

СРАВНЕНИЕ МОНОПОЛЬНОГО И ДИПОЛЬНОГО СПОСОБА ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

**Олег Иванович Поливаев
Алексей Николаевич Кузнецов
Дмитрий Юрьевич Терехов
Виктор Васильевич Труфанов**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Снижение уровней шума на рабочем месте операторов мобильных энергетических средств является весьма актуальной задачей современного машиностроения. В настоящее время для выполнения требований санитарных норм производители автотракторной техники используют пассивные способы снижения шума. Ввиду особых характеристик подобных средств защиты их применение приводит к ухудшению эксплуатационных показателей техники и росту её себестоимости. Использование систем активного шумоподавления является наиболее перспективным способом снижения уровней внутренних звуковых полей в кабинах мобильных энергетических средств (МЭС) и других транспортных средств. Представлен анализ двух способов активного шумоподавления: с применением монопольного и дипольного источника антивоздуха (ИАЗ). Также проводится сравнение эффективности снижения амплитуд сигнала исходного шума и характера остаточного сигнала для данных способов. Испытания проводились на специально созданной лабораторной установке на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ВГАУ. Выявлено, что конструкция системы активного шумоподавления с применением монопольного источника способна снизить амплитуду исходного звукового сигнала в 10 раз – с 7,5 до 0,75 мВ, но при этом образуются отражённые вторичные волны, что приводит к увеличению на 50% амплитуды сигнала в звуковом канале до источника антивоздуха и искажению звукового сигнала в этой зоне. Использование дипольной конструкции позволяет снизить амплитуду исходного звукового сигнала в 30 раз – с 7,5 до 0,24 мВ. При этом искажения и усиления исходного сигнала в зоне между источником шума и ИАЗ не наблюдается. Согласно полученным данным уровень звука остаточного шума при использовании системы активного шумоподавления с дипольной конструкцией ИАЗ на 68% ниже, чем при применении монопольного ИАЗ, что делает её более предпочтительной для использования в кабине МЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шум, активное шумоподавление, монопольный источник, дипольный источник, мобильные энергетические средства.

COMPARISON OF MONOPOLE AND DIPOLE NOISE REDUCTION METHODS

**Oleg I. Polivaev
Alexey N. Kuznetsov
Dmitriy Yu. Terekhov
Viktor V. Trufanov**

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Technical solutions for noise level reduction in the cabin of mobile energy vehicles (MEV) are still relevant for modern engineering industry. Currently, tractor manufacturers use a passive noise control system in order to comply with sanitary standards. Due to the specific characteristics of such means of protection, their use leads to deterioration in performance and an increase in the cost of equipment. The use of active noise control system is the most promising way to reduce the levels of internal sound fields in the cabins of tractors and other vehicles. The authors look at two methods of active noise cancellation, i.e. using monopole and dipole source of antisound (SAS). The efficiency of reducing the signal amplitudes of the initial noise and the nature of the residual signal for both methods are also compared. Experiments were carried out on a specially created laboratory facility at the Department of Agricultural Machinery, Tractors and Cars of Voronezh SAU. According to the tests, the design of an active noise control system using a monopole SAS can reduce the amplitude of the original sound signal by 10 times from 7.5 to 0.75 mV. However, this method poses a problem of reflected secondary waves which leads to an increase in the signal amplitude in the audio channel to the antisound source by 50% and distortion of the

audio signal in this area. The dipole design reduces the amplitude of the original audio signal by 30 times from 7.5 to 0.24 mV. In this case, distortion and amplification of the original signal in the area between the noise source and SAS are not observed. According to the data, the sound level of residual noise when using an active noise control system with a dipole SAS is 68% lower than when using a monopole SAS, which makes it preferable for use in tractor cabin of MEV.

KEYWORDS: noise, active noise reduction, monopole source, dipole source, mobile energy vehicles (MEV).

Введение

Одной из важнейших задач современного машиностроения является сохранение на постоянном уровне производительности труда и здоровья операторов новых образцов мобильных энергетических средств (МЭС). Единственным способом решения данной задачи является обеспечение комфортных условий эксплуатации автотракторной техники для надлежащей защиты операторов от негативного воздействия внешней среды.

