МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5.017
EDN UFKSYW

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАЧКИ АВТОНОМНОГО СУДНА

С.В. Шульц, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: svsch9@yandex.ru
М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 191186 Россия, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 7А, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org
В.Ю. Шульц, канд. физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: vysch@yandex.ru

Актуальность выбранной темы исследования объясняется активным развитием автономного судовождения и необходимостью решения проблем, возникающих в процессе эксплуатации морских автономных надводных судов. В данной работе приведен обзор некоторых моделей прогнозирования качки судна на нерегулярном волнении, построенных на основе искусственных нейронных сетей. Практическое преимущество рассмотренных подходов заключается в возможности их применения в составе относительно малопроизводительных бортовых вычислительных комплексов автономных судов, где экономически нецелесообразно или технически невозможно размещение высокопроизводительных вычислительных кластеров, а результаты расчетов должны получаться в реальном времени. Сделан вывод, что результаты расчетов, полученные с помощью рассмотренных моделей, имеют существенную погрешность прогнозирования параметров качки судна вблизи экстремумов кривой углов бортовой и килевой качки, что ставит под вопрос безопасность их применения.

Ключевые слова: *автономное судно, моделирование качки, нерегулярное волнение, искусственные нейронные сети.*

Для цитирования: Шульц С.В. Обзор применения искусственных нейронных сетей в задачах моделирования качки автономного судна / С.В. Шульц, М.А. Кутейников, В.Ю. Шульц // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025. № 78. С. 44 — 50. — EDN UFKSYW.

AN OVERVIEW OF APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MODELING MOTIONS OF AUTONOMOUS SHIP

S.V. Shults, PhD student, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: svsch9@yandex.ru
M.A. Kuteinikov, DSc, FAI Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org
V.Yu. Shults, PhD, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vysch@yandex.ru

The relevance of the chosen research topic is explained by the active development of autonomous navigation and the need to solve problems arising during the operation of marine autonomous surface ships. This paper provides an overview of some models for predicting motions of a ship in irregular waves, built on the basis of artificial neural networks. The practical advantage of the considered approaches lies in the possibility of their application as part of relatively low-performance onboard computing systems of autonomous ships, where it is economically impractical or technically impossible to place high-performance computing clusters, and

the calculation results should be obtained in real time. It is concluded that the calculation results obtained using the considered models have a significant error in predicting the ship's motions parameters near the extremes of the curve of the angles of rolling and pitching, which calls into question the safety of their application.

Key words: *autonomous ship, simulation of ship motions, irregular sea waves, artificial neural networks.*

For citation: Shults S.V., Kuteinikov M.A., Shults V.Yu. An overview of application of artificial neural networks in modeling motions of autonomous ship. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 44 — 50. EDN UFKSYW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2018 года компаниями Rolls-Royce и Finferries были продемонстрированы возможности первого в мире полностью автономного парома «Falco» при плавании без участия экипажа. Судно выполнило автоматическую швартовку при помощи разработанной для него автономной навигационной системы. Все операции были выполнены без какого-либо вмешательства со стороны экипажа [1].

В период с 2019 по 2023 год введены в эксплуатацию автономные суда «Маршал Рокоссовский», «Генерал Черняховский» (Россия); «ReVolt», «Yara Birkeland», «ASTAT», «Milliampere» (Норвегия); «Jin Dou Yun» (Китай) и др.

Основная мотивация внедрения систем автономного судовождения [2] — возможность сведения к минимуму человеческого фактора, который является основной причиной морских аварий и катастроф: исследования в области транспортных потерь и безопасности показывают, что причины 75 — 90 % морских аварий, произошедших за последние годы, можно отнести к человеческому фактору [3, 4].

Внедрение систем автономного судовождения позволит в перспективе морским компаниям-перевозчикам экономить средства за счет автоматизации процессов, оптимизации маршрутов, повышения топливной эффективности, снижения требований к конструкции, оснащению судов и условиям плавания в части обитаемости, большей грузоподъемности при том же водоизмещении и др. [5], что делает исследования в области автономного судовождения перспективными и актуальными.

