

WIND EFFECT ON OPERATION BY DEVIATIONS DURING BROADSIDE MOTION

Scientists all around the world develop innovative ways of vessel operation with the use of modern means of navigation to improve the safety of navigation and optimize the time spent on carrying out the key shipboard operations. One such method the authors used in the present work is the management of the vessel on deviations from the line called the sighting. This article shows the influence of wind on tanker operation by the deviations. The third stage performs tanker mooring operation, i.e. moves broadside under action of operation system by the deviations. Ability to perform such maneuver under the action of wind on the side of the tanker appreciated. The figures show the trajectory of the tanker at different wind speeds and thrust impulse.

Key words: computer modeling, vessel motion modeling, wind effect, thruster modeling, mathematical model.

REFERENCES

1. Agarkov, Sergei Anatolevich. "Tanker motion modeling results analysis under the wind." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 16–22.
2. Yudin, Yurii Ivanovich. Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operacii k bortu sudna partnera, stojashego na jakore. Rossiiskaja Federacija, assignee. Patent 2509031. 9 Oct. 2010. Print. — 9 p.
3. Yudin, Yurii Ivanovich, S. N. Holichev, and S. O. Petrov. "Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operacii k bortu sudna, stojashego na jakore." *Vestnik of MSTU* 16.1 (2013): 187–192.
4. Holichev, Sergei Nikolaevich, and S. A. Agarkov. "Modeling of mooring to the partner vessel at the final stage of "side to side" approach using innovative vessel's steering methods." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 88–93.
5. Holichev, Sergei Nikolaevich, Yu. I. Yudin, and S. O. Petrov. "Modeling of the mooring to the partner vessel using innovative vessel's steering methods." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 81–87.
6. Yudin, Yurii Ivanovich, and Sergej Vladimirovich Pashencev. "Modelirovanie processa upravljajemogo dvizhenija sudna vdol linii polozhenija." *Vestnik of MSTU* 16.1 (2013): 141–147.
7. Yudin, Yurii Ivanovich, and S. V. Pashentsev. "Modeling of controlled ship moving along wild trajectory." *Yekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 32–36.
8. Petrov, Sergei Olegovich et al. "Strategy of management of tanker movement in the crosshair." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 55–59.
9. Petrov, Sergei Olegovich, Ju. I. Yudin, and S. N. Holichev. "Modelirovanie upravljajemogo dvizhenija sudna po proizvolnoi traektorii." *Vestnik of MSTU* 18.3 (2015): 60–67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Агарков Сергей Анатольевич —
доктор экономических наук, профессор, ректор.
ФГБОУ ВПО «Мурманский государственный
технический университет»
AgarkovSA@mstu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Agarkov Sergey Anatolievich —
Doctor of Economy, professor, Rector.
MSTU Murmansk State Technical University
AgarkovSA@mstu.edu.ru

УДК 655.62.052.4

**А. А. Ершов,
А. В. Теренчук**

ПРАКТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ПО БОРТОВОЙ КАЧКЕ СУДНА

Параметрический резонанс — одно из наиболее опасных явлений, возникающих при качке судна в условиях шторма. При определенных условиях параметрического резонанса неповрежденное и правильно загруженное судно может опрокинуться в течение нескольких секунд. В современных условиях прогнозирование параметрического резонанса представляет собой достаточно сложную задачу. Судоводителю

необходимо знать, при каких условиях для его судна возникает возможность появления параметрического резонанса в условиях шторма с целью более тщательного контроля поведения судна и своевременного изменения курса и скорости во избежание опасности опрокидывания. Для эффективного решения данной задачи судоводителю необходимо использовать привычные для него навигационные приборы, графики и номограммы, применяемые для решения других задач обеспечения безопасности судна. Одним из наиболее часто используемых российскими судоводителями инструментов является диаграмма штормового плавания, предложенная Ю. В. Ремезом. В данной статье предлагается способ отображения на диаграмме Ю. В. Ремеза возможности возникновения параметрического резонанса судна при определенных курсовых углах волны и заданной скорости движения судна. Подтверждена целесообразность использования для определения опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке диаграммы Ю. В. Ремеза, применение которой может повысить безопасность при плавании судна в шторм.

Ключевые слова: штормовое плавание, параметрический резонанс, практический способ определения, повышение безопасности штормового плавания.