Уровни звука и вибрации на рабочем месте относятся к наиболее значимым факторам комфортабельности труда. Согласно исследованиям многих авторов уровень шума в кабине оператора сельскохозяйственных тракторов зачастую превышает допустимые нормы, что негативно сказывается на производительности труда, качестве выполняемой оператором работы, а также значительно увеличивает риск возникновения профессионального заболевания – нейрогуморальной тугоухости [9].

Широко используемые в современных мобильных энергетических средствах стандартные способы снижения шума зачастую оказываются неспособными обеспечить приемлемый уровень акустического комфорта в кабинах МЭС. Эффективность данных пассивных средств напрямую зависит от их массово габаритных параметров, из-за чего попытка снижения уровней звука в кабине трактора до требований санитарных норм может приводить к значительному удорожанию опытного образца техники, а также ухудшению его тягово-скоростных и топливно-экономических свойств. В результате все положительные стороны новой комфортабельной техники могут быть полностью нивелированы повышением цены и падением эксплуатационных показателей её применения [2, 4].

Поэтому в настоящее время появилась необходимость поиска новых технологий для снижения уровней звука в кабине, которые будут эффективно справляться со своей задачей и не оказывать значительного влияния на эксплуатационные свойства и себестоимость МЭС.

Одной из наиболее перспективных идей является снижение звуковых полей с помощью систем активного шумоподавления (САШ). Согласно проведённым исследованиям эффективность подобных систем в снижении низкочастотного шума может достигать 50 дБ.

Простейшая система активного шумоподавления состоит из 4 основных элементов – блока управления (БУ), входного и выходного микрофонов и источника антизвука (ИАЗ) [11].

Входной микрофон фиксирует сигнал исходного шума и передаёт его в электронный блок управления (ЭБУ), который изменяет фазу входного сигнала на противоположную с сохранением амплитуды. Преобразованный сигнал поступает на ИАЗ, генерирующий обратную звуковую волну. В некоторой зоне вблизи выходного микрофона происходит взаимное наложение сигналов исходного шума и сгенерированного ИАЗ. При этом уровень шума снижается или наблюдается полное его гашение. Выходной микрофон устанавливается в зоне предполагаемой тишины для контроля и корректировки сигнала, подаваемого на ИАЗ [1].

В системах активной компенсации применяются монопольные (однаправленный громкоговоритель), дипольные (диполь Свинбенкса) и трипольные (триполь Джесселя-Мажана-Каневета) источники антизвука [3, 7].

В системе Джесселя используются три монопольных ИАЗ для создания однаправленного источника. Система такого типа способна избегать генерирования обратной

связи между микрофонами и динамиками. Также в данной системе для достижения наилучшего результата может быть увеличено количество микрофонов [3].

Система активного шумоподавления с использованием монопольного ИАЗ имеет некоторые недостатки. Звуковая волна, исходящая от ИАЗ, усиливает волну первичного источника звука, что приводит к увеличению ее амплитуды в 2 раза в зоне между источником шума и ИАЗ. Увеличение амплитуды исходного сигнала в данной зоне негативно влияет на эффективность гашения звуковых полей, а также приводит к увеличению вибраций стенок звукового канала. Для исключения подобного явления необходимо увеличить число монопольных ИАЗ.

Трипольный ИАЗ громоздок, сложен в производстве и настройке, что создаёт дополнительные трудности его применения в МЭС.

Для достижения наилучшего эффекта по снижению шума оптимальным вариантом, с нашей точки зрения, является применение дипольного ИАЗ Свинбенкса.

Взаимодействие двух монопольных ИАЗ, образующих диполь, может быть описано следующей математической моделью.

Предположим, что два источника ИАЗ находятся на расстоянии l друг от друга. Следует отметить, что в принятой системе координат первый ИАЗ находится в точке с координатой $x = 0$, а второй – $x = l$. Каждый ИАЗ управляется отдельно и имеет возможность самостоятельно генерировать сложные звуковые волны [5].

Создаваемые двумя ИАЗ прямые (+) и обратные (–) звуковые волны описываются следующими уравнениями [3, 6]:

$$\begin{aligned} I \begin{cases} P_{\text{ИАЗ}_1+}(x) = A_{\text{ИАЗ}_1} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, x > 0 \\ P_{\text{ИАЗ}_1-}(x) = A_{\text{ИАЗ}_1} \cdot e^{+i \cdot k \cdot x}, x < 0 \end{cases} \\ II \begin{cases} P_{\text{ИАЗ}_2+}(x) = A_{\text{ИАЗ}_2} \cdot e^{-i \cdot k \cdot x}, x > l \\ P_{\text{ИАЗ}_2-}(x) = A_{\text{ИАЗ}_2} \cdot e^{+i \cdot k \cdot x}, x < l \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_{\text{ИАЗ}}$ – амплитуда колебаний давления, Па;

ω – угловая частота, рад/с;

k – акустическое волновое число, рад/м;

i – комплексное число, $i = \sqrt{-1}$.

