

УДК 628.517.2:629.122

## УПРАВЛЕНИЕ СНИЖЕНИЕМ УРОВНЕЙ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ОРГАНИЗАЦИЯ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ И ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ НА МОРСКИХ СУДАХ

*Гусев В.Н.*

*Херсонская государственная морская академия*

*В работе показано, какую серьезную опасность воздействия на человека оказывает вибрация, проведен анализ основных источников шума на морском судне, приведены некоторые мероприятия по снижению уровня шума на судне. Исследования в работе проводилось по двум направлениям – снижение шума в самом источнике и ослабление звуковой энергии, распространяющейся по воздуху и конструкциям корпуса, на основе применения системы автоматического управления (САУ) и разработка средств звукопоглощения, которые практически могут быть использованы в виде звукоизолирующих ограждений, звукоизолирующих кабин и пультов управления, звукоизолирующих кожухов и акустических экранов. В первом направлении исследования – автоматическом управлении снижения вибрации (шума) в источнике – рассмотрены задачи анализа и синтеза. Приведен критерий качества, который одновременно является характеристикой вибрации гибких механических конструкций. В результате разработанной САУ вибрацией композитных конструкций и нового метода ее синтеза под внешней динамической нагрузкой, с целью снижения уровней вибрационного ускорения в широкой полосе низких частот удалось снизить вибрацию по всей поверхности гибкой механической конструкции. Второе направление исследования с различным составом бариево-боратного пеностекла показало его возможность использовать как звукопоглощающий материал.*

**Ключевые слова:** *вибрация, шум, автоматическая система управления, гибкая механическая конструкция, бариево-боратное пеностекло.*

**Введение.** В морских документах [1, 2] сказано, что на постоянной основе должны проводиться исследования по проблеме вибрации (шума) на борту судов с целью улучшения защиты моряков от неблагоприятных последствий воздействия вибрации (шума). Следовательно, выбор мероприятий по уменьшению вибрации (шума) на борту судов является актуальным.

Строго определения вибрации в настоящее время нет. В английском языке vibration – эквивалент понятия механических колебаний. Вибрация – колебание твердых тел. О вибрации также говорят в более узком смысле, подразумевая механические колебания, оказывающие ощутимое влияние на человека. Установлено, что вибрации при частотах: 75–120 Гц с амплитудой 0,01 мм не ощущаются; 60–75 Гц с амплитудой 0,01–0,02 мм отвлекают от работы и раздражают; 50–65 Гц с амплитудой 0,02–0,03 мм являются сильным препятствием в работе; 50–65 Гц с амплитудой более 0,03 мм создают невозможные условия для работы. Вибрация выше 63 Гц воспринимается как шум.

Серьезную опасность представляет воздействие на человека общей и комбинированной вибрации в частотном диапазоне 4–30 Гц (т.е. в низкочастотном диапазоне), что объясняется возможностью совпадения собственных частот колебаний органов и частей тела с частотой виброколебаний.

Очевидно, деление на вибрацию и шум условно. Границы судовой вибрации и шума – 1,4 до 11000 Гц [3].

Различные механические, аэродинамические и электромагнитные явления являются причиной возникновения шумов. Механические шумы возникают при работе различных машин и механизмов и вызваны трением и соударениями составляющих их деталей, ударными процессами и рядом других факторов. Источниками шума на судах являются главные двигатели, вспомогательные дизель генераторы, системы вентиляции машинно-котельных отделений, жилых и служебных помещений, рефустановки, технологическое оборудование, движители судна, гребные винты, водяные системы бытового обслуживания, лифты, лебёдки, промысловые механизмы, грузовые краны, удары волн и льда о корпус судна, звуковые сигналы и т.п.

Аэродинамические и гидродинамические шумы возникают при течении газов и жидкостей. Электромагнитные шумы обычно сопровождают работу различных электрических установок. К категории таких источников шума следует отнести навигационные приборы, шум которых является серьёзной помехой в помещениях ходового мостика. Природа этого шума – переменные электромагнитные процессы, создаваемые электрическими машинами-сельсинами.

На любом судне шум от его источников (машинно-котельное отделение и т.д.) распространяется по воздуху – воздушный шум и по корпусным конструкциям судна в виде звуковой вибрации – структурный шум. Воздушный шум может проникать в жилые и служебные помещения через переборки, палубы, подволоки, по вентиляционным каналам, через различные отверстия (капы, люки, иллюминаторы) и т.д.

