

ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ШУМА**Н.К. Ванройе**

nikitavanroye@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены современные тенденции в разработке систем гашения шума, в частности систем активного гашения шума. Рассмотрены основные принципы активного гашения шума. Проведен анализ требований к фазовращателю для систем активного гашения шума. Приведены этапы схемотехнического проектирования фазовращателя. Исследована фазочастотная характеристика на основе выражения для выходного напряжения, полученного методом векторных диаграмм. Даны результаты SPICE-моделирования устройства: осциллограммы и фазочастотная характеристика. Актуальность работы определена необходимостью применения систем активного гашения низкочастотного шума в промышленности

Ключевые слова

Низкочастотный акустический шум, гашение шума, акустическая волна, противошум, фазовращатель, противофаза

Поступила в редакцию 19.01.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Окружающая среда индустриальных центров характеризуется многими дестабилизирующими воздействиями, не последнюю роль среди которых играют акустические шумы. Низкочастотный звук, возникающий при эксплуатации технологического оборудования, автотранспорта и т. п. негативно влияет на физическое состояние человека: угнетает центральную нервную систему; вызывает изменение скорости дыхания и пульса; способствует нарушению обмена веществ, возникновению сердечно-сосудистых заболеваний [1, 2]. В связи с этим необходимо применение средств гашения акустических шумов, как индивидуальных [3] так и пространственных [2]. Акустический шум — это любой нежелательный звук либо совокупность звуков, мешающих восприятию полезных сигналов, оказывающих вредное или раздражающее действие на организм человека, снижающих его работоспособность. По своей физической природе распространение акустического шума на различных частотах неоднородно: на низких основное воздействие несет плоская волна, на высоких проявляется более сложный характер звуковых колебаний. Для снижения акустического воздействия на высоких частотах используются, как правило, пассивные средства защиты, на низких частотах (до 500 Гц) наиболее эффективны активные средства, которые используют дополнительные источники энергии для формирования компенсирующего излучения [4, 5]. В данной работе основное внимание будет уделено активным методам борьбы с шумом с позиции практической реализации простой системы активного управления акустическими волновыми колебаниями.

Идея активного гашения шума возникла более полувека назад. Однако для ее эффективной практической реализации потребовались десятилетия. Первые упоминания о разработках активных систем гашения относятся к началу 30-х годов XX в. М.Н. Тухачевский еще в 1932 г. высказал идею гашения шума многомоторного самолета с учетом интерференции звуковых волн. По его словам, моторы можно настроить на такие тона, чтобы они взаимно друг друга глушили. Однако тогда эта идея не нашла практического воплощения. Распространению активных методов и средств защиты от шума способствовали, во-первых, необходимость снижения шума в диапазоне низких частот, где классические пассивные средства малоэффективны или вообще неприемлемы, во-вторых, успехи в области теории управления, вычислительной техники, цифровой обработки сигналов и микроэлектроники, что позволило удовлетворить высокие требования, предъявляемые к эффективности гашения, быстрдействию, устойчивости, массогабаритным и другим технико-экономическим показателям систем активного гашения (САГ) акустических шумов. В результате активные методы дополнили традиционные пассивные в диапазоне нижних частот, где в настоящее время нет альтернативных вариантов [6, 7]. В 1934 г. П. Луег запатентовал САГ шума, которая состояла из микрофона, блока управления, включающего в себя усилители, линии задержки и фильтры (обеспечивающие необходимую амплитудную и фазовую коррекцию измеряемого сигнала), и излучателя. Большинство авторов в то время ограничивались качественным описанием методов и средств гашения звуковых полей. В этот период были опубликованы исследования Г. Олсона и Е. Мэйя о локальном подавлении шума в случае индивидуальной защиты, У. Коновера, посвященные активному подавлению шума трансформаторов, и ряд работ других авторов.

Строгое теоретическое решение задачи активного гашения было дано в трудах Г.Д. Малюжинца (1964) и М. Жесселя (1968). Оно базировалось на использовании принципа Гюйгенса. В формулировке М. Жесселя излучающая поверхность представлена в виде сферы с равномерно распределенными по ней диполями и монополями. В соответствии с принципом Гюйгенса такая поверхность гасит снаружи сферическую волну точечного источника, помещенного в ее центр. Для компенсации распределенного в пространстве источника его следует окружить слоем из таких сферических поверхностей. При устремлении толщины слоя к нулю решение Жесселя переходит в более общее решение Г.Д. Малюжинца. Подробный анализ истории и тенденций развития исследований в области САГ шума приведено в работах [8–10].