Обеспечение безопасной эксплуатации полностью автономного судна требует среди прочего существования надежного метода, достоверно воспроизводящего движение судна на волнении [6], то есть выполняющего предсказание параметров качки судна на нерегулярном волнении во избежание его опрокидывания и навала на другие суда.

Искусственные нейронные сети известны своей способностью к нахождению нелинейных зависимостей в данных. В этой связи интерес вызывают методы прогнозирования параметров качки, основанные на искусственных нейронных сетях.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧКИ СУДНА

В статье [7] предложена модель предсказания килевой качки на основе искусственной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (long short-term memory, LSTM), использующей в качестве входных данных двумерный последовательный временной ряд высот волн. Обучение модели выполняется при помощи алгоритма адаптивной оценки момента («Adam»).

Валидация разработанной модели выполнена путем сопоставления ее прогнозов с данными параметров качки судна, полученными методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD). Дополнительно проведено сравнение результатов работы модели с результатами модели одномерного временного ряда волн. Моделирование проводилось для случаев четырех-, пяти- и шестибалльного волнения.

В отличие от одномерной модели, которая показывает способность к предсказанию параметров вертикальной качки (линейные колебания), но плохо справляется с предсказанием килевой (вращательные колебания), разработанная модель показывает лучшие результаты в обоих случаях. Недостатком модели является существенная погрешность определения дифферента вблизи экстремумов кривой углов килевой качки (рис. 1).

В работе [8] для прогнозирования бортовой качки используется гибридная модель на базе авторегрессионного интегрированного скользящего среднего (autoregressive integrated moving average, ARIMA) и глубокой нейронной сети (deep neural network, DNN).

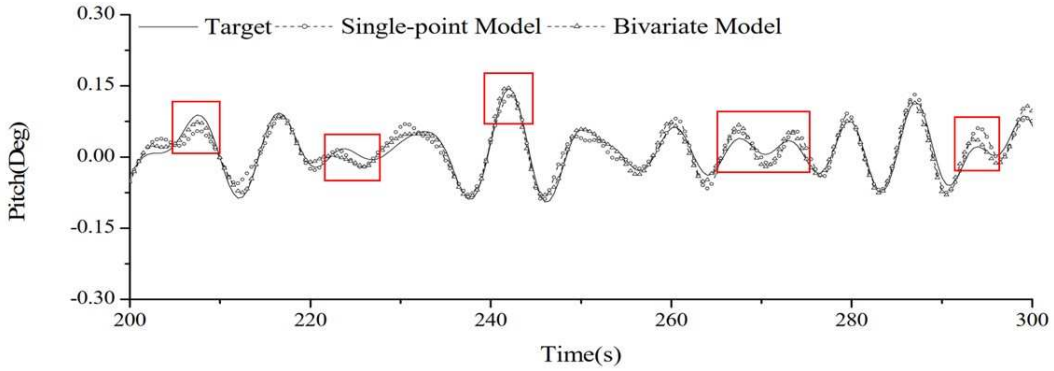

Рис. 1. Сравнение точности предсказаний одномерной (одноточечной) и двумерной моделей на четырехбалльном волнении. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений дифферента

Модель ARIMA является вычислительно простой линейной моделью анализа и прогнозирования временных рядов, однако входные данные в задачах прогнозирования качки практически всегда существенно нелинейны. Искусственные нейронные сети же, в том числе DNN, способны качественно моделировать нелинейные системы. Гибридная модель представляет собой комбинацию линейной и нелинейной составляющих. Теоретически сильная сторона гибридного подхода заключается в способности одинаково хорошо моделировать линейные и нелинейные системы.

Валидация модели выполнена путем сопоставления результатов прогнозирования с набором данных, полученным путем записи параметров качки плавучей добывающей установки на нерегулярном волнении.

