисправном датчике Δy). Однако при других сочетаниях параметров алгоритма возможна потеря управления.

Как показывают результаты моделирования, система управления с кратковременными отказами датчиков (порядка нескольких секунд) с выдачей как нулевых, так и ненулевых значений (рис.7) измеренных параметров обеспечивает удержание судна на курсе.

Систематическая погрешность. В результате внешнего воздействия на навигационное оборудование различных помех в результате измерений может вноситься систематическая погрешность. На рис. 8 представлены траектории движения судна при различных величинах погрешности в измерительном канале угла отклонения курса α . В данном случае рассматривается аддитивная погрешность, пропорциональная шагу квантования, например $\alpha + \Delta\alpha_{\text{кв}}$ (кривая 2) и $\alpha + 2 \cdot \Delta\alpha_{\text{кв}}$ (кривая 3).

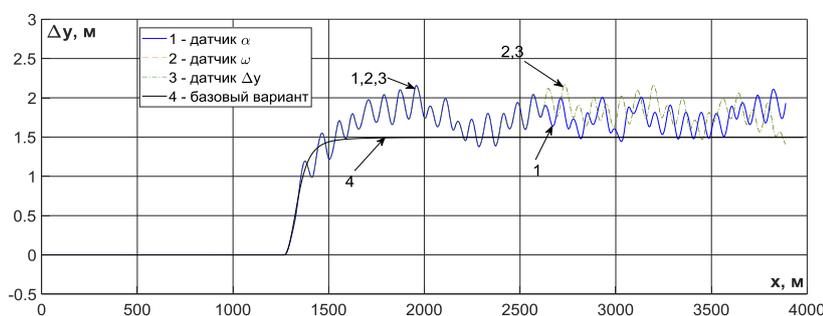


Рис.7. Динамика судна при базовых коэффициентах и кратковременных отказах датчиков с выдачей ненулевых значений

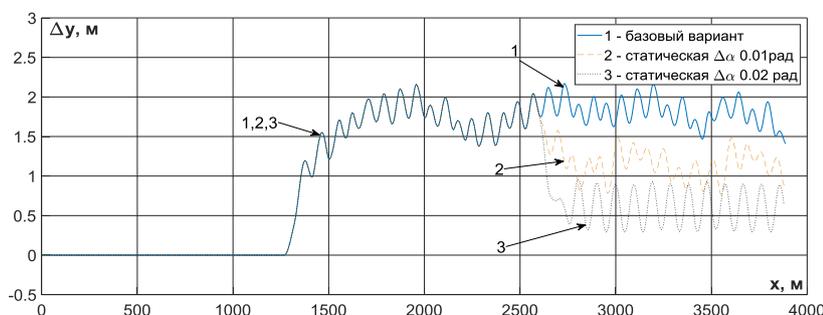


Рис.8. Траектории движения судна при различной погрешности в канале отклонения курса α

При изменении систематической погрешности измерения курса изменяется величина отклонения судна от заданной траектории, однако система управления сохраняет свою работоспособность. Это подтверждают результаты моделирования (рис. 9), проведенные при внесении систематической погрешности во все три канала измерения (величина систематической погрешности составляет, соответственно, $\Delta\alpha_{\text{кв}} = 0,57^\circ$, $\Delta\omega_{\text{кв}} = 5,7^\circ/\text{с}$, $\Delta y_{\text{кв}} = 0,5\text{м}$).

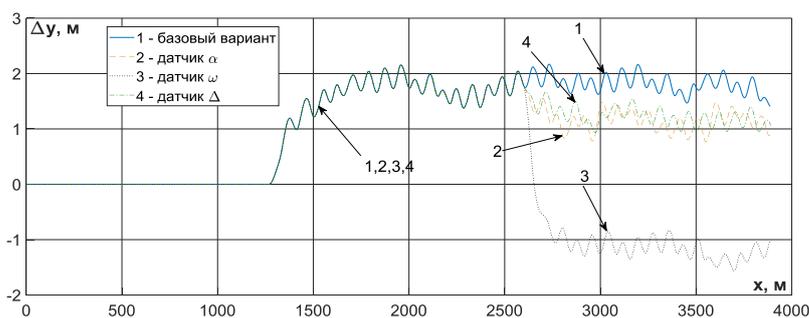


Рис.9. Траектории движения судна при систематических погрешностях в каналах измерения

Ошибочная интерпретация результатов. На рис. 10 представлены траектории движения при одном из возможных вариантов неверной интерпретации (инверсия значений, поступающих с измерительных каналов). Судно уходит с заданной траектории при возникновении подобной ситуации в любом из каналов измерения.

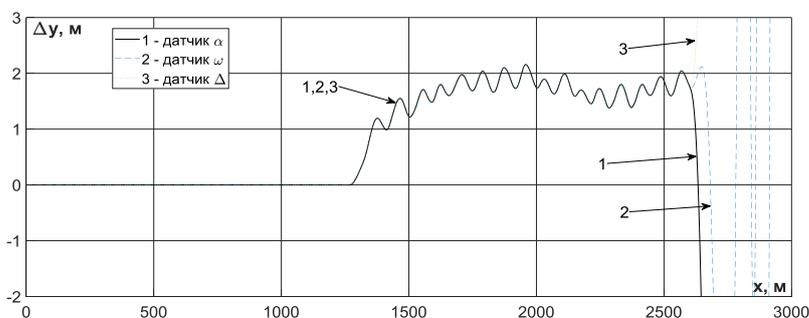


Рис.10. Траектории движения судна при ошибочной интерпретации измерения

Влияние случайных погрешностей на качество процесса управления будет представлено в следующей работе.