В данной статье предложен новый подход к созданию простого и эффективного устройства, реализующего источник компенсирующей волны для САГ акустических шумов на базе RC-фазовращателя.

Актуальность исследования заключается в высокой востребованности устройств активной защиты от акустических шумов на фоне растущего количества промышленных предприятий в крупных индустриальных центрах. Как следствие, шумовой фон растет, что пагубно сказывается на уровне жизни людей, проживающих в промышленных районах. Уровень низкочастотного звука, пре-

обладающий в спектре шумового загрязнения города, сложнее снизить системами пассивного гашения в силу большой длины волны по сравнению с толщиной защитных загоронок. Наиболее действенным методом борьбы с таким шумом являются адаптивные САГ, работающие путем наложения компенсирующего звукового поля на исходный шум. Разработка простых, дешевых и эффективных фазовращателей для решения задач активной компенсации шума востребована производителями автомобильной техники, энергооборудования, строительной отраслью.

Анализ общих принципов активного гашения акустических шумов. САГ шума являются системами управления в реальном времени и все шире используются для защиты человека и технических систем от интенсивных акустических и вибрационных воздействий (активные системы снижения шума на транспорте, в системах вентиляции, активные системы виброзащиты для высокоточного оборудования и т. д.). Работа САГ шума основывается на принципе деструктивной интерференции, состоящем в том, что распространяющаяся звуковая волна может быть погашена путем ее смещения с инвертирующей звуковой волной, которая сдвинута по фазе относительно основной на 180° (рис. 1).

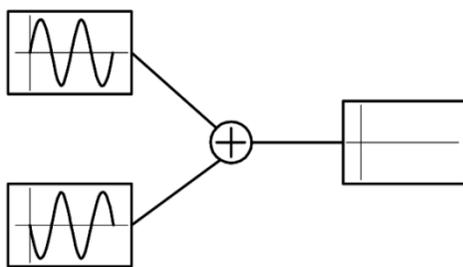


Рис. 1. Принцип активного гашения звуковой волны

Развитие систем гашения акустических шумов берет начало с методов пассивного гашения. Эти методы реализуют с применением пассивных средств, таких как глушители, перегородки из звукопоглощающих материалов и т. п. [2]. Чтобы эффективно снижать шум на низких частотах, эти средства должны быть массивными и иметь большие габариты, сравнимые с длиной волны, что не всегда осуществимо на практике. Кроме того, пассивные средства могут создавать дополнительное аэродинамическое сопротивление, особенно при глушении шума в вентиляционных каналах [6–8].

На протяжении последних десятилетий ведутся активные работы в области проектирования эффективных и дешевых САГ. Их отличительной особенностью является гашение волнового воздействия путем наложения на исходное поле другого поля, инверсного по отношению к гасимому. При практическом применении данных систем целесообразным является удовлетворение требований к точности настройки, быстродействию и устойчивости системы управления [6].

В простейшем случае САГ шума представляет собой систему из принимающего микрофона, блока управления с усилителем, фильтрами фазовой и амплитудной коррекции и устройства фазовой инверсии, а также излучателя. Основной проблемой широкого распространения САГ является их сложность, попытки управления широкополосным акустическим шумом в пространстве накладывают серьезные требования к быстродействию вычислительной системы,

необходимости применения дорогостоящих средств цифровой обработки сигналов и систем с массовым параллелизмом [11–13]. Однако в ряде случаев, когда есть возможность четкого выделения полигармонического характера спектра гасимого поля, возможно эффективное применение простых и вместе с тем эффективных классических фазовращателей [14], при этом на первый план выходят вопросы их схемотехнической реализации и настройки [15–17].

Фазовращатели для САГ шума. В классической САГ шума необходимо устройство, которое предназначено для преобразования входного сигнала в сигнал с той же амплитудой напряжения и той же частотой, но сдвинутый относительно исходного на некоторое значение, которое должна быть постоянным в ходе преобразования [18]. Для этих целей можно использовать классические фазовращатели — устройства, с помощью которых вводится в электрическую цепь известный и регулируемый фазовый сдвиг. Конструкция и принцип его действия зависят от диапазона частот, для которого он предназначен.