Точность линейной модели ARIMA ожидаемо оказалась хуже, чем у «оригинальной» DNN и гибридной моделей (рис. 2). Модель DNN и гибридная модель показывают лучшую способность к прогнозированию параметров качки, причем гибридная модель работает точнее на всех протестированных горизонтах (длительностях) предсказания.

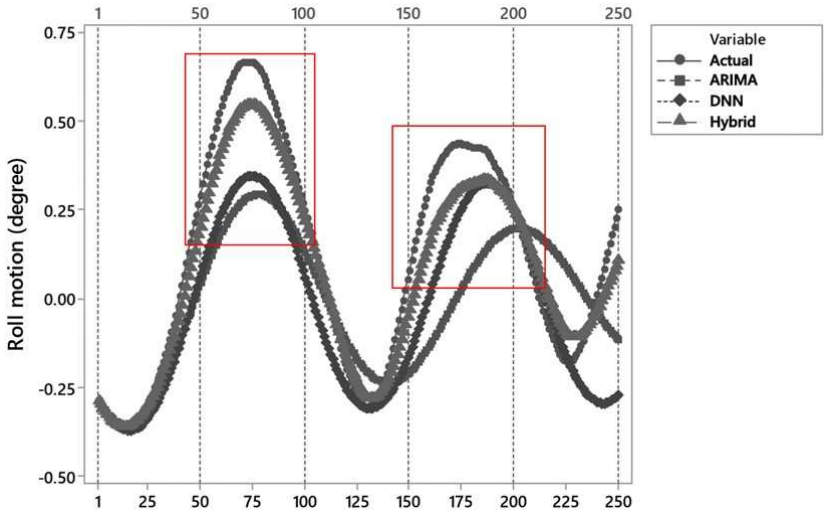

Рис. 2. Сравнение точности предсказаний моделей ARIMA, DNN и гибридной модели. Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений крена

Недостатком всех трех моделей является существенная погрешность определения крена вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки.

В работе [9] для предсказания рыскания судна под действием волн, ветра и течений в реальном масштабе времени используется вейвлет-нейронная сеть с временной задержкой на основе модели нелинейной авторегрессии с экзогенными входами (nonlinear autoregressive moving average with exogenous inputs, NARMAX).

Вейвлет-нейронная сеть (wavelet neural network, WNN) представляет собой разновидность нейронной сети с локальным откликом, использующей в качестве функции активации вейвлет-функцию. WNN устанавливает связь между вейвлет-преобразованием и параметрами сети через так называемое аффинное соединение.

В предлагаемом подходе на вход вейвлет-нейронной сети текущие параметры качки и пространственных перемещений судна подаются вместе с архивными данными.

Валидация модели выполнена путем сравнения прогнозируемых значений рыскания с реальными данными, записанными аппаратурой, установленной на судне «YUKUN» во время выхода в море.

Разработанная модель обладает хорошими возможностями аппроксимации (рис. 3).

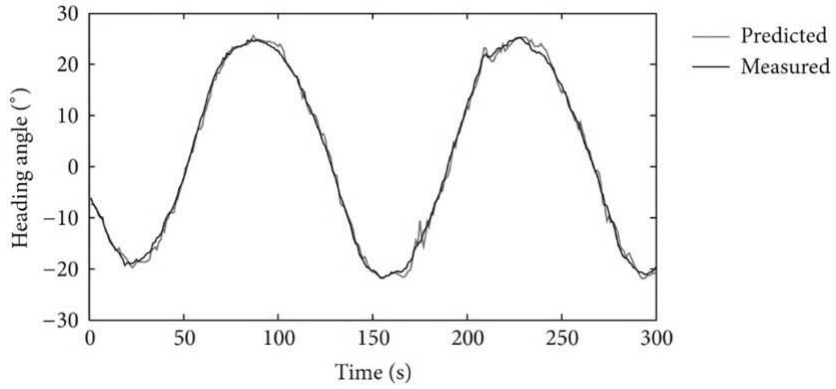

Рис. 3. Результат прогнозирования моделью WNN рыскания на 300 секунд вперед. Отклонения предсказанных значений курсового угла от фактических несущественны

Важно отметить, что исследовавшийся в статье [9] вопрос в контексте автономного судовождения очень важен с точки зрения предотвращения столкновений с другими судами (т.н. «навала» на другое судно), но непосредственного отношения к безопасности судна в аспекте предотвращения опрокидывания не имеет.

