

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120

THE RISK MATRIX APPLICATION TO ASSESS THE INSTALLATION OF TORSIONAL VIBRATION MONITORING SYSTEMS ON SHIPS

M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

According to statistics, the number of accidents related to the failures of ship engine and propulsion systems remains in second place among the total number of accidents. One of the reasons for the destruction of diesel crankshafts, intermediate and propeller shafts, elastic couplings and other elements of shaft lines are torsional vibrations in combination with other types of fluctuations and vibrations. The main method for monitoring the level of torsional vibrations in ship's shaft lines remains periodic torsiography or strain measurement. The widespread introduction of diagnostic and control systems on ships leads to the technical possibility of constant monitoring of the level of torsional vibrations, which will allow you to reduce the risks of accidents in the periods between torsiography. Like any new technical solution, the introduction of torsional vibration monitoring systems requires a scientific justification of the need for their application, which can be carried out with using risk theory. The results of applying the risk matrix to justify the installation of torsional vibration monitoring systems in marine propulsion systems are presented in the paper. As a result, a risk matrix with quantitative parameters is obtained to justify the installation of torsional vibration monitoring systems and reduce the risks of ship's shaft line breakdowns. As an example, the application of the risk matrix for "OT" type tugs, which are widely used for various operations on the Russian waterways, is considered. It is established that for these types of vessels, the use of a monitoring system will be justified to reduce the risks of accidents, serious accidents and catastrophes that may arise from the development of dangerous torsional vibrations. A method for applying the assessment of the damage degree from an accident occurrence to determine the reduction of economic costs when using torsional vibration monitoring systems is proposed in the paper. It is found that for the "OT" type tugs, the installation of torsional vibration monitoring systems will be justified, both from the point of view of economics and reducing the accidents risks of ship engine and propulsion systems.

Keywords: risk matrix, torsional vibration monitoring, marine power plants, machine-propulsion systems, risk assessment.

For citation:

Pokusaev, Mikhail N., and Maksim M. Gorbachev. "The risk matrix application to assess the installation of torsional vibration monitoring systems on ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 109–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120.

УДК 629.12

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ РИСКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАНОВКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СУДАХ

М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

В статье рассмотрены причины аварийных ситуаций, связанных с отказами судовых машинно-двигательных комплексов, которые, согласно статистике, находятся на втором месте среди общего количества аварий. Подтверждено, что одной из причин разрушения коленчатых валов дизелей, промежуточных и гребных валов, материалов упругих муфт и других элементов валопроводов являются крутильные колебания в сочетании с другими видами колебаний и вибраций. Основным методом контроля уровня крутильных колебаний в судовых валопроводах является периодическое торсиографирование. Широкое внедрение систем диагностики и контроля на судах обеспечивает техническую возможность постоянного мониторинга уровня крутильных колебаний, что способствует снижению рисков возникновения аварий в периоды между торсиографированием. Отмечается, что, как и любое новое техническое решение, внедрение систем мониторинга крутильных колебаний требует научного обоснования необходимости их применения и его можно

реализовать при помощи теории рисков. В статье приведены результаты применения матрицы рисков для обоснования установки систем мониторинга крутильных колебаний в судовых машинно-двигательных комплексах. В результате исследования получена матрица рисков с количественными параметрами для обоснования установки систем мониторинга крутильных колебаний и снижения рисков возникновения поломок судовых валопроводов. В качестве примера рассмотрено применение матрицы рисков для буксиров типа «ОТ», которые широко применяются при проведении различных операций на водных путях России. Установлено, что для судов данного типа применение системы мониторинга обеспечит снижение рисков возникновения аварий, серьезных аварий и катастроф, которые могут являться причиной развития опасных крутильных колебаний. В статье предложен метод применения оценки степени ущерба от возникновения аварии для определения снижения экономических издержек при использовании систем мониторинга крутильных колебаний. Установлено, что для буксиров типа «ОТ» установка систем мониторинга крутильных колебаний будет обоснована как экономически, так и с точки зрения снижения рисков возникновения аварий судовых машинно-двигательных комплексов.

Ключевые слова: матрица рисков, мониторинг крутильных колебаний, судовые энергетические установки, машинно-двигательные комплексы, оценка рисков.

Для цитирования:

Покусаев М. Н. Применение матрицы рисков для оценки установки систем мониторинга крутильных колебаний на судах / М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 109–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-109-120.