Звуковые волны, создаваемые двумя ИАЗ, должны быть взаимосвязаны таким образом, чтобы их совместный сигнал оказывал влияние на исходную волну за первым ИАЗ, при этом суммарное давление, развиваемое перед ними, равнялось нулю

$$P_{\text{ИАЗ}_1-}(x) + P_{\text{ИАЗ}_2-}(x) = 0, x < 0. \quad (2)$$

Для выполнения данного условия необходимо соблюдение следующего равенства:

$$A_{\text{ИАЗ}_1} = -A_{\text{ИАЗ}_2} \cdot e^{-i \cdot k \cdot l}. \quad (3)$$

Это означает, что расположенный в позиции $x = 0$ ИАЗ должен генерировать задержанную и инвертированную копию сигнала, произведённого ИАЗ в позиции $x = l$. При обеспечении такого сдвига фаз оба эти сигнала будут образовывать нулевое давление в зоне расположения микрофона и далее за ним по звуковому каналу.

Тогда результирующее давление, генерируемое в канале за двумя ИАЗ, можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{рез}}(x) = (A_{\text{исх}} + A_{\text{ИАЗ}_2} (e^{i \cdot k \cdot l} - e^{-i \cdot k \cdot l})) \cdot e^{ikx}, x > l. \quad (4)$$

Отсюда для полного подавления исходной волны необходимо обеспечить следующее соотношение амплитуд исходной и созданной ИАЗ звуковых волн

$$A_{\text{ИАЗ}_2} = \frac{-A_{\text{исх}}}{2 \cdot i \cdot \sin(k \cdot l)}. \quad (5)$$

Материалы проведения испытаний

В подтверждение данной теории на кафедре сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей Воронежского государственного аграрного университета была создана лабораторная установка, представленная на рисунке 1.

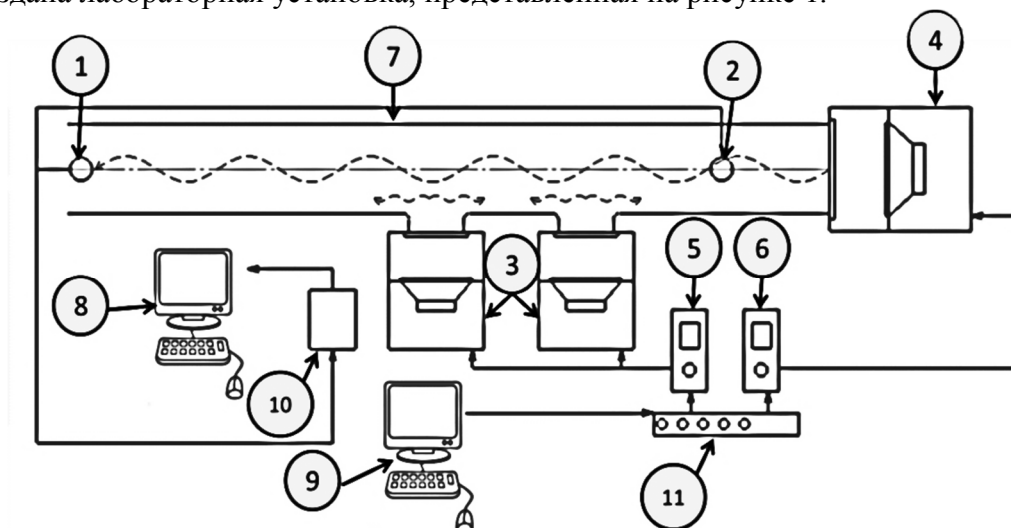


Рис. 1. Схема лабораторной установки шумоподавления с использованием дипольного ИАЗ (диполь Свинбенкса): 1 – микрофон, фиксирующий выходной сигнал; 2 – микрофон, фиксирующий шум исходного источника шума (ИИШ); 3 – ИАЗ с внутренней шумоизоляцией; 4 – ИИШ; 5 – стереоусилитель ИАЗ; 6 – стереоусилитель ИИШ; 7 – звуковой канал; 8 – компьютер, обрабатывающий сигнал от АЦП; 9 – компьютер, управляемый звуковой картой; 10 – АЦП; 11 – звуковая карта

В качестве ИИШ сигнала, а также ИАЗ использовались акустические динамики. Они были установлены в специально изготовленных шумоизолированных корпусах. Шумоизоляция была смонтирована с целью минимизации воздействия отражённых звуковых волн на исходный шумовой сигнал [7].