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема САГ для полигармонических полей. Со звукового генератора ЗГ подается сигнал на основной динамик ДИН. Создаваемое им звуковое давление фиксируется микрофоном МИК, а соответствующий ему уровень звукового давления оценивается измерительным усилителем ИУ. Управляющий сигнал, с помощью которого реализуется принцип активного гашения шума, формируют фазовращатель ФВ и усилитель мощности УМ. Фазовращатель осуществляет сдвиг фазы подаваемого со звукового генератора сигнала, что фиксирует осциллограф ОСЦ. Далее усилитель мощности УМ регулирует управляющий сигнал по амплитуде и подает на дополнительный динамик ДОП ДИН [4]. Их действие основано на влиянии соотношения активных и реактивных составляющих полного сопротивления цепи на угол сдвига фаз между входными напряжениями.

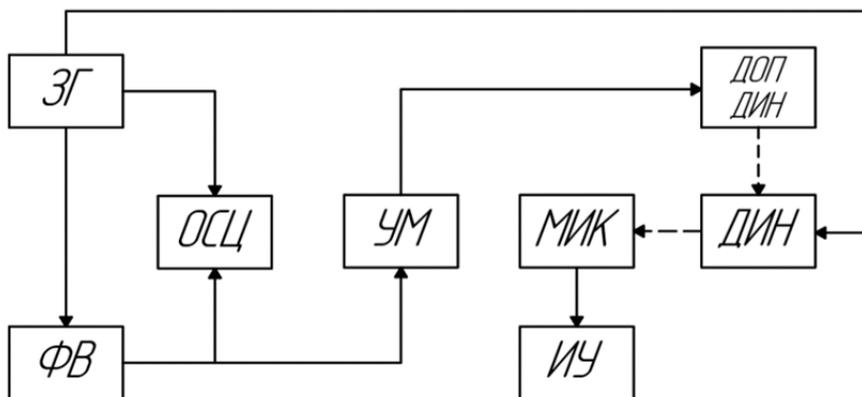


Рис. 2. Структурная схема САГ

Для полного гашения шумов необходимо получить точную инвертированную копию основной звуковой волны. При этом малые отклонения амплитуды

и фазы гасящей звуковой волны, гашение основного шума от основного источника происходит частично [4].

При условии того, что источник чистого тона с частотой ω создает звуковое давление $p_1 = A \cos \omega t$, полное его гашение может быть достигнуто при звуковом давлении вторичного источника тона $p_2 = -A \cos \omega t$. Если амплитуда вторичного источника будет составлять B , можно достигнуть только частичного гашения. Эффективность гашения шума:

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{p_1}{(p_1 + p_2)} \right)^2.$$

Значение эффективности зависит от согласованности источников по фазе и по амплитуде. Достичь идеального гашения шума можно при условии сдвига по фазе звуковых волн источника шума и противозум $\varphi = 180^\circ$ и отношении их амплитуд $k = \frac{B}{A} = 1$.

Таким образом, при полной согласованности амплитуд ($k = 1$) для получения эффективности $\Delta L > 30$ Дб, значение сдвига фаз должно отличаться от $\varphi = 180^\circ$ не более чем на $\Delta\varphi = 2^\circ$ [4, 7, 14].

Разработка перспективного RC-фазовращателя в системе активного управления низкочастотным полигармоническим акустическим полем. На рис. 3 представлена структурная схема RC-фазовращателя для САГ низкочастотного полигармонического шума. Устройство содержит два фазорасщепителя и два фазовых контура, позволяющих настроить точный сдвиг фаз на конкретных частотах. Для согласования входного сопротивления усилителя низких частот и выходного сопротивления фазовращателя предусмотрен повторитель. Для фильтрации выходного сигнала от постоянной составляющей в схему включен фильтр верхних частот.



Рис. 3. Структурная схема фазовращателя

Схемотехническая реализация фазовращателя изображена на схеме электрической принципиальной, которая представлена на рис. 4.

Фазорасщепитель 1 на основе n -канального полевого транзистора с управляющим p - n переходом $VT1$ преобразует входной сигнал в два сигнала с равными амплитудами и инверсией фаз. Корректировка фазового сдвига $0...180^\circ$ осуществляется фазовым контуром 1 на базе RC-фильтра на конденсаторе $C1$ и переменном резисторе $R6$. Далее сигнал с скорректированной фазой относительно исходного поступает на вход фазорасщепителя 2, после чего его фазовый сдвиг корректируется $180...360^\circ$ фазовым контуром. Фазовый сдвиг сигнала осуществляется подбором

номиналов переменных резисторов R_6 и R_8 . При этом изменяется частота среза RC -фильтра. Истоковый повторитель составлен на основе полевого транзистора VT_3 . Конденсатор C_3 представляет собой фильтр верхних частот, ограничивающий поступление постоянного напряжения на вход УНЧ.