АНАЛИЗ мировой и отечественной статистики аварийности показывает, что первое место среди основных причин гибели судов занимает потеря мореходных качеств судна в условиях шторма [1], [2]. Одной из возможных причин гибели судна в этих условиях может быть попадание его в зону параметрического резонанса по бортовой качке. Данное обстоятельство приводит к возникновению усиленных бортовых колебаний, зачерпыванию воды на верхнюю палубу при значительных углах крена на бортовой качке, к потере остойчивости и, как следствие, к возможному опрокидыванию судна. В связи с этим судоводителю необходимо уметь выбирать курс и скорость движения судна во избежание потери его остойчивости и опрокидывания в условиях штормовой погоды. Дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при плавании судна в узкостях, связаны с необходимостью удерживать судно в условиях ограниченной акватории и тем самым предотвращать столкновения с другими судами, а также предупреждать навалы на другие объекты (эти вопросы рассмотрены в работах [3] — [11]). Все это обуславливает дополнительные требования к повышенной точности решения задач, связанных с обеспечением безопасности судна, во избежание попадания в параметрический резонанс в штормовых условиях.

Суть параметрического резонанса может быть сведена к следующему: при исследовании основных видов качки на тихой воде рассматриваются собственные колебания судна. Анализ качки на регулярном и нерегулярном волнении предполагает рассмотрение вынужденных колебаний. При рассмотрении собственных колебаний судно выводится из положения равновесия внешним возмущением, а затем как бы «изолируется» от внешних воздействий и далее анализируется его колебательный процесс. Вынужденные колебания судна происходят под непрерывным воздействием внешних сил и моментов, изменяющихся по величине и направлению.

Однако возможен и еще один вид колебаний судна, возникающий вследствие того, что под воздействием внешних сил в процессе движения изменяются параметры судна как колебательной системы. В этом случае коэффициенты дифференциальных уравнений, зависящие от параметров системы, становятся функциями от времени. Такие колебания называют *параметрическими*. Они могут быть затухающими или возрастающими во времени. Первые соответствуют устойчивой системе, вторые свидетельствуют о том, что система неустойчива. Параметрические колебания наблюдаются при определенном соотношении между частотой внешнего воздействия и частотой собственных колебаний системы и в данном случае, по своей теории и последствиям для качки судна оно сходно с резонансом. По этой причине возникающие опасные соотношения между частотой вынужденных и собственных колебаний судна называют *параметрическим резонансом*. Параметрический резонанс по бортовой качке может приводить к резкому увеличению амплитуды бортовых колебаний судна, к попаданию забортной воды на палубу при увеличении углов крена на качке, к попаданию воды внутрь корпуса судна, а также к возможному опрокидыванию судна.

Ю. В. Ремезом был рассмотрен параметрический резонанс по бортовой качке судна, расположенного лагом к волне. Задача сводилась к рассмотрению двух видов качки: *вертикальной* и *бортовой*. При этом за счет вертикальной качки восстанавливающий момент при бортовых колебаниях становится периодической функцией времени, что может явиться причиной возникновения параметрического резонанса по бортовой качке. В результате было установлено, что опасность возникновения параметрического резонанса является наибольшей при следующем соотношении:

$$\sigma_k = 2\omega, \omega, \frac{2}{3}\omega, \quad (1)$$

где σ — частота волны или равная ей частота вынужденной вертикальной качки, с^{-1} ; ω — собственная частота бортовой качки судна, с^{-1} .

Опыт показывает, что для возникновения параметрического резонанса какого-либо вида качки не требуется для того, чтобы был сильный шторм. Например, если на тихой воде модель судна будет совершать гармоническую вертикальную качку, частота которой связана с собственной частотой бортовой качки соотношениями (1), то при сколь угодно малом отклонении модели судна вокруг продольной оси возникнут бортовые колебания с нарастающей амплитудой, что впоследствии повлечет за собой возможное опрокидывание модели судна. Это положение нашло подтверждение в результате проведения многочисленных модельных экспериментов (рис. 1).

а)



б)



в)



г)

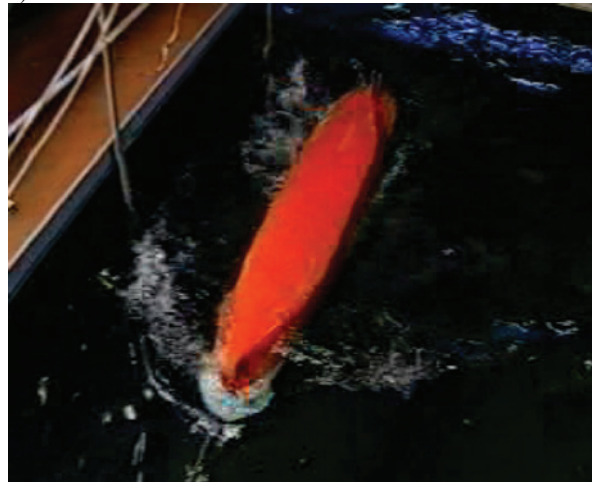


Рис. 1. Модельный эксперимент по определению влияния параметрического резонанса на остойчивость судна: а — судно сохраняет остойчивость; б — крен судна в условиях параметрического резонанса; в — потеря остойчивости судна в условиях параметрического резонанса; г — опрокидывание судна в условиях параметрического резонанса

