

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ ПО ВНЕДРЕНИЮ МЕТОДОВ АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА И ВИБРАЦИИ В СУДОСТРОЕНИИ

А.С. Быков,
М.Ю. Китанов,
А.Б. Майзель,
С.Ю. Никишов

Центральное конструкторское бюро
морской техники «Рубин»
ул. Марата, 90,
Санкт-Петербург,
Российская Федерация
191119
neptun@ckb-rubin.ru

Изложены основные положения теории построения систем активного гашения шума и вибрации при использовании адаптивного алгоритма подавления. Приведен обзор некоторых успешных зарубежных образцов подобных систем, используемых в различных областях промышленности. Сформулированы основные требования к перспективным системам активного подавления, создание которых будет востребовано в судостроении.

Ключевые слова: Методы активного подавления; система активного подавления; шум; вибрация; активный виброизолятор; судостроение

1 Введение

В различных областях промышленности и техники широко применяются средства пассивного гашения шума и вибрации, распространяющихся от работающих механизмов и систем. Предпочтения данному типу акустической защиты отдаются ввиду относительно небольшой стоимости и надежности в эксплуатации. Однако, в условиях постоянного ужесточения требований к акустическим характеристикам как отдельного оборудования, так и объектов их установки в целом, становится очевидным, что добиться необходимых величин снижения шума и вибрации только традиционными методами невозможно [1]. К тому же, в настоящее время возможности совершенствования пассивных средств акустической защиты близки к своему пределу.

2 Теоретические исследования

В материалах зарубежных публикаций всё чаще можно встретить упоминания об активных методах гашения шума и вибрации, основа которых состоит в возбуждении таких дополнительных шумовых и вибрационных полей, интерференция которых с первичными полями приводит к заданному снижению

остаточного уровня шумов и вибраций в некоторой области.

Иными словами, описанный принцип активного гашения заключается в следующем [2]. Для уменьшения интенсивности колебательного процесса в какой-либо области пространства необходимо зарегистрировать амплитуду и фазу этого процесса с помощью соответствующего приемника, подать сигнал в управляющий процессор, который в режиме реального времени преобразует исходный сигнал в аналогичный, но противоположный по фазе, а затем перенаправляет преобразованный сигнал в исследуемую область с помощью излучателя (рис. 1).

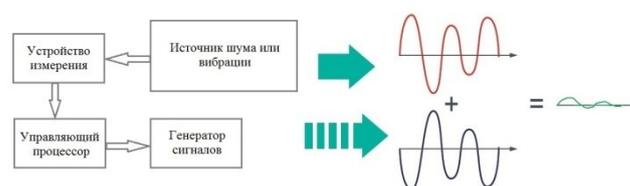


Рисунок 1. Принцип активного гашения

В большинстве случаев при решении задачи обеспечения тонкой настройки управления компенсирующими излучателями используют адаптивный алгоритм, работающий по следующим принципам. На основании информации,

поступающей от измерителей первоначального и скомпенсированного полей, адаптивный алгоритм регулирует характеристики излучателей, минимизируя среднюю мощность остаточного поля.

За критерий качества работы подобной системы принимают [3] суммарную среднюю мощность остаточного поля в точках размещения вторичных приемников

$$J(W) = \sum_{q=1}^n \left\langle |E(\vec{r}_q)|^2 \right\rangle, \quad (1)$$

где n – количество измерителей остаточного поля $\vec{E}(t)$; $E(\vec{r}_q) \equiv E_q(t)$ – значения некомпенсированного поля или его производной в точках расположения \vec{r}_q вторичных измерителей; W – квадратная ($M \times M$)-матрица весовых коэффициентов W_{ml} ($m, l = 1, \dots, M$).