В работе [10] для предсказания ускорений вертикальной качки судна в реальном масштабе времени рассматривается использование моделей на основе искусственной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и управляемых рекуррентных блоков (gated recurrent unit, GRU) рекуррентной нейронной сети (recurrent neural network, RNN).

Модели семейства RNN подходят для решения задач обучения с учителем (supervised learning) на последовательных во времени наборах данных. Архитектура RNN является обобщением искусственной нейронной сети прямого распространения, в которую добавлена кольцевая структура таким образом, чтобы выходные данные некоторых нейронов подавались обратно на вход сети.

Оригинальная модель RNN подвержена проблемам взрывающегося и исчезающего градиента (exploding and vanishing gradient), кроме того, составляющая градиента мала в направлении, соответствующем долгосрочной корреляции, поэтому классическая модель RNN дает наилучшие прогнозы лишь в краткосрочной перспективе. Для устранения описываемых проблем авторы в своей работе рассматривают две производные от RNN и более эффективные модели: LSTM и GRU. Обучение сети в обоих случаях происходит при помощи алгоритма адаптивной оценки момента («Adam»).

Валидация разработанной модели была проведена на данных временной динамики вертикальных ускорений, записанных в носовой, кормовой оконечностях и на миделе крупномасштабной модели судна в процессе самоходных испытаний модели в море.

Предложенный подход показал ограниченную способность к предсказанию величин ускорений крупномасштабной модели судна на десятки секунд вперед.

Недостатком обеих рассмотренных моделей является существенная погрешность определения ускорений вблизи экстремумов кривой ускорений вертикальной качки в носовой и кормовой оконечностях (рис. 4).

В работе [11] для краткосрочного прогнозирования бортовой качки судна на волнении предлагается использовать искусственную нейронную сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM). Особенностью предлагаемого подхода является учет не только архивных данных по изменению крена судна, но и значения высот волн на некотором удалении от корпуса судна.

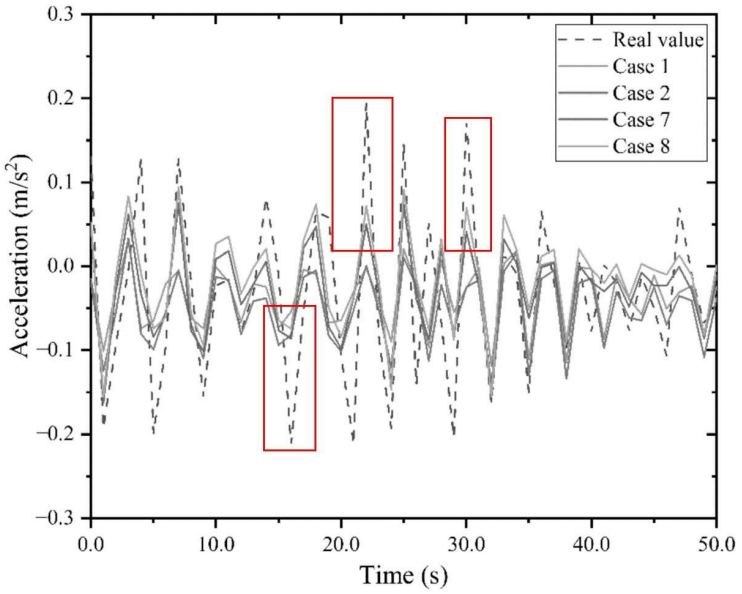

Рис. 4. Измеренные и предсказанные значения вертикального ускорения в носовой оконечности.
Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений ускорения

Данные о высотах волн и характеристиках качки, использованные для обучения и валидации модели, были получены методами вычислительной гидродинамики (CFD). Моделировалось пятибалльное волнение по спектру Пирсона — Московица и качка масштабной модели судна на нем. На практике высоты волн могут быть получены с помощью установленного на судне лидара или радиолокационной станции.