В качестве контролирующих устройств были выбраны ICP микрофоны ZET 501, установленные на входе и выходе звукового канала. Микрофон в начале канала считывает шум, исходящий от источника звука, сигнал которого должен быть погашен. Микрофон, установленный в конце, регистрирует выходной сигнал, полученный при взаимодействии исходной звуковой волны со звуковой волной, сгенерированной дипольным ИАЗ.

Считывание и передача аналоговых звуковых сигналов осуществляется с помощью звуковой карты M-Audio DELTA LT1010, которая способна индивидуально записывать и воспроизводить до 8 разных сигналов одновременно.

Созданный на компьютере 9 звуковой сигнал через звуковую карту 11 подаётся на усилитель ИАЗ 5 и усилитель ИИШ 6. Далее сигнал через динамики идет в звуковой канал, в котором расположены микрофоны 1 и 2. Микрофон 2 фиксирует шум от ИИШ, микрофон 1 – результирующий шум при прохождении звукового сигнала через ИАЗ. Полученные сигналы обрабатываются АЦП 10 и фиксируются компьютером 8.

Возможность воспроизведения до 8 различных сигналов позволяет объединить два вида систем активной компенсации в одном лабораторном стенде. За счёт независимости работы каждого громкоговорителя мы можем рассмотреть и сравнить эффективность систем с использованием монопольного ИАЗ и дипольного ИАЗ.

Методика проведения испытаний

1. Проводим калибровку микрофонов. Для этого микрофоны устанавливаются в одной точке и с различными по частоте звуковыми сигналами, с целью нахождения их передаточных коэффициентов.

2. Настраиваем взаимосвязь сигналов ИАЗ. Для этого необходимо выровнять по амплитуде звук, создаваемый каждым ИАЗ в районе микрофона, который расположен в звуковом канале в непосредственной близости от ИИШ.

3. Подбираем сдвиг фаз на одном из ИАЗ (рис. 2) таким образом, чтобы при их одновременной работе уровень звука в районе первого микрофона был минимален за счёт взаимного гашения в этой зоне сгенерированных звуковых волн.

4. Калибруем уровни звука, создаваемые ИАЗ и ИИШ в районе второго микрофона (в конце звукового канала). Калибровка проводится путём настроек усилителей таким образом, чтобы сигналы по амплитуде на выходе из каналов были одинаковыми.

Подбираем сдвиг фаз сигналов (рис. 3) вручную с помощью программного обеспечения компьютера. Основной задачей является подбор оптимального смещения фаз сигналов 2 и 3 – монополюсных ИАЗ, относительно друг друга и относительно сигнала 1 от ИИШ. Разность фаз необходима для минимизации уровня звука в конце звукового канала.