Распространение структурного шума происходит через фундаменты и различные не опорные связи (например, трубопроводы) на корпусные конструкции судна. Достигая ограждающих конструкций помещений, он вызывает их вибрацию, которая, в свою очередь, вызывает упругие колебания воздуха, воспринимаемые уже как воздушный шум.

Гребные винты являются источниками воздушного и структурного шума, которые особенно ощущаются в корме судна.

Снижение механических шумов достигается: улучшением конструкции машин и механизмов, заменой деталей из металлических материалов на пластмассовые, применением вместо зубчатых передач в машинах и механизмах других видов передач (например, клиноременных) или использованием зубчатых передач, не издающих громких звуков (например, при использовании не прямозубых, а косозубых или шевронных шестерен), нанесением смазки на трущиеся детали и рядом других мероприятий. Эффективность некоторых из перечисленных мероприятий по снижению уровня шума представлена ниже [4]:

Мероприятия	Снижение уровня шума, дБ
Замена прямозубых шестерен шевронными	5
Замена зубчатой передачи на клиноременную	10–15
Замена металлических корпусов машин на пластмассовые:	
в области высоких частот	7–15
в области средних частот	2–6

Для уменьшения аэродинамических и гидродинамических шумов рекомендуются снижение скорости обтекания газовыми или воздушными потоками препятствий, улучшение аэродинамики тел, работающих в контакте с потоками; снижение скорости истечения газовой струи и уменьшение диаметра отверстия, из которого эта струя истекает; выбор оптимальных режимов работы насосов для перекачивания жидкостей; правильное проектирование и эксплуатация гидросистем и ряд других мероприятий.

Для борьбы с шумами электромагнитного происхождения рекомендуется тщательно уравнивать вращающиеся детали электромашин (ротор, подшипники), осуществлять тщательную притирку щеток электродвигателей, применять плотную прессовку пакетов трансформаторов и т.д.

Наиболее рациональный способ уменьшения шума – уменьшение шума в источнике его возникновения. На сегодняшний день разработка методов и алгоритмов снижения структурной вибрации и шума в широкой полосе низких частот является актуальной.

Наряду с традиционными средствами снижения шума и вибрации перспективным методом снижения вибрации и шума в диапазоне низких частот является управление вибрационными и акустическими характеристиками, например, гибкой механической конструкции.

Исходя из вышесказанного, **целью работы** является разработка методов снижения уровней вибрации (шума) на основе управления снижением уровней вибрации и шума гибких механических конструкций на судне, организация звукопоглощения и звукоизоляции путем экспериментального подбора образцов, снижающих шум на различных частотах до уровня близкого к медицинским требованиям.

Таким образом, борьба с шумом в данной работе будет проводиться в двух направлениях – снижение шума в самом источнике и ослабление звуковой энергии, распространяющейся по воздуху и конструкциям корпуса на основе применения системы автоматического управления (САУ) и разработка средств звукопоглощения, которые практически могут быть использованы в виде звукоизолирующих ограждений, звукоизолирующих кабин и пультов управления, звукоизолирующих кожухов и акустических экранов.

Первый путь наиболее эффективный, но и наиболее сложный. Этот путь должен решаться на стадии проектирования и строительства судна и механизмов для него.

Из физики: звукопоглощение отличается от звукоизоляции главным образом тем, что звукоизоляция удерживает звуковые волны внутри помещения, не выпуская их за его пределы, а звукопоглощение предотвращает отражение звука от стен помещения.

Перейдем к рассмотрению первого направления данной работы по снижению вибрации (шума) в источнике.

В теории автоматического управления можно выделить две характерные задачи:

- 1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы – это задача анализа;
- 2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ – это задача синтеза.

**Постановка первой задачи.** Задача синтеза сложнее задачи анализа из-за своей неоднозначности, поэтому задачу синтеза САУ ставят ограниченно.

Под синтезом системы автоматического управления понимается направленный расчет, имеющий конечной целью отыскание рациональной структуры системы и установление оптимальных величин параметров ее отдельных звеньев.

Синтез параметров системы заданной структуры и синтез корректирующих устройств системы по заданным показателям качества рассматривают как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению САУ, при котором обеспечивается выполнение технических требований.