Анализ результатов расчетов, выполненный авторами работы, позволяет сделать следующие выводы:

- по сравнению с результатами прогнозирования, основанными исключительно на архивных данных о крене, прогнозирование бортовой качки с учетом высот волн значительно улучшает как точность, так и продолжительность периода прогнозирования;
- длительность периода прогнозирования увеличивается с увеличением расстояния от корпуса судна до точек, где замеряется высота волны;
- по мере увеличения количества точек, в которых измеряется высота волны, длительность периода прогнозирования модели увеличивается.

Недостатком модели является существенная погрешность определения крена вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки (рис. 5).

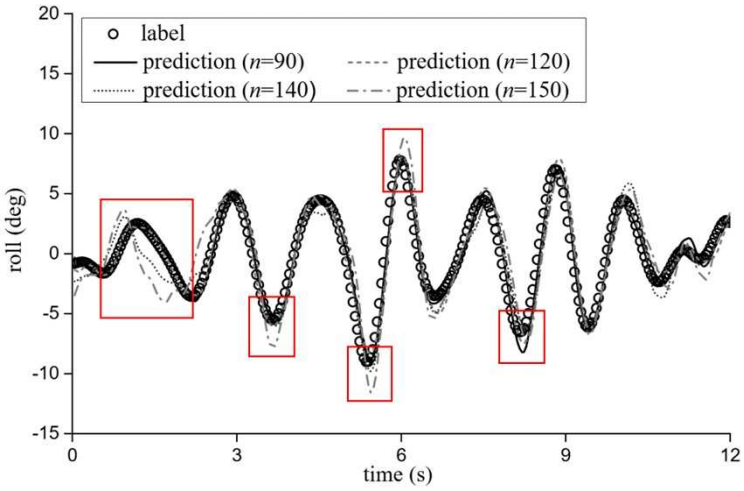

Рис. 5. Предсказание крена на основе архивных данных одновременно с замерами высоты волны в 1 м, 3 и 5 м от корпуса судна.
Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений крена

В работе [12] предложен метод прогнозирования бортовой качки судна, основанный на двунаправленной сети долгой краткосрочной памяти (bidirectional long short-term memory, Bi-LSTM) и механизме внимания к временным закономерностям (temporal pattern attention, TPA).

Модель Bi-LSTM-TPA сочетает в себе преимущества моделей Bi-LSTM и TPA. С помощью Bi-LSTM извлекаются временные особенности многомерных временных рядов в прямом и обратном направлениях. Модель TPA принимает на вход выходные характеристики сети Bi-LSTM и извлекает из них полезную для прогнозирования информацию о закономерностях, содержащуюся в состоянии каждого признака. Объединение моделей Bi-LSTM и TPA теоретически могло бы позволить использовать преимущества каждой из них в полной мере, тем самым повысив точность прогнозирования.

Валидация модели выполнена путем сравнения прогнозируемых значений параметров бортовой качки с реальными данными, записанными на судне во время выхода в море. Измерялся угол крена, угловое ускорение бортовой качки и др. Дополнительно проведено сравнение результатов работы модели с результатами работы «оригинальной» модели LSTM и метода опорных векторов (support vector machine, SVM).