Обсуждение

По результатам исследований можно констатировать следующее.

При отказе любого навигационного датчика система управления судна теряет свою работоспособность. Следует отметить, что используемые датчики являются основополагающими для создания различного типа авторулевых для судов морского и речного флота. Кратковременные отказы датчиков в некоторых случаях позволяют системе управления удерживать судно на заданном курсе, однако это следует отнести к нештатной ситуации.

Отсюда вытекает требование к дублированию каналов измерения, а также к необходимости разработки алгоритмов обнаружения отказов датчиков. Дублирующие каналы позволяют на базе непрерывного сравнения выявлять неработоспособные датчики. Кроме того, рассматриваемые навигационные параметры взаимосвязаны между собой, поэтому система управления должна отслеживать «допустимые» коридоры изменения каждого из параметров при изменении других. Такой анализ позволит выявить «неестественное» поведение показаний датчика на фоне информации с других датчиков.

Систематическая погрешность в каналах измерения (естественно, в разумных пределах) оставляет систему управления в работоспособном состоянии, позволяя удерживать судно на заданной траектории, влияя на величину отклонения от заданной траектории.

Ошибочная интерпретация результатов также может привести к отказу работоспособности системы (в частности, в случае инверсии значений, поступающих с измерительных каналов). Однако погрешности такого рода могут возникнуть при ремонте или модернизации системы и должны выявляться в процессе наладки системы. В случае внезапного появления подобных ситуаций во время работы системы управления (например, в результате внешнего воздействия на кабельные трассы и их механического или биологического повреждения), необходимо отнести ситуацию к нештатной, но система благодаря вышеописанным мерам (дублирование каналов измерения, введение коридоров допустимых изменений значений в канале измерения, анализ показаний в канале измерения по показаниям в каналах связанных величин) позволяет выявить подобные неисправности и перейти на работу по исправным дублирующим каналам измерения.

Выводы

Проведенные исследования подтверждают важность проблемы обеспечения высокой надёжности судовых систем, в том числе систем сбора информации (включающих в свой состав датчики, узлы предварительной обработки информации, каналы связи и т.п.), необходимых для генерации управляющих воздействий на механизмы и агрегаты судна при реализации дистанционного или безэкипажного режимов эксплуатации.

Отказ любого навигационного датчика может привести к тяжелой аварийной ситуации. При создании подобных систем управления должно быть предусмотрено дублирование каналов измерения, причем желательно для измерения одного и того же параметра использовать датчики, работающие на различных физических принципах. Алгоритмическое обеспечение системы управления безэкипажным судном должно в обязательном порядке включать в себя алгоритмы автоматического определения отказов измерительных каналов и компенсационных действий системы управления при сбоях в каналах измерения.

Литература

1. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HofTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата доступа: 25.08.2022).
2. Rolls-Royce Marine, "Autonomous ships. The next step.," Rolls-Royce plc., 2016. URL: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/tr-ship-intel-aawa-8pg.pdf> (дата доступа: 25.08.2022).
3. Carson, Daniel F., "An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring", 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067219300161?via%3Dihub> (дата доступа: 25.08.2022).
4. Положение по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС) Российский морской регистр судоходства. С.-Петербург, 2020
5. Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Математическая модель судна с колесным движительно – рулевым комплексом «Золотое кольцо». Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. - Астрахань. 2018. №3. С.36-46.

6. Бычков В.Я., Грошева Л.С., Площаев В. И. Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий. Морские интеллектуальные технологии. 2019. -№ 4 Т.2. - С.139-146.

References

1. International Maritime Organization, "Autonomous shipping," IMO, 2021. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (accessed: 25.08.2022).
2. Rolls-Royce Marine, "Autonomous ships. The next step.," Rolls-Royce plc., 2016. URL: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/%20customers/marine/ship-intel/rr-ship-intel-aawa-8pg.pdf> (accessed: 25.08.2022).
3. Carson, Daniel F., "An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring", 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067219300161?via%3Dihub> (accessed: 25.08.2022).
4. Polozhenie po klassifikatsii morskikh avtonomnykh i distantsionno upravlyaemykh nadvodnykh sudov (MANS) Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. S.-Peterburg, 2020
5. Bychkov V.YA., Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Matematicheskaya model' sudna s kolesnym dvizhitel'no – rulevym kompleksom «Zolotoe kol'tsO». [Mathematical model of a vessel with a wheeled propulsion and steering complex "Golden Ring".] Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya №3. [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Ser. Marine engineering and technology №3.]- Astrakhan. 2018, pp. 36-46.
6. Bychkov V.YA., Grosheva L.S., Plyushchaev V. I. Dinamika sudna s kolesnym dvizhitel'no-rulevym kompleksom v usloviyakh vneshnikh vozdeistvii. [Dynamics of a vessel with a wheeled propulsion and steering complex under external influences.] Morskie intellektual'nye tekhnologii № 4 volume 2. [Marine intelligent technologies № 4 volume 2.] 2019, pp.139-146.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мельников Михаил Алексеевич, техник кафедры Радиоэлектроники, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: mikh.melnickow1999@yandex.ru

Michael A. Melnikov, technician of the Department of Radio Electronics, "Volga State University of Water Transport", Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Площаев Валерий Иванович, профессор, д.т.н., зав кафедрой Радиоэлектроники, «Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vip3345@yandex.ru

Valery I. Plyushchaev, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Radio Electronics, "Volga State University of Water Transport", Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 08.09.2022; опубликована онлайн 20.12.2022.
Received 08.09.2022; published online 20.12.2022.