В настоящее время разработаны эффективные методы синтеза управления. Под управлением в работе будем понимать процесс организации такого целенаправленного воздействия на объект, в результате которого объект переходит в требуемое (целевое) состояние, при этом рассматривать управление такими объектами, поведение которых удастся описать формально, т.е. используя математический аппарат.

**Объектом управления** в работе выберем гибкую механическую конструкцию на судне (например, металлическую мачту для установки антенны радара на мостике судна или мачту для топовых огней) и, обозначив по сценарию [5] на рис. 1  $X$  – состояние ее среды, а  $Y$  – состояние гибкой механической конструкции, определяемая скоростью колебания, получим, в этом случае, что состояние объекта  $Y$  будет зависеть от состояния его среды, т.е. между ними имеется какая-то связь.



Рис. 1 – Взаимодействие объекта со средой

Графическое изображение на рис. 1 можно представить в виде формулы

$$Y = F(X),$$

где  $F$  – функция между так называемым входом и выходом гибкой механической конструкции.

Поскольку в работе целенаправленно ставится вопрос о процессе управления объектом, то источник выполнения – субъект. Выделим субъект в той среде, что и объект, тем самым субъект воспринимает состояние  $X$  среды и одновременно на него влияет состояние  $Y$  объекта, рис. 2.

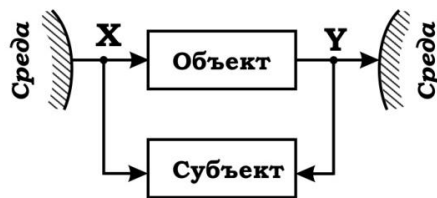


Рис. 2 – Схема взаимодействия субъекта со средой и объектом

В данном случае если состояние субъекта (его колебания, имеется в виду гибкой механической конструкции) не устраивает его, то необходимо организовать такое воздействие на объект, которое приведет его в новое состояние (например, уменьшится амплитуда колебаний), удовлетворяющее субъекта. Это воздействие и есть управление. Поэтому один из «принципов» управления сводится к неудовлетворенности субъекта, сложившейся в объекте. Отметим, что для управления объектом необходимо провести исследования самого объекта (его колебания, которые образуют вибрацию (шум), возможно моделирование шума и вибрации типовыми гибкими механическими конструкциями), провести синтез его модели, выработки управления и реализации его и т.д. Именно, как это указывалось выше, к управлению обращаются в исключительных случаях. В данной работе субъект идет на создание системы управления, а для такого случая субъекту определено, каким образом можно воздействовать на объект (например, замена металла композитными материалами), т.е. определить каналы управления. Обозначим это управление  $U$ . Тогда состояние объекта управления будет зависеть от двух факторов – состояние среды  $X$  и состояния  $U$ :

$$Y = F(X, U).$$

Общую систему управления можно представить в виде, рис. 3.

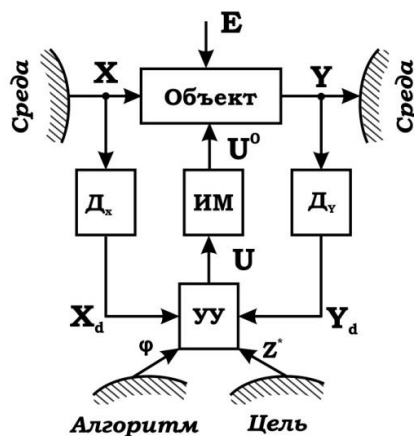


Рис. 3 – Схема системы управления:

$X$  – наблюдаемый вход, управляемый, действительное состояние;  $E$  – ненаблюдаемый вход;  $U^o$  – наблюдаемый вход, управляемый;  $ИМ$  – исполнительные механизмы;  $УУ$  – управляющее устройство;  $Д_x$  и  $Д_y$  – датчики, с помощью которых измеряется состояние среды и объекта, соответственно;  $X_d$  – показание датчика;  $Y_d$  – показание датчика;  $\varphi$  – алгоритм управления;  $Z^*$  – цель управления.

Отметим, что результаты измерений

$$X_d = D_x(X); Y_d = D_d(Y),$$

где  $D_x$  и  $D_y$  – операторы датчиков, являются исходной информацией для управляющего устройства  $УУ$ .

Эти формулы выражают очевидную связь между состоянием (среды или объекта) и информацией об этом состоянии.