Введение (Introduction)

Поломки элементов судовых машинно-двигательных комплексов (далее — МДК), возникающие в результате совокупности различных факторов, в том числе влияния крутильных колебаний, которые периодически наблюдаются и в настоящее время несмотря на применение современных методов проектирования и изготовления судов, их энергетических установок и использования демпферов для снижения крутильных колебаний. Среди причин сохранения рисков возникновения таких аварий можно выделить следующие:

- сложность конструктивных схем МДК современных судов с применением редукторов, винторулевых колонок, винтов регулируемого шага, упругих муфт и т. д., способствующая повышению количества опасных валопроводных форм крутильных колебаний;
- применение двигателей повышенной «оборотности», позволяющее увеличить диапазон резонансных частот крутильных колебаний, входящих в рабочий диапазон частот вращения коленчатых валов главных двигателей (далее — ГД);
- отказы демпферов крутильных колебаний ввиду различных причин: вытекание жидкости наполнителя, повреждение пружин, заклинка маховой массы и др.

Кроме того, все чаще судовладельцев при диагностике технических средств интересует процесс перехода от концепции «по регламенту» к концепции «по состоянию», что в настоящее время возможно в связи с широким применением на судах систем автоматики и анализа больших объемов информации, в том числе с использованием технологий нейросетей и Big Data. Для снижения рисков возникновения аварий в судовых МДК из-за развития крутильных колебаний необходима периодическая оценка технического состояния и эффективности работы демпферов, как гидравлических, так и пружинных.

Существует несколько методов оценки технического состояния демпферов и назначения их остаточного ресурса, однако все они имеют общий недостаток, такой как отсутствие полной гарантии безотказной работы демпферов в периоды от 10 000 до 15 000 ч эксплуатации между инспекциями. Это вызвано наличием вероятности случайных эксплуатационных факторов, которые могут привести к повышению напряжений в элементах МДК. К таким факторам можно отнести работу МДК в запретной зоне частот вращения (при их наличии), перегрузку элементов МДК при посадке судна на мель и попытках его самостоятельного схода, высокие динамические нагрузки на МДК в режимах работы *пуск – стоп* и реверсирования ГД, характерных для буксирных судов, работу в сложных метеорологических и ледовых условиях и т. д.

Предлагаемым техническим решением указанной проблемы является мониторинг параметров, возникающих из-за крутильных колебаний, таких как угловые амплитуды крутильных колебаний, напряжения в валах, напряжения или температуры в материале упругих муфт, переменный момент в редукторах и т. д. Мониторинг параметров осуществляется при помощи системы, разработанной для решения этой задачи. Фактически данные параметры периодически контролируются при проведении процедуры *торсиографирования судовых МДК* в соответствии с требованиями классификационных обществ (в России это Российский морской регистр судоходства (далее — РС) и Российское классификационное общество (далее — РКО), при этом система мониторинга должна постоянно осуществлять их контроль. Кроме того, предлагается выполнение системой мониторинга дополнительных задач и наличие в системе умных (Smart) функций: запись, анализ и передача данных, обеспечение звуковой и визуальной сигнализации для экипажа судна при превышении допустимых норм.

Внедрение систем мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК должно быть обосновано, поскольку на данном этапе развития подобных систем их установка будет *добровольным решением судовладельца*. Обоснование должно свидетельствовать не только об экономической выгоде, но и показывать результаты сравнительной оценки рисков для судна без применения и с применением системы мониторинга крутильных колебаний. В работе М. Д. Емельянова [1] отмечается, что использование защитных мер по снижению рисков может существенно снизить масштаб тяжести последствий при наступлении аварии, что свидетельствует о прогнозируемом снижении риска для судов при внедрении системы мониторинга крутильных колебаний.

Оценка рисков от крутильных колебаний для судов предназначена для решения следующих важных задач:

- оценить допустимые риски возникновения инцидентов, аварий и серьезных аварий на судах от развития крутильных колебаний, что будет востребовано как судовладельцами, так и классификационными обществами для обеспечения безопасности мореплавания;
- оценить наиболее опасные причины возникновения аварийных ситуаций при развитии крутильных колебаний на судах и обосновать необходимость разработки и внедрения защитных и предупреждающих мер;
- выполнить научное и экономическое обоснование для судовладельцев применения систем мониторинга крутильных колебаний на судах с повышенными значениями рисков.