Адаптивная система управления гасящими излучателями должна автоматически минимизировать выражение (1) по весовым коэффициентам W_{ml} . Следуя основным принципам построения вероятностных алгоритмов минимизации [4], адаптивный градиентный алгоритм настройки весовых коэффициентов может быть записан в виде следующего матричного выражения

$$\frac{dW_{ml}}{dt} = \gamma \cdot V_l(t) \sum_{q=1}^n G_{qm} \cdot E_q(t), \quad (2)$$

где \square – постоянный коэффициент, определяющий скорость сходимости адаптивного градиентного алгоритма; $V_l(t)$ – суммарный сигнал с l -го измерителя первичного поля; G_{qm} – корректирующий фильтр, обеспечивающий устойчивую работу системы, компенсируя фазовые набеги волн от m -го гасящего излучателя до q -го измерителя остаточного поля.

Преобразование сигналов между гасящими излучателями и измерителями остаточного поля описывается матрицей функции Грина G , а возможность возникновения волновой обратной связи между гасящими излучателями и

измерителями исходного поля описывается матрицей функции Грина G_{FB} . Наличие волновой обратной связи приводит к тому, что вектор сигналов $\vec{V}_\Sigma(t) = \{V_1(t), V_2(t), \dots, V_M(t)\}^T$ с первичных измерителей является суммой сигнала первичного поля и сигналов гасящих излучателей. Таким образом, адаптивные алгоритмы, используемые для настройки систем активного гашения, и оптимальные весовые коэффициенты W , минимизирующие суммарную мощность остаточного поля, при наличии волновой обратной связи зависят от элементов матриц Грина G и G_{FB} . Оптимальные весовые коэффициенты представлены зависимостями без учета обратной волновой связи [5]

$$W_{opt} = (G + G)^{-1} G + P_V R^{-1}, \quad (3)$$

с учетом обратной волновой связи

$$W_{st} = (I - W_{opt} G_{FB}) \cdot W_{opt}, \quad (4)$$

где P_V – взаимная корреляционная матрица между значениями исходного случайного поля в точках размещения первичных и вторичных измерителей; знак «+» – эрмитово сопряжение; R – корреляционная матрица значений случайного поля в точках размещения первичных преобразователей.

Таким образом, возможно аналитически исследовать характеристики адаптивной системы подавления в целом ряде модельных теоретических задач.

3 Зарубежный опыт внедрения систем активного подавления вибрации и шума

Акустические периодические издания и научно-технические конференции последних лет изобилуют публикациями, посвященными созданию подобных систем. Их разнообразие обусловлено способами формирования сигналов, обеспечивающих возбуждение дополнительных полей, наличием тех или иных средств их возбуждения, особенностями объектов или характеристик пространства, в котором

обеспечивается активное гашение. В основной массе технические решения по данной тематике отличаются друг от друга степенью сложности электронного оборудования, преобразующего исходный сигнал в подавляющий, и соответствующего программного обеспечения. В то же время примеров успешного внедрения таких устройств крайне мало из-за высокой сложности системы измеритель-излучатель и больших вычислительных затрат при реализации адаптивных алгоритмов управления, поэтому до конкретных изделий доходят единицы.

Больших успехов в создании действующих активных виброизоляторов добилась французская фирма Paulstra (концерн Hutchinson), разработавшая образец [6], продемонстрировавший более эффективную работу в сравнении с пассивными амортизаторами (рис. 2).

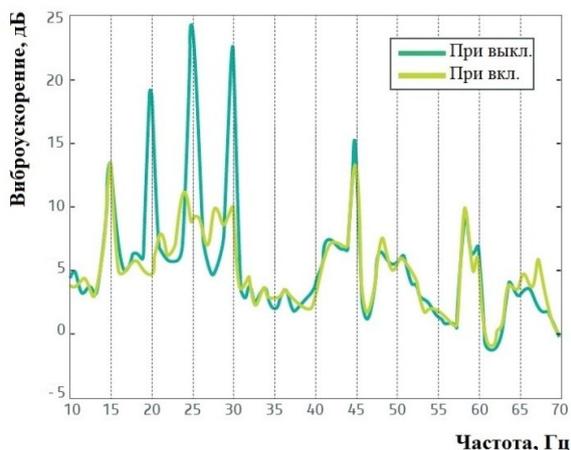
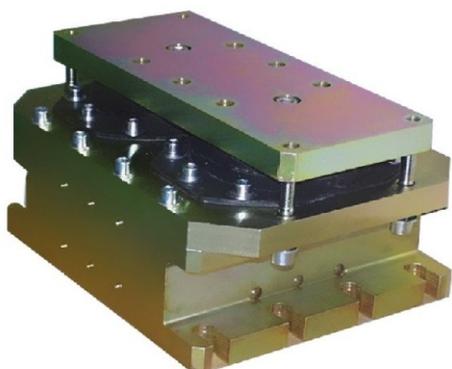