С учетом ранее изложенного можно предположить, что соотношение (1) для возникновения параметрического резонанса справедливы также для судна, движущегося с постоянной скоростью v и курсовым углом q по отношению к регулярному волнению (кажущейся) частоте волнения σ_k . В этом случае относительная (кажущаяся) скорость распространения волн, т. е. их скорость по отношению к движущемуся судну, определится следующим образом:

$$C_k = C - v \cos q, \quad (2)$$

где C_k — относительная (кажущаяся) скорость распространения волн, м/с; C — скорость распространения волн, м/с; v — скорость движения судна, м/с; q — курсовой угол волнения, град.

Период собственной бортовой качки судна следует определять при помощи так называемой капитанской формулы:

$$\tau = \frac{cB}{\sqrt{h}}, \quad (3)$$

где τ — период собственной бортовой качки судна, с; B — ширина судна, м; h — начальная поперечная метацентрическая высота судна, м; c — постоянная, которая для большинства транспортных судов находится в диапазоне 0,78 — 0,82.

С учетом связи между частотой колебаний и их периодом запишем выражение для частоты собственных колебаний по бортовой качке в следующем виде:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2\pi\sqrt{h}}{cB}. \quad (4)$$

На основании формулы (2) определим кажущуюся частоту волнения:

$$\tau_k = \frac{\tau_2}{1 - \frac{v}{C} \cos q};$$

$$\sigma_k = \frac{2\pi}{\tau_k} = \frac{2\pi}{\tau_b} \left(1 - \frac{v}{C} \cos q\right), \quad (5)$$

где τ_b — период волнения, с; τ_k — кажущийся период волнения, с; σ_k — кажущаяся частота волнения, с⁻¹.

Перепишем соотношение (1) в следующем виде:

$$\sigma_k = 2\omega, \quad \omega, \quad \frac{2}{3}\omega \quad (6)$$

или, с учетом формул (3) и (5), — в виде

$$\frac{\sigma_k}{\omega} = \frac{\sigma_k cB}{2\pi\sqrt{h}}. \quad (7)$$

Примем постоянное значение $c = 0,8$ в формуле (7), а соотношение $\sigma_k/\omega = 2$ (наиболее вероятное условие возникновения параметрического резонанса). Тогда на основании выражений (4) — (7) получим

$$\frac{0,8B - 0,8B \frac{v}{C} \cos q}{\tau_b \sqrt{h}} = 2, \quad (8)$$

откуда

$$\cos q = \frac{0,8B - 2\tau_b \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}. \quad (9)$$

Если принять приближенные выражения:

$$C = 1,25\sqrt{\lambda}; \quad (10)$$

$$\tau_b = 0,8\sqrt{\lambda}, \quad (11)$$

то

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - 2\lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}, \quad (12)$$

где λ — длина волны, м.

Выражения (8) – (12) могут служить для определения наиболее опасного с точки зрения возникновения параметрического резонанса по бортовой качке курсового угла волнения q (соотношение $\sigma_k/\omega = 2$).

Для возникновения дополнительного параметрического резонанса $\sigma_k/\omega = 1$ выражение (9) примет вид

$$\cos q = \frac{0,8B - \tau_b \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}, \quad (13)$$

или, с учетом выражений (10) и (11),

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - \lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}, \quad (14)$$

Для соотношения $\sigma_k/\omega = 2/3$ выражение (9) примет вид

$$\cos q = \frac{0,8B - \frac{2}{3}\tau_b \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}, \quad (15)$$

или, с учетом выражений (10) и (11),

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - \frac{2}{3}\lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}. \quad (16)$$

Расчет по выражениям (9) — (16) позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование формул (9) — (16) для расчетного судна подтверждает возможность основного параметрического резонанса ($\sigma_k/\omega = 2$), в том числе параметрического резонанса на попутном волнении (курсовой угол волнения $q = 165^\circ$).

2. Представление результатов расчета по формулам (9) — (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза доказывает возможность совпадения зон резонансной качки, включая резонанс на попутном волнении с зоной параметрического резонанса для расчетного судна (рис. 2).