Таким образом, в основе процесса управления лежит информация о сложившейся ситуации:

$$I = (X_d, Y_d).$$

Следовательно, основными факторами всякого управления, которые присущи любой системе управления объектом, являются:

- цель управления –  $Z^*$ ;
- информация о состоянии объекта и среды –  $I$ ;
- воздействие на объект, т.е. собственно управление –  $U$ ;
- алгоритм управления –  $\varphi$ .

**Основное содержание.** Проанализировав методы исследований вибрационных и акустических характеристик гибких механических конструкций и определив параметры, проводится их управление, т.е. ставится задача синтеза САУ виброакустическим излучением, которое заключается в компенсации внешней динамической нагрузки  $d$ , рис. 4.

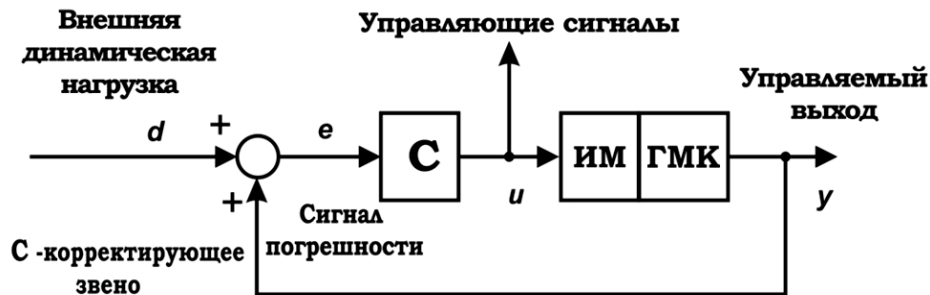


Рис. 4 – Схема САУ по сигналу отклонения виброускорения: ИМ – исполнительный механизм; ГМК – гибкая механическая конструкция

В случае, когда САУ синтезируется для снижения вибрации в отдельной точке на поверхности гибких механических конструкций, целью синтеза САУ является увеличение критерия качества, определяемого в нашей работе [6] как

$$F_{obj} = 20 \lg \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \frac{d}{e} df.$$

при обеспечении запаса стойкости с амплитудой в 10 дБ.

Критерий качества одновременно является характеристикой вибрации или шума гибких механических конструкций. Управление гибкими конструкциями проводилось с помощью активных, пассивных и комбинированных методов снижения вибрации и шума на низких частотах, которые позволили повысить динамическое качество конструкций разного назначения в условиях усложненных действий возмущений.

Задача активной компенсации внешней динамической нагрузки заключалась в определении оптимального размещения компенсированного устройства на гибких механических конструкциях. В управлении внешними динамическими нагрузками определялись оптимальные зависимости амплитуд и фаз компенсированных сил или моментов, которые создаются исполняющими устройствами, от частоты. При управлении по отклонениям сигнала погрешности, которые связаны с вибрацией или акустической характеристикой изотропных или композитных гибких механических конструкций, определялись оптимальные параметры перед дополнительной функцией управляемого звена. Задача пассивной компенсации внешней динамической нагрузки заключалась в определении оптимальных размещений и величин дополнительных масс на поверхности гибких механических конструкций. В результате разработанной САУ вибрацией композитных конструкций и нового метода ее синтеза под внешней динамической нагрузкой с целью снижения уровней вибрационного ускорения в широкой полосе низких частот удалось снизить вибрацию по всей поверхности гибкой механической конструкции.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения разработанного метода. Полученное снижение виброускорения в отдельной точке изотропной конструкции составило 6,6 дБ, для ортотропной конструкции – 1,9 дБ, для виброскорости по всей поверхности конструкции 5,5 дБ.

Второе направление работы – экспериментальная часть, в которой в качестве выбора звукопоглощающего материала, с целью дальнейшего внедрения на судах, были проведены исследования с материалом на основе бариево-боратного пеностекла (ББП).

В работе при проведении эксперимента по изучению защитных свойств ББП использовали четыре образца пеностекла: беспримесное бариево-боратное пеностекло; бариево-боратное пеностекло с примесью ионов титана, бариево-боратное пеностекло с примесью ионов меди; бариево-боратное пеностекло с примесью кремния.

В процессе изготовления ББП получали состав с равномерно расположенными порами по всему объему с диаметром  $d \sim 1$  мм. Пористость всех бариево-боратных пеностекел составляла  $\Pi = 0,9999$  отн. ед. Толщина бариево-боратного пеностекла во всех случаях была равна – 5 мм.