Рисунок 2. Активный виброизолятор фирмы Paulstra (Франция)

Ещё одним примером создания реально функционирующих систем активного снижения шума и вибрации служит разработанный китайскими специалистами составной виброизолятор для крепления трубопроводной системы [7], совмещающий в себе традиционную пассивную часть и активный элемент. Работоспособность системы подтверждена данными экспериментов, проведенных на специально созданной установке (рис. 3).

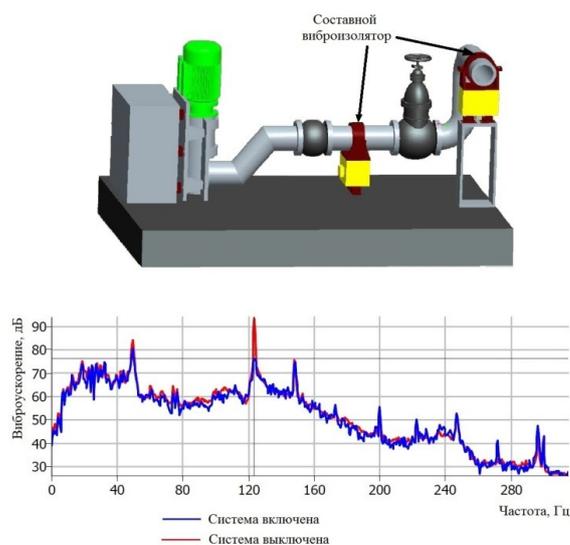


Рисунок 3. Композитный виброизолятор (Китай)

Также имеется информация о разработках активных и полуактивных опор под судовое оборудование, сочетающих в себе пассивный (пневматический) и активный (электромагнитный) элементы [8, 9], с целью снижения подводного шума судна, обусловленного функционированием системы водяного охлаждения механизмов (рис. 4 и рис. 5).

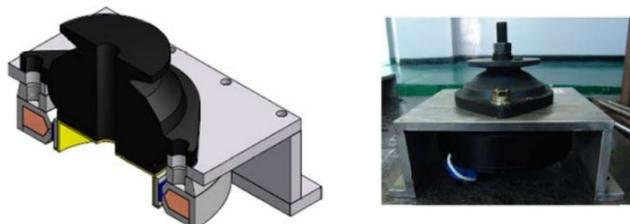


Рисунок 4. Гибридный амортизатор с электромагнитным возбудителем (Южная Корея)

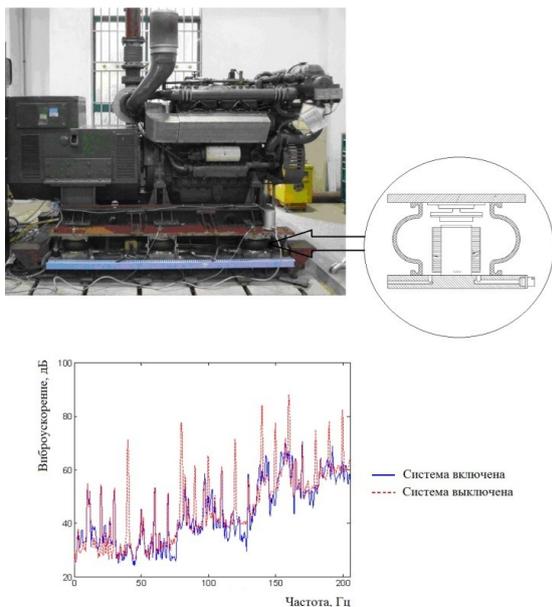


Рисунок 5. Активно-пассивный виброизолятор (Китай)

В США ведутся работы по активному управлению гидроакустическим полем атомной подводной лодки с использованием системы, способной:

- вести непрерывное наблюдение за уровнем и спектром собственного шума;
- осуществлять постоянный контроль текущих данных о шумности корабля и их сравнение с допустимыми значениями;
- управлять шумовым портретом корабля;
- обнаружить и локализовать источники шума и выдать рекомендации по их подавлению;
- анализировать тенденции, закономерности и причинно-следственные связи в изменении акустического портрета корабля.