Оценка рисков для проведения формализованной оценки безопасности на судах может осуществляться разными методами, которые подробно рассматриваются в работах [2], [3] и др. Таким образом, можно сформулировать цель и задачи данного исследования.

Цель исследования — рассмотреть применение матрицы рисков для обоснования применения системы мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ метода матрицы рисков и возможность его применения для обоснования установки системы мониторинга крутильных колебаний в судовых МДК.
2. Рассмотреть и применить метод оценки степени ущерба от возникновения аварии для определения снижения экономического ущерба при использовании системы мониторинга крутильных колебаний.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общий анализ риска для судна с определением возможных экономических потерь для судовладельца от развития крутильных колебаний можно выполнить достаточно наглядным способом с использованием *матрицы риска*, которая является базовым методом согласно рекомендациям Международной морской организации (далее — ИМО) и РС.

Величина риска R определяется по формуле

$$R = PC,$$

где P — вероятность возникновения риска;

C — тяжесть последствий возникновения риска (в данном случае величина экономических потерь).

Согласно рекомендациям ИМО и [3], ранжирование тяжести (уровня) последствий может осуществляться с присвоением индексов от одного до пяти и обозначением соответствующих статусов: 1 — незначительное происшествие; 2 — происшествие; 3 — авария; 4 — серьезная авария; 5 — катастрофа.

Вероятность события также ранжируется с присвоением индексов от 1 до 5 и обозначением соответствующих статусов: 1 — очень низкая; 2 — низкая; 3 — средняя; 4 — высокая; 5 — очень высокая.

В результате расчета по приведенной ранее формуле формируется матрица рисков в виде табл. 1.

Таблица 1

Качественная двухмерная матрица рисков

Очень высокая	Вероятность события	5	5	10	15	20	25
Высокая		4	4	8	12	16	20
Средняя		3	3	6	9	12	15
Низкая		2	2	4	6	8	10
Очень низкая		1	1	2	3	4	5
Двухмерная матрица рисков			1	2	3	4	5
			Уровень последствий				
			Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа

Ранжирование полученных рисков предлагается выполнять в соответствии с табл. 2, составленной на основе проведенного исследования.

Таблица 2

Ранжирование количественной оценки рисков

Качественная оценка рисков		
Степень риска	Очень низкий	1...2
	Низкий	3...4
	Средний	5...9
	Высокий	10...16
	Очень высокий	20...25

Нижняя граница риска составит $R = 2$, при $R < 2$ на риск не следует обращать внимание. Верхняя граница допустимого риска составит $R_{\text{доп}} = 10$, соответственно, высокий и очень высокий риск при $R > 10$ будет являться недопустимым. Риск при условии $2 < R < 10$ может регулироваться для повышения безопасности. Если применить полученную матрицу рисков для оценки опасности крутильных колебаний для судна и МДК, то очевидно, что при этом необходимы количественные показатели как для вероятности, так и тяжести последствий событий.

Количественные показатели вероятности для одного судна в год, согласно рекомендациям ИМО (при отсутствии реальных статистических данных), будут следующими: очень низкая вероятность 0,00001; низкая вероятность 0,0001; средняя вероятность 0,001; высокая вероятность 0,01; очень высокая вероятность 0,1. Таким образом, для количественной оценки рисков необходимо знать количественную величину уровня последствий. Применительно к случаю возникновения аварийных ситуаций от развития крутильных колебаний предлагается в качестве количественных параметров уровней последствий использовать следующие соответствия:

– $C_{\text{нп}}$ (при незначительном происшествии) — цена простоя судна в течение одних суток (например, контрольное торсиографирование МДК при превышении величины крутильных колебаний на отдельных режимах работы ГД);

– $C_{\text{п}}$ (при происшествии) — цена простоя судна в течение трех суток (например, замена демпфера крутильных колебаний);

– $C_{\text{а}}$ (при аварии) — стоимость ремонта гребного или промежуточного вала, упругой муфты с простоем судна;

– $C_{\text{са}}$ (при серьезной аварии) — стоимость ремонта ГД или нескольких элементов МДК с простоем судна;

– $C_{\text{к}}$ (при катастрофе) — полная стоимость судна при его затоплении от поступившей воды при выходе сломанного гребного вала из дейдвудного устройства.

Таким образом, двухмерная матрица рисков, приведенная в табл. 1, преобразована в виде табл. 3.