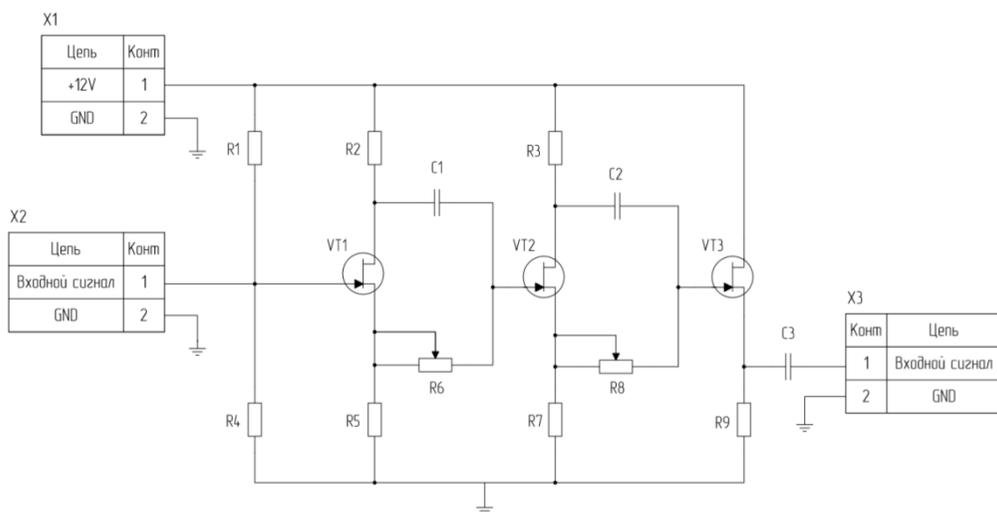


Рис. 4. Принципиальная схема фазовращателя

Фазовые характеристики физически реализуемых фазовых контуров при работе в диапазоне частот отклоняются от логарифмического закона, что снижает точность фазового сдвига. Поскольку значение этого отклонения зависит от частоты, то погрешность фазового сдвига оказывается различной для каждой составляющей рабочего спектра [19, 20].

Пассивные RC -цепи позволяют синтезировать фазовые контуры, передаточные функции которых имеют лишь вещественные полюсы. Передаточные функции с такими особенностями, как правило, находят применение лишь при синтезе фазовращателей [21].

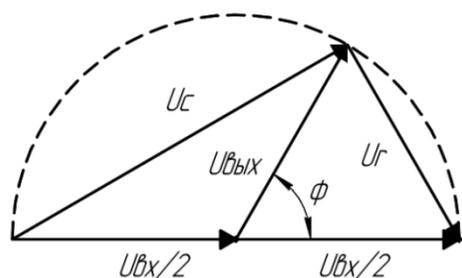


Рис. 5. Векторная диаграмма RC -фазовращателя

Плечи R и C являются фазосдвигающими: напряжения U_R и U_C сдвинуты относительно друг друга на 90° . Сумма этих напряжений всегда равна входному напряжению. Сопротивление R можно изменять от 0 до 1 МОм; емкость C постоянна и составляет 0,01 мкФ. При изменении сопротивления значения амплитуд U_R и U_C изменяются. На векторной диаграмме (рис. 5) показано взаимное расположение векторов напряжений (U_R , U_C , $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$). Вектор выходного напряжения при изменении сопротивления резистора описывает полуокружность. Траектория движе-

напряжений (U_R , U_C , $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$). Вектор выходного напряжения при изменении сопротивления резистора описывает полуокружность. Траектория движе-

ния радиус-вектора выходного напряжения представляет собой половину окружности.

Ток I протекая по резистору R , создает на нем падение напряжения U_R , совпадающее по фазе с током I .