4 Требования к отечественной системе активного подавления шума и вибрации

Практическое внедрение любых активных систем на объектах судостроительной отрасли встречает массу трудностей, связанных с реальными условиями их эксплуатации. Прежде всего это связано с особыми требованиями к внешним воздействующим факторам, возникающим при эксплуатации судна, а также

особенностями организации корабельной электрической сети. При этом система должна обладать устойчивым адаптивным алгоритмом активного гашения, позволяющим сохранять эффект при всех возможных эксплуатационных нагрузках. Также затесненные судовые условия накладывают определенные ограничения на габаритные размеры как управляющей аппаратуры, так и исполняющих органов, что для обозначенных выше условий может стать серьезной проблемой.

Задачи, которые должна решать активная система виброизоляции, могут быть следующими:

- уменьшение величин виброускорений на опорных поверхностях фундаментов оборудования;
- уменьшение перемещений оборудования при качке, с сохранением виброизолирующей эффективности системы.

Поскольку основные проблемы возникают при борьбе с гармоническими процессами, происходящими в низкочастотной области спектра, где возможности применения пассивных средств защиты крайне ограничены, наиболее интересными представляются активные системы, работающие именно в этом диапазоне частот.

В общем случае требования к системе активной виброизоляции для судового оборудования можно сформулировать следующим образом:

- должен быть выбран рабочий диапазон частот системы таким образом, чтобы в него попали основные частоты возмущающих сил конкретного оборудования;
- при работе системы виброизоляции в активном режиме, по сравнению с пассивной виброизоляцией, должно обеспечиваться снижение уровней вибрации на фундаменте в месте установки виброактивного оборудования:
 - а) для дискретных составляющих спектра не менее, чем на 15 дБ,
 - б) для сплошной части спектра не менее, чем на 6 дБ;

– в пассивном режиме виброизолятор должен иметь виброизолирующие характеристики, примерно соответствующие характеристикам пассивного виброизолятора;

– габаритные размеры активного виброизолятора должны быть не больше размеров пассивного виброизолятора;

– статическая нагрузка на активный виброизолятор должна соответствовать нагрузке на пассивный виброизолятор;

– система управления должна иметь минимальные размеры и управлять несколькими виброизоляторами.

При планировании работ по созданию активных обязательен к выполнению следующий комплекс работ:

– исследуется объект обесшумливания (является особенностью применения всех активных систем по причине необходимости наличия определенной информации о пространственных, частотных, силовых (энергетических) и других характеристиках);

– выбираются физические принципы функционирования системы снижения шума или вибрации;

– проектируются управляющие и исполнительные части системы;

– определяются места расположения исполнительных органов;

– отрабатывается устойчивый и оптимальный алгоритм функционирования;

– разрабатываются методы контроля эффективности.

В идеале необходима разработка единой общесудовой системы активной компенсации вибраций и шумов, вызываемых работой основного оборудования.

5 Заключение

Исходя из изложенного, следует, что создание активных систем в настоящее время является перспективной и, пожалуй, единственной реальной возможностью снижения уровней шума и вибрации на

судах, особенно в низкочастотной области спектра, когда исчерпан резерв на уменьшение возмущающих сил в источнике колебаний.

Список использованных источников

[1] Ионов А. В. Средства снижения вибрации и шума на судах / А. В. Ионов // СПб, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000.

[2] Малюжинец Г. Д. Нестандартные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью / Г. Д. Малюжинец // Труды Акустического института. – Вып. 15. - 1971. - С. 124-139.

[3] Арзамасов С. Н. Адаптивная система активного гашения шумовых полей в многомодовом волноводе / С. Н. Арзамасов, А. Н. Малахов, А. А. Мальцев // Акустический журнал. - 1982. - Т. 28. - № 5. - С. 583-587.