Таблица 3

Количественная двухмерная матрица рисков

Очень высокая	Вероятность события	5	$5C_{\text{нп}}$	$5 \cdot C_{\text{п}}$	$5C_{\text{а}}$	$5C_{\text{CA}}$	$5C_{\text{к}}$
Высокая		4	$4C_{\text{нп}}$	$4C_{\text{п}}$	$4C_{\text{а}}$	$4C_{\text{CA}}$	$4C_{\text{к}}$
Средняя		3	$3C_{\text{нп}}$	$3C_{\text{п}}$	$3C_{\text{а}}$	$3C_{\text{CA}}$	$3C_{\text{к}}$
Низкая		2	$2C_{\text{нп}}$	$2C_{\text{п}}$	$2C_{\text{а}}$	$2C_{\text{CA}}$	$2C_{\text{к}}$
Очень низкая		1	$C_{\text{нп}}$	$C_{\text{п}}$	$C_{\text{а}}$	C_{CA}	$C_{\text{к}}$
Двухмерная матрица рисков			$C_{\text{нп}}$	$C_{\text{п}}$	$C_{\text{а}}$	C_{CA}	$C_{\text{к}}$
			Уровень последствий				
			Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа

Полученная в табл. 3 матрица рисков позволяет определить риски (в отличие от табл. 1) при наличии статистических данных по убыткам судовладельца от последствий возникновения негативной ситуации из-за развития крутильных колебаний.

Результаты (Results)

В качестве объекта для применения выработанного подхода оценки рисков было выбрано судно-буксир типа «ОТ» ввиду следующих причин:

– достаточно большая распространенность данного типа судов для буксировки несамоходных транспортных средств не только на внутренних водных путях РФ, но и в секторе *река – море*, что подтверждается наличием их большого количества под надзором РС и РКО;

– работа МДК буксиров в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, включая режимы пуска и остановки, реверсирования ГД, что приводит к развитию достаточно больших амплитуд крутильных колебаний (подтверждено торсиограммой, полученной при измерениях крутильных колебаний МДК судна типа «ОТ» пр. Н3290 (ГД правого борта с пуском, постепенным набором частоты вращения и последующим снижением до остановки), полученной авторами исследования в 2022 г. при проведении торсиографирования МДК буксира «Зубр») — рис. 1;

– факты аварий промежуточных, гребных и коленчатых валов буксиров типа «ОТ» с характерными признаками поломки от усталостных напряжений, вызванных крутильными колебаниями (рис. 2).



Рис. 1. Вид торсиограммы ГД (правый борт) судов типа «ОТ» пр. Н3290



Рис. 2. Поломка МДК буксира типа «ОТ» пр. 428.2

На основании данных, полученных авторами исследования при проведении торсиографирований судовых МДК, анализа научных работ и технической литературы, была сформирована табл. 4 по аналогии с рассмотренными работе [3].

Таблица 4

Таблица тяжести последствий от развития КК для буксира типа «ОТ»

Индекс	Тяжесть последствий	Описание события	Цена последствий, руб.
1	Незначительное происшествие	Простой судна в течение одних суток	250000
2	Происшествие	Простой судна в течение трех суток	750000
3	Авария	Ремонт валопровода	5000000
4	Серьезная авария	Ремонт ГД или МДК	12000000
5	Катастрофа	Потеря судна	25000000

Приведем необходимые пояснения к этой таблице. Стоимость аренды буксиров типа «ОТ» составляет 250 тыс. руб. в день, что может соответствовать стоимости простоя судна из-за незначительного происшествия. Происшествие может привести к ремонту и простоя судна до трех дней и убыткам в размере до 750 тыс. руб. Авария, связанная с необходимостью ремонта валопровода, может привести к затратам судовладельца от 3,5 млн руб. до 5 млн руб. Серьезная авария может повлечь за собой не только ремонт валопровода, но и ГД, что приведет к затратам (с учетом простоя), равным примерно половине стоимости судна (до 12 млн руб.). Минимальная цена находящегося в эксплуатации буксира типа «ОТ» на 2022 г. составила порядка 25 млн руб., что соответствует стоимости потери судна при катастрофе без учета возможных человеческих жертв и ущерба для окружающей среды. При таких исходных данных матрица рисков при авариях от развития опасных крутильных колебаний МДК буксира «ОТ» имеет вид табл. 5.