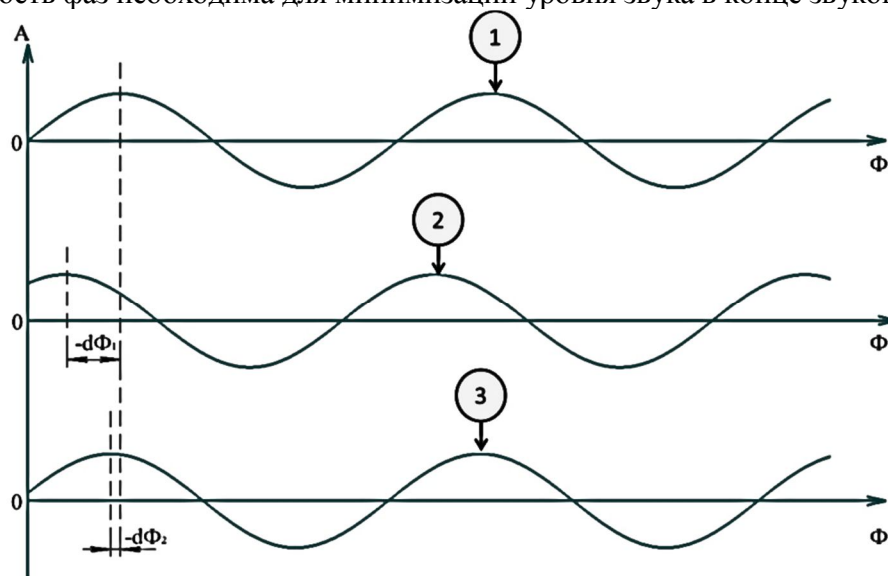


Рис. 2. Сдвиги фаз сигналов источников звука: 1 – сигнал ИИШ; 2 – сдвиг фазы сигнала первого ИАЗ; 3 – сдвиг фазы сигнала второго ИАЗ

Результаты и их обсуждение

С учётом особенностей конструкции удалось подобрать сдвиг фаз таким образом, что шум в системе с монополюсным ИАЗ снизился практически до нулевых значений амплитуд (рис. 3). В канале 1 отображён сигнал микрофона, который располагается вблизи ИИШ. В канале 2 показан сигнал с микрофона, установленного на выходе из звукового канала. На участке 0–1 наблюдается шум, который создает ИИШ при отсутствии активного гашения в начале (канал 1) и в конце звукового канала (канал 2) (рис. 4).

Участок 1–2 – плавное увеличение амплитуды сигнала, генерируемого одним ИАЗ, от минимального значения до максимального, которое задано в начале опыта. Как можно заметить, на участке 1–2 в конце звукового канала наблюдается плавное снижение амплитуды фиксируемого сигнала с 6,5 до 1 мВ, что свидетельствует о работоспособности системы активной компенсации звуковых полей с монополюсным ИАЗ. Однако, как и предполагалось, в звуковом канале между ИИШ и ИАЗ амплитуда исходного шума возросла с 6,5 до 9 мВ (участок 2–3, канал 1). Участок 3–4 – прекращение генерации ИАЗ гасящего сигнала.

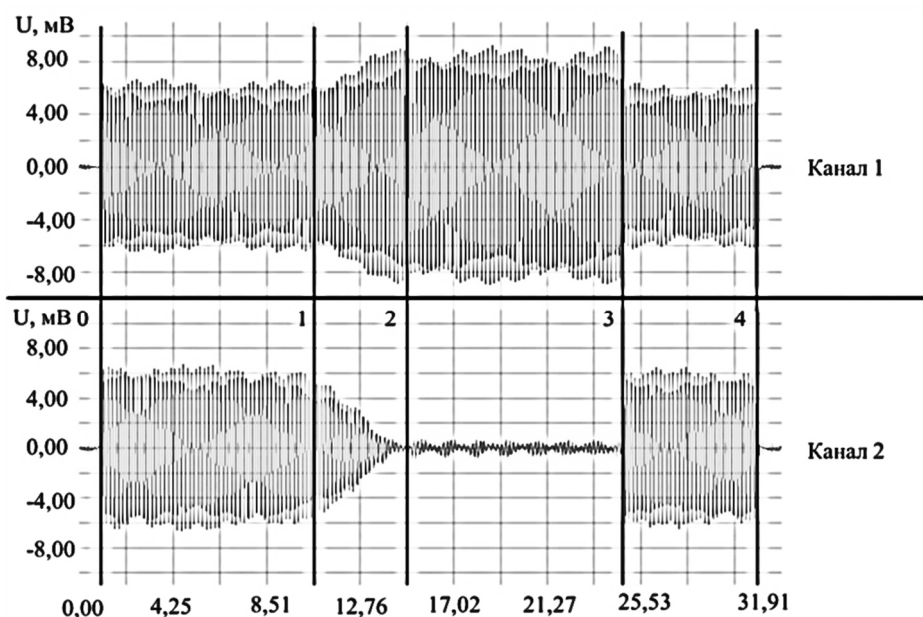


Рис. 3. Работа системы активного шумоподавления с одним ИАЗ: канал 1 – запись сигнала с микрофона, установленного в начале акустического канала, вблизи ИИШ; канал 2 – запись результирующего сигнала, установленного на выходе из акустического канала

Работа системы активного шумоподавления с дипольным ИАЗ представлена на рисунке 4. Канал 1 демонстрирует запись сигнала на выходе из звукового канала. Канал 2 регистрирует сигнал вблизи источника звука.

Участок 0–1 – сигнал ИИШ без гашения.