Для проведения эксперимента по звукопоглощению пеностекла была создана на кафедре БЖД ХГМА установка, схема которой представлена на рис. 1.

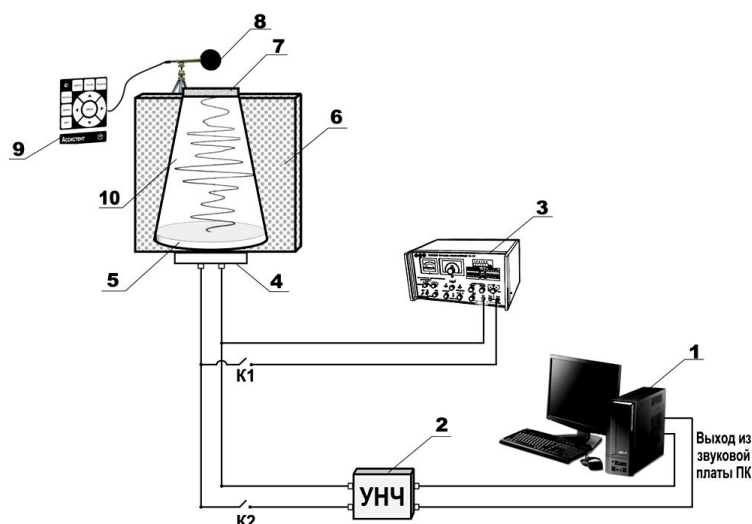


Рис. 5 – Схема установки по исследованию звукопоглощения пеностекла:

1 – компьютер как генератор сигналов; 2 – усилитель низкой частоты; 3 – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-117; 4 – динамическая головка; 5 – диффузор динамика; 6 – звукоизолирующий кожух, ящик; 7 – исследуемый образец; 8 – микрофон измерительного прибора; 9 – измерительный прибор – Ассистент; 10 – коническая поверхность, в которой сосредоточены звуковые волны; к1 – к2 – включатель, выключатель

Методика проведення досліджень зводиться до задання однієї частоти звукових хвиль на конічній поверхні установки з допомогою комп'ютера по заданій програмі або з допомогою генератора сигналів низькочастотного ГЗ-117.

Вимірювання рівня шуму на різних частотах, що пройшли через зразки пеностекла, проводиться приладом Ассистент. В табл. 1 наведені результати вимірювань рівня шуму в дБА на різних частотах з допомогою ГЗ-117.

Таблиця 1 – Рівень шуму на різних частотах

1/1 октави, Гц		<i>E<sub>q</sub></i>				
		Значення, дБА				
		Без пеностекла	С пеностеклом без приміси	Пеностекло +Si	Пеностекло +Ti	Пеностекло +Cu
S	31,5	41,3	39,7	40,9	42,5	41
	63,0	57,3	46,1	46,3	47,8	45,9
	125,0	61,7	52,3	52,5	52,9	51,3
	250,0	69,1	59,3	59,3	60,1	58,2
	500,0	70,8	59,9	57,7	59,1	58
	1000,0	74,7	66,3	64,9	67,1	62,6
	2000,0	78,6	60,5	55,5	60,6	56
	4000,0	83,5	59,1	53	59,9	51,3

Згідно отриманим даним, вказаним в табл. 1, застосування пеностекла дозволяє знизити рівень шуму в середньому на 12 дБ по всьому діапазону частот, а максимум ефективності спостерігається на високих частотах, де рівень зниження шуму становить більше 20 дБ. Іони Si, Ti, Cu в складі пеностекла значно покращили звукопоглинаючі властивості пінополімерного матеріалу. Більш ефективними властивостями звукопоглинання володіє склад з домішкою іонів міді.

**Висновок.** В роботі, з однієї сторони, проводиться заходи по розробці методу підвищення динамічного якості управління гнучкими механічними конструкціями, які вібрирують під впливом зовнішньої динамічної навантаження на основі автоматичного зниження рівня вібрації і акустичного випромінювання, з іншої сторони, проводиться експериментальне дослідження по вибору звукопоглинаючого матеріалу з метою подальшого впровадження на судах.

**Висновки.** В результаті проведеного першого заходу отримане зниження віброшвидкості в окремій точці ізотропної конструкції становило 6,6 дБ, для ортотропної конструкції – 1,9 дБ, для віброшвидкості по всій поверхні конструкції – 5,5 дБ.