3. Для малых судов шириной до 20 м возможность появления дополнительного (отношение частот $\sigma_k/\omega = 2/3$) параметрического резонанса наблюдается для средних значений метацентрической высоты (до $h = 3,00$ м) и на курсовых углах, больших 10° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения.

4. Для малых судов шириной до 20 м возможность появления основного параметрического резонанса (отношение частот $\sigma_k/\omega = 2$) для малых значений метацентрической высоты ($h = 0,15$ м) на курсовых углах 16° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения (в зону бортовой качки).

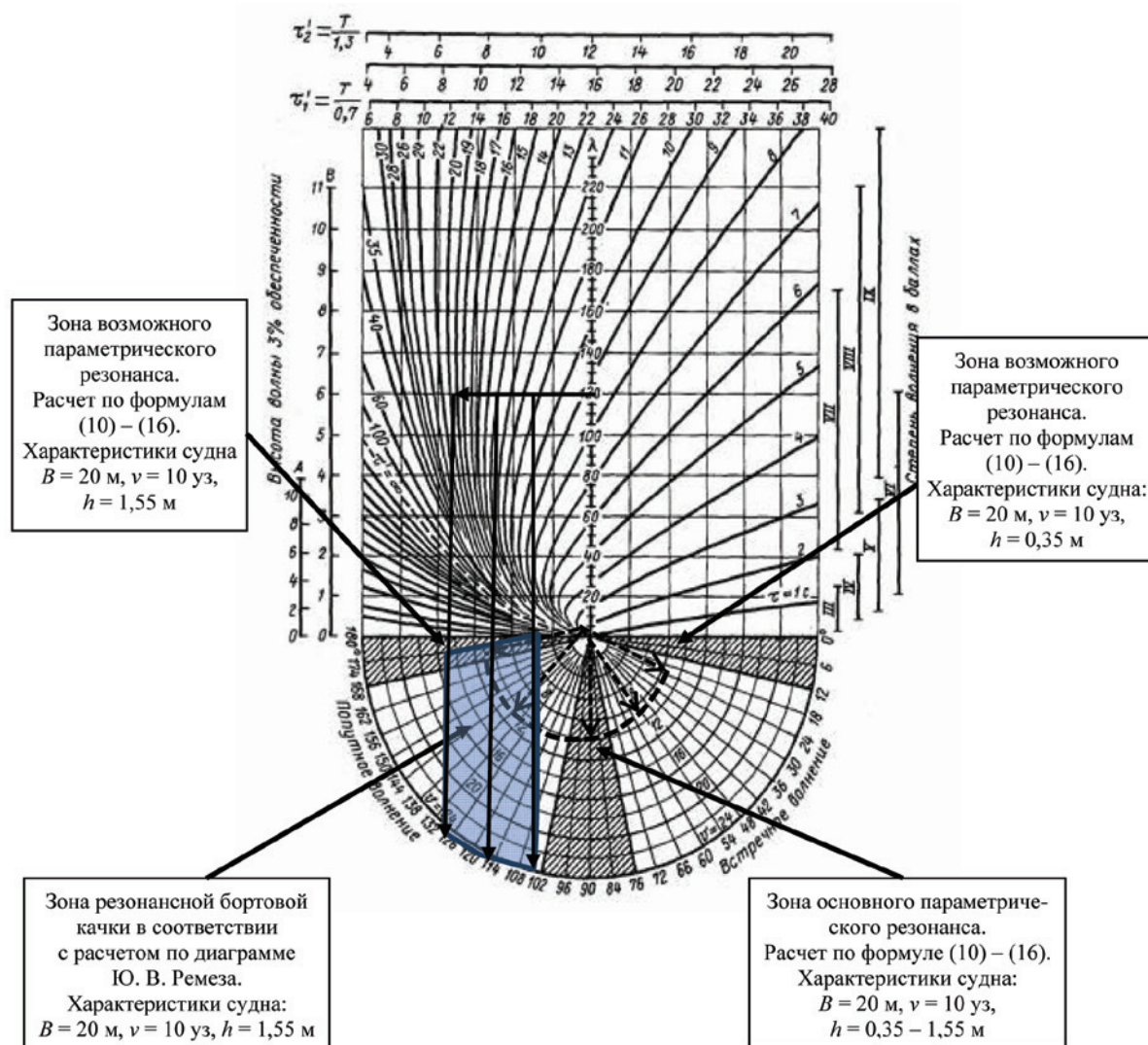


Рис. 2. Результаты расчета по формулам (9) – (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза

5. Для малых судов шириной до 20 м при постоянной скорости 10 уз возможность появления дополнительного ($\sigma_k/\omega = 1$) параметрического резонанса наблюдается для больших значений метацентрической высоты ($h > 1,35$ м) и на курсовых углах, больших 15° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения.