Участок 1–2 – сигнал, зарегистрированный микрофонами при включении одного ИАЗ.

Участок 2–3 – плавное включение второго ИАЗ.

Участок 3–4 – результирующий сигнал.

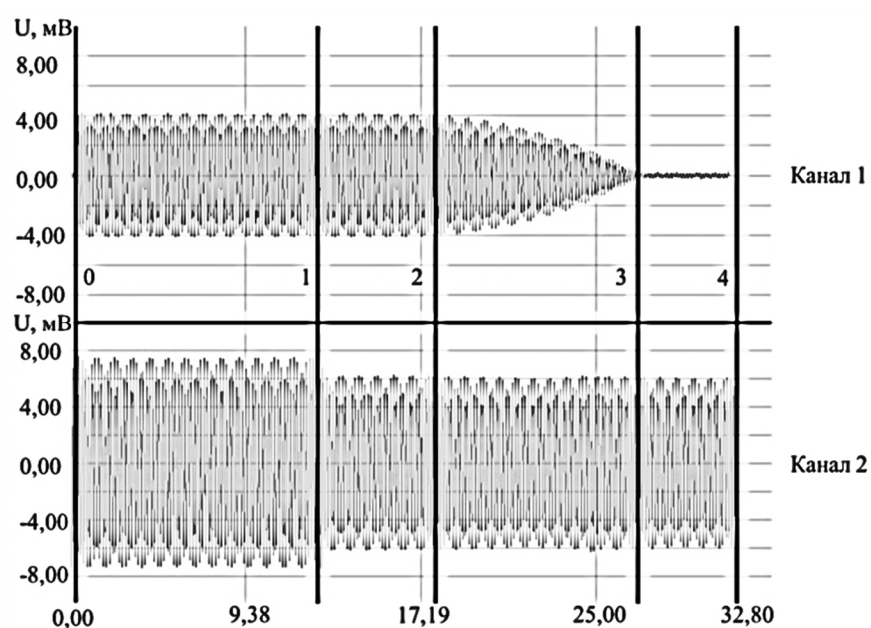


Рис. 4. Система шумоподавления с двумя ИАЗ: канал 1 – запись сигнала с микрофона, установленного в начале акустического канала, вблизи ИИШ; канал 2 – запись результирующего сигнала, установленного на выходе из акустического канала

При использовании дипольной конструкции ИАЗ в системе активной компенсации звуковых полей увеличения амплитуды исходного сигнала в звуковом канале до ИАЗ (участок 3–4, канал 2) не наблюдается. Подобный эффект характерен для систем активного шумоподавления, использующих монопольный ИАЗ (рис. 3, участок 2–3, канал 1). Применение конструкции с дипольным ИАЗ также позволяет сформировать однонаправленный источник гасящего сигнала за счёт использования двух монопольных ИАЗ, при этом наблюдается более качественное гашение: без скачков амплитуды и искажения формы результирующего сигнала (рис. 4).

Для систем активного шумоподавления с одним монопольным ИАЗ амплитуда результирующего шума составляет 0,75 мВ, а для систем с использованием дипольного ИАЗ – около 0,24 мВ, что ниже на 68%. При этом форма сигнала стабильнее, что способствует более качественному снижению шума при использовании систем активного гашения.