Таблица 5

Матрица рисков для буксира типа «ОТ»

Очень высокая	Вероятность события	0,1	25000	75000	500000	1200000	2500000
Высокая		0,01	2500	7500	50000	120000	250000
Средняя		0,001	250	750	5000	12000	25000
Низкая		0,0001	25	75	500	1200	2500
Очень низкая		0,00001	2,5	7,5	50	120	250
Двухмерная матрица рисков для буксира типа «ОТ»			250000	750000	5000000	12000000	25000000
			Уровень последствий				
			Незначительное происшествие	Происшествие	Авария	Серьезная авария	Катастрофа

Качественную матрицу рисков можно скорректировать с учетом табл. 6, в которой приведена количественная оценка рисков. Соответственно недопустимой величиной в количественном выражении является риск при $R > 100\,000$ руб. При $R < 10\,000$ риск можно считать ничтожным, а при условии $10\,000 < R < 100\,000$ руб. он будет управляемым.

Таблица 6

Количественная оценка рисков для буксира «ОТ»

Количественная оценка рисков, руб.		
Степень риска	Очень низкий	До 10000
	Низкий	От 10000 до 25000
	Средний	От 25000 до 100000
	Высокий	От 100000 до 1000000
	Очень высокий	Свыше 1000000

Результаты, приведенные в табл. 6, свидетельствуют о том, что в большинстве случаев для судовладельца будут недопустимыми экономические риски, связанные с аварией, серьезной аварией и катастрофой при условии их очень высокой вероятности возникновения для одного судна в год. Если принять стоимость системы мониторинга, равной 250 тыс. руб. (это установлено авторами по итогам выполнения гранта «Старт-1» [4], предоставленного «Фондом содействия инновациям» в 2021 г.), то экономическая выгода для судовладельца от ее установки очевидна уже при риске возникновения аварии (при условии ее высокой вероятности). Однако при оценке тяжести последствий в табл. 6 не рассмотрен ущерб от воздействия на людей и окружающую среду. Также ущерб может быть в разных случаях неоднозначным, что подразумевает учет данной неоднозначности при определении риска. Поэтому следует выполнить дополнительную оценку рисков при помощи методики, предложенной в работах [1], [5], [6].

Универсальный подход для оценки ущерба при наступлении аварийной ситуации предполагается как при формализованной оценке безопасности, так и в программе Condition Assessment Program для комплексной оценки фактического состояния судна, рекомендованной ведущими классификационными обществами, включая РС [7], что позволяет избежать ошибок при построении матрицы рисков. Оценка возможного ущерба от возникновения аварийной ситуации C может быть выполнена по формуле

$$C = C_0 \cdot 10^{-(S_{\max} - S)}, \quad (2)$$

где $S_{\max}$ — максимальное значение степени ущерба;

S — степень ущерба, определенная при помощи экспертной оценки по результатам расследования.

В работе [1] приведена таблица, которая объединяет качественное описание развития аварийных ситуаций и их последствий со степенью ущерба S . Используя данные, полученные в рассматриваемой работе, была составлена таблица степени ущерба в зависимости от тяжести последствий применительно к тем аварийным ситуациям, которые могут произойти в результате развития крутильных колебаний (табл. 7). При этом в ней не рассматриваются события нулевого ранга при $R_s = 0$ и такие ситуации, как пожар, трещины в корпусе судна и другие, напрямую не зависящие от развития крутильных колебаний.

Таблица 7

Номер ранга R_s и степень ущерба S в зависимости от тяжести последствий аварийных ситуаций

R_s	Масштаб последствий	Последствия	Средние, S_{cp}	Минимальные, S_1	Максимальные, S_2
1	Незначительный	Незначительное ухудшение характеристик управления или допустимых условий эксплуатации	1,22	0,5	1,5
2		Умеренные повреждения без утраты мореходных качеств; кратковременная потеря мореходных качеств с проведением аварийно-ремонтных работ силами экипажа или нахождение на мели 24 ч; умеренные повреждения лопастей гребного винта	2,14	1,5	2,5
3	Значительный	Потеря хотя бы одного мореходного качества или посадка на мель на срок свыше 24 ч; существенное ухудшение эксплуатационных характеристик и характеристик управления, позволяющих закончить рейс; облом лопасти гребного винта; отказ ГД или редуктора в МДК из двух и более ГД; отказ валопровода и винторулевого комплекса двух и более вальной движительной установки	3,13	2,5	3,6
4		Необходимость буксировки; поступление воды с сохранением плавучести судна	4,33	3,6	4,87
5	Опасный	Повреждение судна, повлекшее гибель людей; значительные повреждения, создающие угрозу безопасности судна; затопление машинного отделения с сохранением плавучести	5,10	4,87	5,32
6	Катастрофический	Гибель судна, единичные смерти, загрязнение окружающей среды	5,8	5,32	6,27
7	Катастрофический	Гибель судна и людей; серьезный экологический ущерб	6,47	6,27	6,81