[4] Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

[5] Мальцев А. А. Адаптивные системы активного гашения шума и вибрации / А. А. Мальцев, Р. О. Масленников, А. В. Хоряев, В. В. Черепенников // Акустический журнал. - 2005. - Т. 51. - № 2. - С. 242-258.

[6] <http://www.paulstra-industry.com/upload/product/documentation/support-actifs-uk.pdf>

[7] Xinhui, Li, An experimental investigation of active vibration control for pipeline / Li Xinhui, Yang Tiejun, Wu Lei, Dai Lu // The 46nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2017), Aug. 2017 – P. 255-263.

[8] Yun-Ho, Shin, Study on the control limitation of parallel type active vibration isolator by electro-magnetic actuator for naval shipboard equipment / Shin Yun-Ho, Moon Seok-Jun, Jung Woo-Jin, Bae Soo-Ryong // The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), July 2015.

[9] Lin, He, Active-passive vibration isolation for ship machinery using electromagnetic actuator and air spring / He Lin, Li Yan, Shuai Chang-geng // The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), July 2015.

Andrey S. Bykov,
Mikhail U. Kitanov,
Alexander B. Maizel,
Sergey U. Nikishov

Central Design Bureau for Marine
Engineering "RUB IN"
90, Marata str.,
St. Petersburg,
Russian Federation
191119
neptun@ckb-rubun.ru

PLANNING OF WORKS TO INTRODUCE THE ACTIVE NOISE AND VIBRATION CONTROL METHODS FOR SHIPBUILDING

The main provisions of the theory of active damping of noise and vibration are described using the adaptive suppression algorithm. Provides an overview of some successful foreign models of similar system used in various industries. Formulated the basic requirements for advanced system of active suppression, the creation of which will be in demand in shipbuilding.

Key words: *Methods of active suppression; active suppression system; noise; vibration; active vibration isolator; shipbuilding*

References

- [1] Ionov, A.V. (2000), *Sredstva snigeniya vibratsii i shuma na sudakh* [Means to reduce vibration and noise on ships], Krylov State Research Centre.
- [2] Malyuzhinets, G.D. (1971), "Nestandardnyye zadachi difraktsii dlya volnovogo uravneniya s finitnoy pravoy chast'yu" [Non-standard diffraction problems for a wave equation with a finitary supported right-hand side], *Trudy Akusticheskogo instituta [Proc. of the Acoustical Institute]*, no. 15, pp. 124-139.
- [3] Arzamasov, S.N., Malakhov, A.N. and Maltsev, A.A. (1982), "Adaptivnaya sistema aktivnogo gasheniya shumovykh poley v mnogomodovom volnovode" [Adaptive system for active quenching of noise fields in a multimode waveguide], *Acoustic journal*, vol. 28, no. 5, pp. 583-587.
- [4] Tsyppkin, Ya.Z. (1970), *Osnovy teorii obuchayushchikhsya sistem* [Fundamentals of the theory of learning systems], *Nauka [Science]*.
- [5] Maltsev, A.A., Maslennikov, R.O., Horyaev, A.V. and Cherepennikov, V.V. (2005), "Adaptivnye sistemy aktivnogo gasheniya shuma i vibratsii" [Adaptive active noise and vibration damping systems], *Acoustic journal*, vol. 51, no. 2, pp. 242-258.
- [6] URL: <http://www.paulstra-industry.com/upload/product/documentation/support-actifs-uk.pdf>.
- [7] Xinhui Li, Tiejun Yang, Lei Wu and Lu Dai (2017), "An experimental investigation of active vibration control for pipeline" *The 46nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2017)*, pp. 255-263.
- [8] Yun-Ho Shin, Seok-Jun Moon, Woo-Jin Jung and Soo-Ryong Bae, (2015), "Study on the control limitation of parallel type active vibration isolator by electro-magnetic actuator for naval shipboard equipment", *The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22)*.
- [9] Lin He, Yan Li and Chang-geng Shuai (2015), "Active-passive vibration isolation for ship machinery using electromagnetic actuator and air spring", *The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22)*.