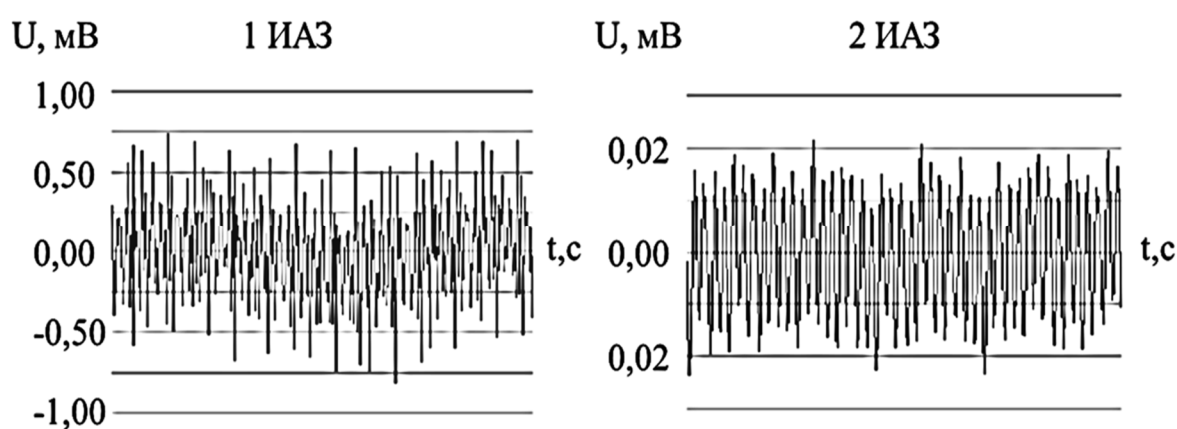


Рис. 5. Сравнение результирующего сигнала с использованием монопольной и дипольной конструкции

Выводы

В проведённых опытах с использованием монопольного ИАЗ (первый способ) и дипольного (второй способ) амплитуда результирующего сигнала составила соответственно 0,75 и 0,24 мВ, что говорит о большей эффективности второго способа. Физические характеристики сигнала, подвергающегося гашению, в обоих опытах были идентичны.

При использовании монопольного ИАЗ наблюдалось снижение амплитуды исходного сигнала с 7,5 мВ до 0,75 мВ, что в 10 раз ниже исходного уровня шума, а при использовании дипольного ИАЗ – с 7,5 мВ до 0,24 мВ. Амплитуда результирующего сигнала при использовании данного способа снизилась больше чем в 30 раз. Кроме того, форма результирующего сигнала более стабильна.

Применение систем активной компенсации звуковых полей с использованием двух монопольных ИАЗ является одним из наиболее перспективных способов снижения звуковых полей в кабинах МЭС.

Библиографический список

1. Васильев А.В. Расчет и снижение внутреннего шума и вибрации автомобилей / А.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2004. – Т. 6, № 2. – С. 389–398.
2. Васильев А.В. Снижение низкочастотного шума поршневых машин как существенный критерий экологической безопасности / А.В. Васильев // Вестник МАНЕБ. – 1998. – Т. 3, № 3. – С. 67–70.
3. Васильев А.В. Снижение низкочастотного шума и вибраций энергетических установок : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.06 / А.В. Васильев. – Санкт-Петербург, 2006. – 659 с.
4. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н.И. Иванов. – Москва : Логос, 2008. – 422 с.
5. Кузнецов А.Н. Разработка системы активного шумоподавления в глушителях тракторов сельскохозяйственного назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / А.Н. Кузнецов. – Воронеж, 2016. – 194 с.
6. Поливаев О.И. Математическое моделирование процесса активного подавления пульсаций потока выхлопных газов мобильных энергетических средств / О.И. Поливаев, В.С. Воищев, А.Н. Кузнецов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – Вып. 2 (33). – С. 96–102.
7. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука / С.Н. Ржевкин. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1960. – 336 с.
8. Скобцов Е.А. Методы снижения вибраций и шума дизелей / Е.А. Скобцов, А.Д. Изотов, Л.В. Тузов. – Москва ; Ленинград : Машгиз, 1962. – 192 с.
9. Устинов Ю.Ф. Оптимизация шумозащиты на рабочем месте операторов строительных и дорожных машин / Ю.Ф. Устинов, А.В. Скрынников, Н.Л. Хань // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2010. – № 1. – С. 226–230.
10. Xue D. Noises sources with vacuum in electrostatically suspended accelerometer / D. Xue // Journal of Vacuum Science and Technology. – 2011. – Vol. 31 (5). – Pp. 633–640.
11. Zafeiropoulos N. Active Noise Control in a Luxury Vehicle : Thesis for PhD / N. Zafeiropoulos, 2017. – 204 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Олег Иванович Поливаев – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: car205@agroeng.vsau.ru.

Алексей Николаевич Кузнецов – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: kuz-bass @yandex.ru.

Терехов Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: dima.terekhov2011@yandex.ru.

Виктор Васильевич Труфанов – доктор технических наук, профессор кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: bgd@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 21.11.2020

Дата принятия к печати 26.12.2020

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Oleg I. Polivaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: car205@agroeng.vsau.ru.

Alexey N. Kuznetsov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: kuz-bass@yandex.ru.

Dmitriy Yu. Terekhov, Postgraduate Student, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: dima.terekhov2011@yandex.ru.

Viktor V. Trufanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: bgd @agroeng.vsau.ru.

Received November 21, 2020

Accepted after revision December 26, 2020