Напряжение на конденсаторе C отстает от тока I на 90° . Вектор входного напряжения $U_{вх}$ равен геометрической сумме векторов напряжений U_R и U_C , т. е.

$$U_{вх} = U_R + U_C = U_{R_1} + (-jX_{C_1} I_1) = I_1(R_1 - jX_{C_1}).$$

Аналогично для второго фазового контура:

$$U_{вх} = I_2(R_2 - jX_{C_2}). \quad (1)$$

Вектор $U_{ввх}$ на векторной диаграмме представляет собой напряжение на выходе фазовращателя, работающего в режиме холостого хода, φ — угол сдвига фаз между напряжениями $U_{вх}$ и $U_{ввх}$.

Из векторной диаграммы следует:

$$U_{ввх} = I_1 R_1 + jX_{C_1} I_1 = I_1(R_1 + jX_{C_1}). \quad (2)$$

Поделим левую и правую части выражения (1) на левую и правую части выражения (2):

$$\frac{U_{вх}}{U_{ввх}} = \frac{I_1(R_1 - jX_{C_1})}{I_1(R_1 + jX_{C_1})}.$$

Отсюда выходное напряжение холостого хода:

$$U_{ввх, хх} = U_{вх} \frac{R_1 + jX_{C_1}}{R_1 - jX_{C_1}}.$$

Из диаграммы следует, что $|U_{ввх}| = \left| \frac{U_{вх}}{2} \right|$ и $\varphi = -2\arctg(\omega RC)$. Таким образом, при изменении сопротивления резистора R от 0 до 1 МОм фазовый сдвиг на первом фазовом контуре изменяется от 0° до 180° . Между нагрузкой и выходом фазовращателя включен повторитель с конечным импедансом $Z_{вх}$. Так пределы изменения фазового сдвига на одном фазовом контуре составят приблизительно от 10° до 160° .

Достоинством рассмотренной схемы является ее простота. К недостаткам можно отнести то, что при асимметрии плеч ($R_1 \neq R_2$ и $X_{C_1} \neq X_{C_2}$) искажается амплитуда выходного напряжения.

Оценим значение сопротивления R для разворота фазы выходного сигнала на 90° .

Сигнал на выходе $U_{ввх}$ имеет ту же частоту и амплитуду, что и входной сигнал, но запаздывает относительно $U_{вх}$ на 90° .

В общем виде выражение для выходного напряжения схемы фазовращателя имеет вид

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} e^{j\varphi},$$

где φ — фазовый угол.

Фазовый угол φ зависит только от $R_{\text{вх}}$, реактивного сопротивления $C_{\text{вх}}$ и от частоты f входного сигнала $U_{\text{вх}}$. Они связаны следующими соотношениями:

$$\varphi = -2\arctg(2\pi f R_{\text{вх}} C_{\text{вх}}). \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что $\varphi = -90^\circ$, когда $R_{\text{вх}} = C_{\text{вх}}$, таким образом

$$R_{\text{вх}} = \frac{1}{2\pi f C_{\text{вх}}}. \quad (4)$$

Для данной реализации устройства при частоте входного сигнала $f = 1$ кГц и номинале конденсатора RC фазового контура $C_{\text{вх}} = 0,01$ мкФ согласно выражению (4) номинал резистора 1-го фазового контура $R_{\text{вх}} = 16,9$ кОм. Осциллограммы входного сигнала (черный цвет) и сигнала с выхода фазовращателя (серый цвет) представлены на рис. 6.