В результаті другого – застосування пеностекла дозволило знизити рівень шуму в середньому на 12 дБ по всьому діапазону частот, а максимум ефективності спостерігалося на високих частотах, де рівень зниження шуму становив більше 20 дБ.

Дальніші дослідження в лабораторії кафедри БЖД ХГМА будуть проведені з метою розробки САУ для зниження вібрації (шуму) нових об'єктів на судні, а також продовження пошуку нових звукопоглинаючих матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конвенція про працю в морському судноходстві (КТМС) № 186 (англ. : Maritime Labor Convention (MLC) 2006/2013) Maritime Labour Convention (MLC 2006/2013).
2. Кодекс безпечної практики роботи для моряків торгових судів Code of Safe Working Practices for Merchant Seamen (COSWP 2010).
3. Барановський А. М. Урівноваження і віброзахист механізмів : курс лекцій / А. М. Барановський. – Новосибірськ : НГавт. 2006. – 131 с.
4. Екологія і безпека життєдіяльності / Д. А. Кривошеїн, Л. А. Муравей і др. – М. : Юніті-Дана, 2000. – 447 с.

5. Растригин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растригин. – М. : Сов. Радио, 1980. – 232 с.

6. Гусев В. Н., Селиванов С. Е., Макаренко В. Н., Токарев В. И. Материалы Всеукраинской научно-практической конференции «Безопасность труда: образование, наука, практика», 20 ноября 2014 г., НУГЗУ. – Харьков. – С. 39-41.

**Гусев В.М. УПРАВЛІННЯ ЗНИЖЕННЯМ РІВНЯ ВІБРАЦІЙ І ШУМУ, ОРГАНІЗАЦІЯ ЗВУКОПОГЛИНАННЯ І ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ НА МОРСЬКИХ СУДНАХ**

*У роботі показано, яку серйозну небезпеку впливу на людину робить вібрація, проведено аналіз основних джерел шуму на морському судні, наведені деякі заходи щодо зниження рівня шуму на судні. Дослідження в роботі проводилось за двома напрямками – зниження шуму в самому джерелі і ослаблення звукової енергії, що поширюється повітрям і конструкціями корпусу на основі застосування системи автоматичного керування (САУ) і розробкою засобів звукопоглинання, яке практично може бути використано у вигляді звукоізолюючих огорожень, звукоізолюючих кабін і пультів управління, звукоізолюючих кожухів і акустичних екранів. У першому напрямку дослідження – автоматичному управлінні зниження вібрації (шуму) в джерелі розглянуті задачі аналізу і синтезу. Наведено критерій якості, який одночасно є характеристикою вібрації гнучких механічних конструкцій. В результаті розробленої САУ вібрацією композитних конструкцій і нового методу її синтезу під зовнішнім динамічним навантаженням з метою зниження рівнів вібраційного прискорення в широкій смузі низьких частот вдалося знизити вібрацію по всій поверхні гнучкої механічної конструкції. Другий напрям: дослідження з різним складом барієво-боратного піноскла показало його можливість використовувати як звуковбирний матеріал.*

**Ключові слова:** вібрація, шум, автоматична система управління, гнучка механічна конструкція, барієво-боратне піноскло.

**Gusev V.N. VIBRATION AND NOISE REDUCTION MANAGEMENT, ABSORPTION AND SOUNDPROOFING ORGANIZATION ON MARINE VESSELS**

*The paper discloses the human risk to vibration exposure and provides analysis of the main sources of noise on the ship. It also shows some measures to reduce the noise level on the ship. The research was conducted in two areas - noise reduction at the source and soundproofing of acoustic energy propagating through the air and the hull structure based on the application of automatic control system (ACS) and development of absorption means, which can be practically used as soundproof barriers, soundproof booths and control panels and acoustic screens. In the first direction of research automatic control of vibration reduction (noise) in the source, problems of analysis and synthesis are considered. A criterion of quality, which is also the vibration characteristic of flexible mechanical structures, is presented. Due to ACS development by the vibration of composite structures and a new method of its synthesis under external dynamic load, the vibration of the entire surface of the flexible mechanical structure was reduced. The second direction of investigation of different composition barium borate foam glass has shown its ability to be used as absorption material.*

**Keywords:** vibration, noise, automatic control system, a flexible mechanical design, barium borate foam glass.

© Гусев В.М.

Статтю прийнято  
до редакції 18.11.14