При использовании данных табл. 6 и 7 была получена матрица при средней степени ущерба S_{cp} для каждого уровня последствий аварийной ситуации (табл. 8). Как видно из таблицы, в большинстве случаев для владельца буксира типа «ОТ» будут недопустимыми экономические риски, связанные со всеми уровнями последствий при условии их высокой и очень высокой вероятности

возникновения для одного судна в год. Если (как отмечалось ранее) ориентировочная стоимость системы мониторинга составляет 250 тыс. руб., то ее экономическая выгода для судовладельца очевидна уже при риске возникновения любого уровня последствий при условии их очень высокой вероятности возникновения.

Таблица 8

Матрица рисков при средней степени ущерба $S_{\text{ср}}$ буксира типа «ОТ»

5	Очень высокая	Вероятность события	0,1	1312018,7	1091289,6	847110,4	721007,9	1506399,0	847110,4	1142720,5
4	Высокая		0,01	131201,9	109129,0	84711,0	72100,8	150639,9	84711,0	114272,0
3	Средняя		0,001	13120,2	10912,9	8471,1	7210,1	15064,0	8471,1	11427,2
2	Низкая		0,0001	1312,0	1091,3	847,1	721,0	1506,4	847,1	1142,7
1	Очень низкая		0,00001	131,2	109,1	84,7	72,1	150,6	84,7	114,3
Двухмерная матрица рисков для буксира типа «ОТ» по семиранговой классификации				13120187	10912895,8	8471104	7210079	15063990	8471104	11427205
				Уровень (масштаб) последствий						
				1	2	3	4	5	6	7
				Незначительный 1	Незначительный 2	Значительный 3	Значительный 4	Опасный	Катастрофический 6	Катастрофический 7

Как отмечалось в работе [1], защитные меры (в данном случае — предупредительные меры в виде системы мониторинга) могут сместить распределение тяжести последствий в область низких значений степени ущерба S . Если рассмотреть использование в качестве защитной меры от риска потери хода и управляемости судна применение двухвальной установки, то, согласно данным [5], степень ущерба для отказов отдельных элементов МДК будет определяться в соответствии с табл. 9, из которой видно, что подобная защитная мера позволяет в среднем снизить степень ущерба на 0,835.

Таблица 9

Сравнение степени ущерба при потере хода и управляемости для одновального и двухвального судна

Наименование отказа	Степень ущерба S	Снижение степени ущерба защитной мерой ΔS
Отказ среднеоборотного ГД в МДК из одного ГД	4,503	0,857
Отказ среднеоборотного ГД в МДК из двух и более ГД	3,646	
Отказ редуктора в МДК из одного ГД	4,046	0,815
Отказ редуктора в МДК из двух и более ГД	3,231	
Отказ валопровода с одной линией вала	4,029	0,834
Отказ валопровода с двумя и более линиями вала	3,195	
Среднее		0,835

Определение снижения степени ущерба S при использовании системы мониторинга крутильных колебаний является весьма сложной задачей и фактически требует серьезных исследований на основе статистики и математического моделирования, поскольку для разных видов масштабов последствий это снижение будет разным. Конечно, можно принять, что установка системы мониторинга в идеале приведет к переходу от средней величины степени ущерба к минимальной, но это не всегда будет возможно в реальных условиях. Если, например, принять, что система мониторинга

позволит снизить даже на 0,01 среднюю степень ущерба $S_{\text{ср}}$, то применительно к буксиру «ОТ» можно получить табл. 10, в которой отмечается снижение возможного ущерба при мониторинге крутильных колебаний.