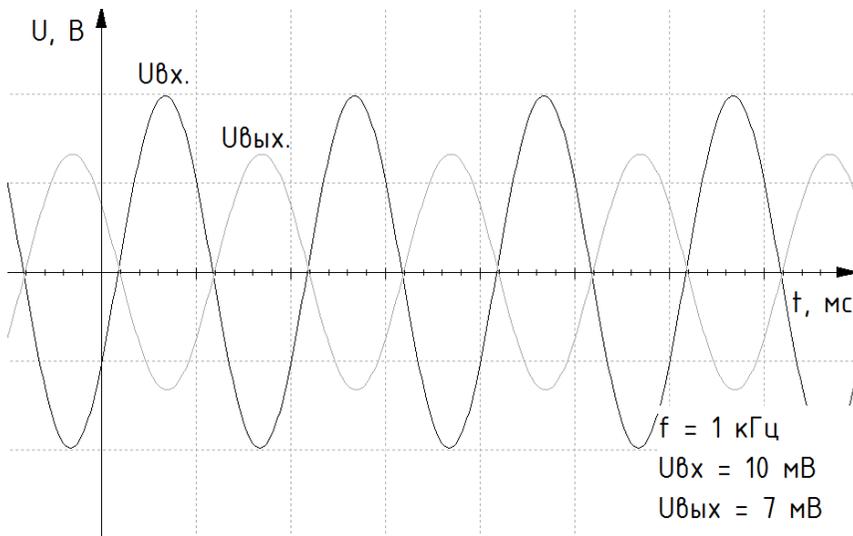


Рис. 6. Осциллограммы входного и выходного сигнала с фазовращателя

Зависимость разности фаз между выходным и входным сигналами от частоты сигнала, приходящего на вход фазовращателя (фазочастотная характеристика) при установленных номиналах на двух фазовых контурах представлена на рис. 7.

Фазовращатели обладают частотно-зависимой фазовой характеристикой. Согласно данной характеристике, сдвиг фазы на 180° на частоте 1кГц составляет 180° , что соответствует расчетам и осциллограммам SPICE-модели.

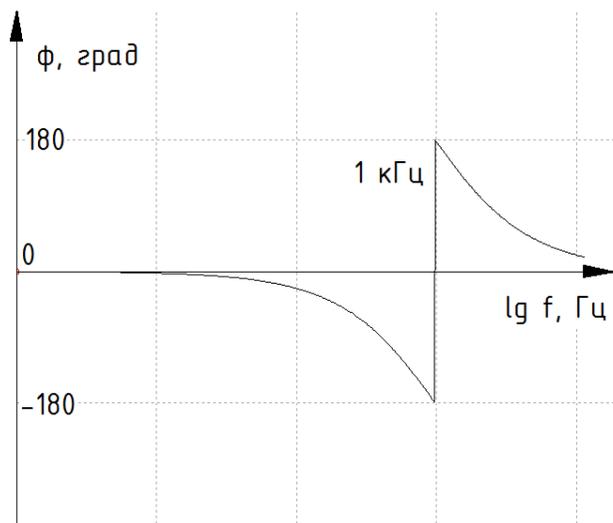


Рис. 7. ФЧХ фазовращателя в диапазоне частот входного сигнала 1...20 кГц

С помощью предложенного в работе подхода к построению простого и эффективного фазовращателя можно осуществить задержку аналогового сигнала на заданное время, выделение сигнала из его смеси с шумами, корректировать фазочастотные характеристики каналов связи и т. д.

В результате анализа требуемых характеристик фазовращателя для САГ, его схемотехнического анализа, расчета передаточной функции векторно-аналитическим методом и анализа осциллограмм и фазочастотных характеристик, полученных с применением инструментов среды SPICE-проектирования NI Multisim 12.0, определено, что данная реализация фазовращателя пригодна для систем активного гашения шума в диапазоне низких частот для полигармонических полей.

Литература

1. Власов А.И., Конькова А.Ф. Медико-диагностические экспертные системы для оценки адекватности адаптивной реакции организма на воздействие экстремальных факторов // Конверсия. 1995. № 9–10. С. 18–21.
2. Справочник проектировщика. Защита от шума / под ред. Е.Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1974. 134 с.
3. Власов А.И., Семенцов С.Г., Поляков Ю.А. Микропроцессорные микросистемы активной акустической индивидуальной защиты // Нано- и микросистемная техника. 2000. № 2. С. 5.
4. Комкин А.И. Исследование системы активного гашения шума. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 10 с.
5. Власов А.И., Колосков С.В. Волшебство волновых полей: волновые поля в школьном курсе физики // Компьютер в школе. 2000. № 3. С. 16–20.
6. Власов А.И. Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1997. № 8. С. 59–70.