Выводы

1. Возможность возникновения параметрического резонанса по бортовой качке является дополнительной опасностью для судна при плавании в условиях волнения наряду с обычным резонансом и возможностью потери остойчивости на попутном волнении. Для определения курсовых углов волнения, при которых возможен параметрический резонанс по бортовой качке, могут быть использованы формулы (9) — (16).
2. Наибольшую опасность для судна могут представлять сочетания зон резонансной качки, получаемых с использованием диаграммы Ю. В. Ремеза и зон параметрического резонанса, получаемых по выражениям (9) — (16).
3. На практике следует отмечать зоны параметрического резонанса, рассчитываемые по формулам (9) — (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза, для установки дополнительных опасных сочетаний скорости движения судна и курсового угла волнения. Это позволит судоводителю определять без-

опасные курсовые углы волнения для всех возможных опасностей, включая возможность возникновения параметрического резонанса.

4. На основании ранее изложенного можно утверждать, что использование диаграммы Ю. В. Ремеза для определения дополнительных опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке может повысить безопасность судоходства при плавании судна в шторм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
2. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
3. Логиновский В. А. Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.
4. Астерин В. В. Принципы координации подсистем судна для предупреждения столкновений / В. В. Астерин, Е. В. Хекерт // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 13–22.
5. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
6. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
7. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.
8. Ершов А. А. Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях // Сб. науч. тр. проф.-преп. сост. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 6–13.
9. Паринов П. П. Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19: защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / П. П. Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.
10. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / А. А. Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.
11. Ершов А. А. Определение условий безопасного захода судна в порт / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 38 — 42.

PRACTICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETRIC RESONANCE OF ROLLING OF THE VESSEL

Parametric resonance is one of the most dangerous phenomena, which occur for the ship in storm weather. Under certain conditions of parametric resonance absolutely intact and properly loaded ships can capsize in a few seconds. In modern conditions prediction of parametric resonance is the fairly complex task.

For the ship's navigators often need to know under what conditions for its vessel arises the possibility of parametric resonance in a storm. Thus they can more closely monitor the conduct of the vessel and in a timely manner to change course and speed to avoid the danger of tipping. To effectively solve this problem they must use his usual navigational instruments, charts and nomograms, which he uses for other tasks to ensure safety of the ship. One of the most commonly used tools for the Russian navigators is the diagram which was proposed by Yu. V. Remez.

This article provides a method of displaying on that diagram possibility of parametric resonance for a particular vessel on specific coursework corners of the wave and speeds of the ship.

Using the Remez diagrams to determine dangerous zones of parametric resonance can improve the safety of navigation in a storm.

Keywords: storm navigation, parametric resonance, a practical way to determine, improving the safety of storm navigation.

REFERENCES

1. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spasenija: monografija*. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013: 146.
2. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013: 196.
3. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modelirovanie ocenki verojatnosti posadki sudna na grunt s pomoshhju nechetkih chisel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
4. Asterin, V. V., and E. V. Hekert. "Vessel subsystems coordination principles for collision avoidance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 13–22.
5. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
6. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
7. Nekrasov, S. N., Efimov K. I., and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.
8. Ershov, A. A. "Ispolzovanie zon bezopasnogo rashozhdenija dlja dvizhenija sudov na podhodah k portam i vnutrennih vodnyh putjah." *Sb. nauch. tr. prof.-prep. sost. GUMRF im. adm. S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014: 6–13.
9. Parinov, P. P. *Novye sposoby obespechenija bezopasnogo dvizhenija sudov v Bolshom portu Sankt-Peterburg i na podhodah k portu: dis. ... kand. tehn. nauk: (05.22.19) : zashhishhena (21.12.2010); utv. (12.06.2011) / Petr Petrovich Parinov.* — SPb., 2010: 120 p.
10. Ershov, A. A. *Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov: dis. ... d-ra tehn. nauk: (05.22.19); zashhishhena (19.11.2012) ; utv. (20.05.2013) / Andrej Aleksandrovich Ershov.* — SPb., 2012: 366 p.
11. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Conditions for safe entry of ships in port." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 38 – 42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович – доктор технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». *ershov_63@mail.ru*
Теренчук Александр Владимирович – аспирант. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». *ershov_63@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov Andrey Alexandrovich – Doctor of Engineering, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *ershov_63@mail.ru*
Terenchuk Alexander Vladimirovich – Postgraduate. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *ershov_63@mail.ru*