Таблица 10

**Снижение величины возможного ущерба
при установке системы мониторинга крутильных колебаний**

Ранг	Масштаб последствий	S_{max}	$S_{\text{ср}}$	$S_{\text{без}}$	$S_{\text{сист}}$	Возможный ущерб		Снижение ущерба при установке системы, млн руб.
						Без системы, млн руб.	С системой, млн руб.	
1	Незначительный	1,5	1,22	1,22	1,21	13,12	12,822	0,299
2	Незначительный	2,5	2,14	2,14	2,13	10,91	10,664	0,248
3	Значительный	3,6	3,13	3,13	3,12	8,47	8,278	0,193
4	Значительный	4,87	4,33	4,33	4,32	7,21	7,046	0,164
5	Опасный	5,32	5,1	5,1	5,09	15,06	14,721	0,343
6	Катастрофический	6,27	5,8	5,8	5,79	8,47	8,278	0,193
7	Катастрофический	6,81	6,47	6,47	6,46	11,43	11,167	0,260

Полученная экономия свидетельствует об одном уровне ее величины с указанной ориентировочной стоимостью системы мониторинга крутильных колебаний, равной 250 тыс. руб. для опасных ситуаций, имеющих ранги 1, 2, 5 и 7. Однако, на наш взгляд, система мониторинга крутильных колебаний как предупреждающая мера может приводить не только к снижению уровня последствий, но и к снижению частоты возникновения аварий.

Обсуждение (Discussion)

Матрица рисков, согласно рекомендациям ИМО и DNV, относится в большей степени к качественной, чем к количественной оценке рисков. Кроме того, рекомендованные ИМО вероятности событий могут отличаться от реальных статистических данных для каждого типа судов и каждого типа аварийной ситуации. Это требует проведения дальнейших исследований в указанной области с имитационным моделированием и анализом дерева неисправностей. При проведении дальнейших исследований планируется применение не только теории марковских случайных процессов, но других методов моделирования, в том числе на основе реальных статистических данных аварий от крутильных колебаний.

Отдельным направлением исследований является анализ рисков аварий от крутильных колебаний для пассажирских судов, так как в этом случае количественным показателем риска будут являться не экономические потери, а человеческие жизни. В то же время полученные результаты проведенного исследования свидетельствуют об экономической целесообразности установок систем мониторинга для буксиров типа «ОТ» даже при средней тяжести последствий аварий от развития опасных крутильных колебаний и частоте событий, приведенных в рекомендациях ИМО. В реальных условиях частота событий может быть выше, что также снизит экономические потери судовладельца при установке системы мониторинга крутильных колебаний. Кроме того, установка системы мониторинга способствует снижению рисков отказов силиконовых и пружинных демпферов в период между процедурами оценки их технического состояния, что подробно рассмотрено в исследовании [8]. При этом будет учитываться риск возникновения как постепенных, так и внезапных отказов демпферов, опасность которых рассмотрена и обоснована в работе Л. В. Ефремова [9]. В конечном итоге установка системы мониторинга позволяет перейти к разработке «цифрового двойника» демпфера крутильных колебаний и возможности оценки его технического состояния в режиме реального времени [10], [11].

Выводы (Summary)

На основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установка систем мониторинга крутильных колебаний судовых МДК может быть научно обоснована.
2. Качественный анализ для предварительной оценки целесообразности установки системы мониторинга может быть выполнен при помощи базового метода матрицы рисков с предложенной конкретизацией по количественным показателям.
3. Факты сохраняющихся поломок элементов судовых МДК от крутильных колебаний свидетельствуют об их опасности и серьезных экономических потерях судовладельцев.
4. Применение существующего метода оценки технического состояния и назначения остаточного ресурса демпферов крутильных колебаний не дает полной гарантии сохранения его работоспособности и отсутствия опасного роста крутильных колебаний в межинспекционный период.
5. Использование метода оценки ущерба может быть более эффективным по сравнению с методом оценки рисков по точности прогнозирования возникновения аварий и расчета возможных экономических потерь.
6. Для буксиров типа «ОТ» установка систем мониторинга крутильных колебаний целесообразна, так как может снизить риски возникновения аварий МДК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов М. Д. Применение условных рисков для оценки безопасности морских судов / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2009. — № 3–4 (22–23). — С. 40–45.
2. Гаврилов В. В. Выявления опасностей объектов водного транспорта методом формализованной оценки безопасности / В. В. Гаврилов, Д. С. Семионичев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 124–131.
3. Егоров Г. В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории рисков / Г. В. Егоров. — СПб.: Судостроение, 2008. — 384 с.
4. Покусаев М. Н. Результаты разработки и испытания прототипа системы мониторинга крутильных колебаний судовых валопроводов в рамках реализации научного гранта «СТАРТ-1» / М. Н. Покусаев, К. О. Сибряев, М. М. Горбачев // 66-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета: материалы конференции. — Астрахань: Астраханский гос. технический ун-т, 2022. — С. 466–468.
5. Емельянов М. Д. Критичные элементы морских судов (в порядке обсуждения) / М. Д. Емельянов // Судостроение. — 2008. — № 6 (781). — С. 16–22.
6. Емельянов М. Д. Безопасность морского транспорта России / М. Д. Емельянов // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 2 (15). — С. 38–43.
7. Евенков В. И. Методологические основы обеспечения безопасной и рентабельной эксплуатации судов старше 15 лет на базе процедуры РС САР / В. И. Евенков, Г. В. Егоров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2002. — № 25. — С. 17.
8. Сибряев К. О. Работоспособность механических демпферов крутильных колебаний судовых двигателей внутреннего сгорания / К. О. Сибряев, М. Н. Покусаев, М. М. Горбачев, А. Д. Ибадуллаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 1. — С. 35–41. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41.
9. Ефремов Л. В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. — СПб.: Наука, 2007. — 276 с.
10. Pokusaev M., Gorbachev M., Sibryaev K., Ibadullaev A. “Problems of diagnostics of technical condition of torsional vibration dampers of modern marine diesel engines.” Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies, 2023, no. 2 (2), pp. 137-145.
11. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N., Rudenko M. F. “Development of a digital twin of a marine diesel engine torsional vibration damper using a monitoring system.” Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2023. № 4. С. 62–71.

REFERENCES

1. Emelyanov, M.D. "Use of conventional risks in estimation of security of seaborne ships." *Transport of the Russian Federation* 3–4(22–23) (2009): 40–45.
2. Gavrilov, V.V., and D. S. Semionichev. "Revelation of hazards of the water transport facilities by the formal safety assessment." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2012): 124–131.
3. Egorov, G. V. *Proektirovanie sudov ogranichennykh raionov plavaniya na osnovanii teoriiya riskov*. SPb.: Sudostroenie, 2008.
4. Pokusaev, M.N., K. O. Sibryaev, and M. M. Gorbachev. "Rezultaty razrabotki i ispytaniya prototipa sistemy monitoringa krutil'nykh kolebaniy sudovykh valoprovodov v ramkakh realizatsii nauchnogo granta «START-1»." *66-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Materialy konferentsii*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. 466–468.
5. Emelyanov, M.D. "Critical elements of sea crafts." *Shipbuilding* 6(781) (2008): 16–22.
6. Emel'yanov, M.D. "Bezopasnost' morskogo transporta Rossii." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 2(15) (2008): 38–43.
7. Evenko, V. I., and G. V. Egorov. "Metodologicheskie osnovy obespecheniya bezopasnoi i rentabel'noi ekspluatatsii sudov starshe 15 let na baze protsedury RS SAR." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 25 (2002): 17.
8. Sibrayev, K. O., M. N. Pokusaev, M. M. Gorbachev, and A. D. Ibadullaev. "Efficiency of mechanical dampers of torsional vibration of marine internal combustion engines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2022): 35–41. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-1-35-41.
9. Efremov L. V. "Teoriia i praktika issledovaniy krutil'nykh kolebaniy silovykh ustanovok s primeneniem komp'yuternykh tekhnologii [Theory and practice of research of torsional vibrations of power plants using computer technology]." Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2007. 276 p.
10. Pokusaev M., Gorbachev M., Sibryaev K., Ibadullaev A. "Problems of diagnostics of technical condition of torsional vibration dampers of modern marine diesel engines." *Recent Achievements and Prospects of Innovations and Technologies*, 2023, no. 2 (2), pp. 137-145.
11. Gorbachev M. M., Pokusaev M. N., Rudenko M. F. "Development of a digital twin of a marine diesel engine torsional vibration damper using a monitoring system." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2023;4:62-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-4-62-71>. EDN LDLHFQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Покусаев Михаил Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: evt2006@rambler.ru
Горбачев Максим Михайлович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1
e-mail: max9999_9@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pokusaev, Mikhail N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: evt2006@rambler.ru
Gorbachev, Maksim M. —
PhD
Astrakhan State
Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: max9999_9@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 февраля 2023 г.
Received: February 14, 2023.*