Модель Bi-LSTM-TPA показала несколько лучшую точность прогнозирования, чем модели SVM и LSTM, особенно вблизи экстремумов кривой углов бортовой качки, где, как было показано ранее, модель LSTM не способна точно предсказывать значения крена. Однако отклонения (рис. 6) существенны, и применение полученных результатов может подвергнуть риску безопасность автономного судна.

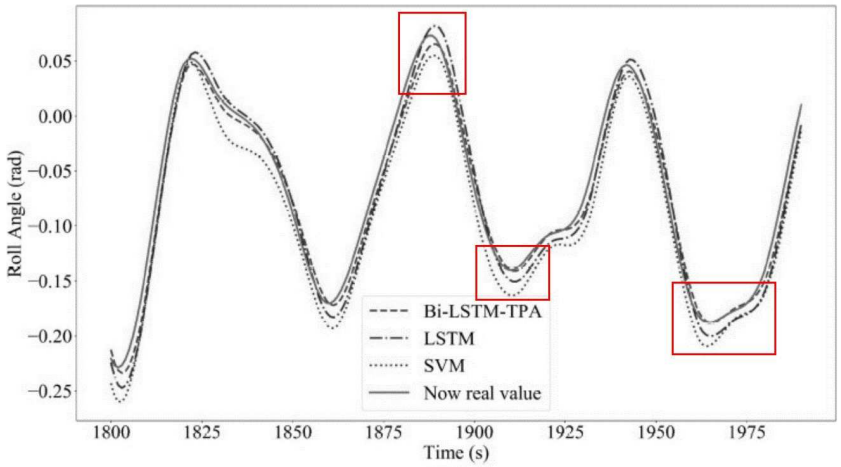

Рис. 6. Сравнение результатов работы моделей SVM, LSTM и Bi-LSTM-TPA.
Красными рамками обозначены опасные расхождения предсказанных и действительных значений дифферента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Искусственные нейронные сети в настоящее время успешно используются для решения сложно формализуемых задач, связанных с обработкой неструктурированных данных, и других задач, для которых не существует заранее заданного алгоритма решения.

К практическим преимуществам использования подходов на основе искусственных нейронных сетей в автономном судовождении можно отнести возможность их применения в составе относительно малопроизводительных бортовых вычислительных комплексов автономных судов, где экономически нецелесообразно или технически невозможно размещение высокопроизводительных вычислительных кластеров, а результаты расчетов должны получаться в реальном времени.

Недостатком рассмотренных моделей является то, что результаты расчетов, получаемые с их помощью, имеют существенную погрешность прогнозирования параметров качки судна вблизи экстремумов кривой углов бортовой и килевой качки, что ставит под вопрос безопасность применения этих результатов.

Искусственная нейронная сеть в сути своей является аппроксиматором, работающим по закономерностям, извлеченным из архивных данных на этапе обучения. Модели предсказания качки, основанные на искусственных нейронных сетях, не содержат в себе физики процесса качки, а потому дают недостоверные результаты, когда параметры входного процесса выходят за границы аппроксимационных возможностей модели или за границы «изученного» материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Madusanka N.S. Digital twin in the maritime domain: a review and emerging trends / N.S. Madusanka, Y. Fan, S. Yang, X. Xiang // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. Issue 5. — P. 1021. — DOI: 10.3390/jmse11051021.
2. Айзинов С.Д. Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С.Д. Айзинов, А.А. Буцанец, С.В. Смоленцев, В.Г. Сенченко, М.С. Лопатин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83 — 96.
3. Kasyk L. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents / L. Kasyk, A.E. Wolnowska, K. Pleskacz, T. Kapuściński // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13. — Issue. 11. — P. 6780. — DOI: 10.3390/app13116780.
4. Гомзяков М.В. Обзор аварийности морских транспортных судов Дальневосточного региона / М.В. Гомзяков // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 58/59. — С. 4 — 10.
5. Казунин Д.В. Разработка проекта требований РС к автономным судам / Д.В. Казунин, В.В. Ефимов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2020. — № 60/61. — С. 4 — 22.
6. Кутейников М.А. Критерии риска потери остойчивости судна без хода / М.А. Кутейников, В.Р. Самойлов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 40 — 50.
7. Liu Y. Improving deterministic pitch motions estimation using bivariate sequential wave input / Y. Liu, Q. Zheng, W. Duan, L. Huang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 688. Issue 3. — P. 033017. — DOI 10.1088/1757-899X/688/3/033017.
8. Suhermi N. Roll motion prediction using a hybrid deep learning and ARIMA model / N. Suhermi, S. Suhartono, D.D. Prastyo, B. Ali // Procedia Computer Science. — 2018. — Vol. 144. — P. 251 — 258. — DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.526.
9. Zhang W. Real-time ship motion prediction based on time delay wavelet neural network / W. Zhang, Zh. Liu // Journal of Applied Mathematics. — 2014. — Vol. 4. — Article ID 176297. — DOI: 10.1155/2014/176297.
10. Su Y. Real-time prediction of large-scale ship model vertical acceleration based on recurrent neural network / Y. Su, J. Lin, D. Zhao, C. Guo et al. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. Issue 10. — P. 777. — DOI: 10.3390/jmse8100777.
11. Tian X. Machine learning for short-term prediction of ship motion combined with wave input / X. Tian, Y. Song // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13. Issue 9. — P. 5298. — DOI: 10.3390/app13095298.
12. Wang Y. Ship roll prediction algorithm based on Bi-LSTM-TPA combined model / Y. Wang, H. Wang, D. Zou, H. Fu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. Issue 4. — P. 387. — DOI: 10.3390/jmse9040387.

REFERENCES

1. Madusanka N.S., Fan Y., Yang S., Xiang X. Digital twin in the maritime domain: a review and emerging trends. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Issue 5. P. 1021. DOI: 10.3390/jmse11051021.
2. Aizinov S.D., Butsanets A.A., Smolentsev S.V., Senchenko V.G., Lopatin M.S. Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 83 — 96. (In Russ.)
3. Kasyk L., Wolnowska A.E., Pleskacz K., Kapuściński T. The analysis of social and situational systems as components of human errors resulting in navigational accidents. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue. 11. P. 6780. DOI: 10.3390/app13116780.
4. Gomzyakov M.V. Overview of maritime transport casualties in the Far East. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 58/59. P. 4 — 10. (In Russ.)
5. Kazunin D.V., Efimov V.V. Development of draft RS requirements for autonomous vessels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2020. No. 60/61. P. 4 — 22. (In Russ.)
6. Kuteinikov M.A., Samoilov V.R. Criteria of risk of stability loss under dead ship condition. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56/57. P. 40 — 50. (In Russ.)
7. Liu Y., Zheng Q., Duan W., Huang L. Improving deterministic pitch motions estimation using bivariate sequential wave input. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 688. Issue 3. P. 033017. DOI 10.1088/1757-899X/688/3/033017.
8. Suhermi N., Suhartono S., Prastyo D.D., Ali B. Roll motion prediction using a hybrid deep learning and ARIMA model. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 144. P. 251 — 258. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.526.
9. Zhang W., Liu Zh. Real-time ship motion prediction based on time delay wavelet neural network. *Journal of Applied Mathematics*. 2014. Vol. 4. Article ID 176297. DOI: 10.1155/2014/176297.
10. Su Y., Lin J., Zhao D., Guo C. et al. Real-time prediction of large-scale ship model vertical acceleration based on recurrent neural network. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. Issue 10. P. 777. DOI: 10.3390/jmse8100777.
11. Tian X., Song Y. Machine learning for short-term prediction of ship motion combined with wave input. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 9. P. 5298. DOI: 10.3390/app13095298.
12. Wang Y., Wang H., Zou D., Fu H. Ship roll prediction algorithm based on Bi-LSTM-TPA combined model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. Issue 4. P. 387. DOI: 10.3390/jmse9040387.