7. *Комкин А.И.* Снижение шума машин активным методом. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 21 с.
8. *Власов А.И.* Аппаратно-программные методы и микропроцессорные средства активной защиты человеко-машинных управляющих систем от акустических воздействий: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
9. *Соловейчик Л.И.* Обзор работ по применению систем активного гашения шума на производстве и транспорте // Применение средств вибропоглощения и виброгашения в промышленности и на транспорте: Сборник. Л.: Знание, 1990. С. 9–17.
10. *Власов А.И., Володин Е.А., Семенцов С.Г., Шахнов В.А.* Электронные системы активного управления волновыми полями: история и тенденции развития // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 4. С. 3–23.
11. *Власов А.И.* Аппаратная реализация нейроадаптивных систем активного управления волновыми полями в промышленном стандарте РС-104 // Информационные технологии. 1998. № 12. С. 13–17.
12. *Власов А.И.* Аппаратная реализация нейровычислительных управляющих систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 1999. № 2. С. 61–65.
13. *Власов А.И.* Нейросетевая реализация микропроцессорных систем активной акустической и виброзащиты // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2000. № 1. С. 40–44.
14. *Vlasov A.I., Safullin R.R.* Principles and experiments with active noise control system in one-dimensional waveguide // Proceedings of the Eleventh International Congress on Sound and Vibration, St.-Petersburg, 05 July 2004, St.-Petersburg, Politekhnik, 2004. Pp. 279–282.
15. *Власов А.И., Семенцов С.Г.* Системный анализ на основе моделирования передаточных функций вторичного канала для систем активного гашения шума авиационной техники // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 10. С. 43–49.
16. *Власов А.И.* Особенности построения систем автоматизированного синтеза и моделирования средств защиты от влияния волновых полей // Информационные технологии. 1997. № 9. С. 31–38.
17. *Дудко В.Г., Верейнов К.Д., Шахнов В.А., Власов А.И., Тимошкин А.Г.* Применение алгоритма сеточной аппроксимации среды в адаптивных системах для активного подавления акустических шумов электронной аппаратуры // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Автоматизированные системы управления производством и разработками. 1996. № 2. С. 45–49.
18. *Семенцов С.Г.* Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи в системах активного управления акустическими полями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 4. С. 88–102.
19. *Белецкий А.Ф.* Теория линейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1986. 544 с.
20. *Верзунов М.В.* Однополосная модуляция в радиосвязи. М.: Воениздат. 1972. 295 с.
21. *Авраменко В.Л., Галямичев Ю.Г., Ланне А.А.* Электрические линии задержки и фазовращатели: справочник. М.: Связь. 1973. 22 с.

Ванройе Никита Клод — бакалавр кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — А.И. Комкин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

PHASE SHIFTER FOR ACTIVE NOISE DAMPENING SYSTEM

N.K Vanroye

nikitavanroye@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with the present-day trends in development of noise dampening systems, in particular active noise dampening systems. We consider the main principles of active noise dampening. First, we analyzed the requirements to the phase shifter for systems of active noise dampening. Then, we described the stages of circuit design of the phase shifter and examined the phase-frequency characteristic according to the output voltage formula obtained by the vector diagram method. Finally, we presented the results of SPICE simulation of the device: oscillograms and phase-frequency characteristics. The importance of the work is determined by the need to use active low-frequency noise dampening systems in industry

Keywords

Low-frequency acoustic noise, noise dampening, acoustic wave, anti-noise, phase shifter, antiphase, active noise control

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Vlasov A.I., Kon'kova A.F. Medico-diagnostic expert systems for an assessment of adequacy of adaptive reaction of an organism to influence of extreme factors. *Konversiya* [Conversion], 1995, no. 9–10, pp. 18–21 (in Russ.).
- [2] Yudin E.Ya. *Spravochnik proektirovshchika. Zashchita ot shuma* [Directory of designer. Noise protection]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 134 p. (in Russ.).
- [3] Vlasov A.I., Sementsov S.G., Polyakov Yu.A. Microprossing systems for active acoustic safeguard. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology], 2000, no. 2, p. 5 (in Russ.).
- [4] Komkin A.I. *Issledovanie sistemy aktivnogo gasheniya shuma* [A study of the system of active noise dampening]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 10 p. (in Russ.).
- [5] Vlasov A.I., Koloskov S.V. Magic of wave fields: wave fields in a school course of physics. *Komp'yuter v shkole* [Computer at school], 2000, no. 3, pp. 16–20 (in Russ.).
- [6] Vlasov A.I. Current status and development trends of the theory and practice of active damping of wave fields. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems: monitoring, control, and diagnostics], 1997, no. 8, pp. 59–70 (in Russ.).
- [7] Komkin A.I. *Snizhenie shuma mashin aktivnym metodom* [Reducing noise active method]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 21 p. (in Russ.).
- [8] Vlasov A.I. *Apparatno-programmnye metody i mikroprotsessornye sredstva aktivnoy zashchity cheloveko-mashinnykh upravlyayushchikh sistem ot akusticheskikh vozdeystviy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Hardware and software methods and microprocessor means of active protection man-machine control systems from acoustic effects. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1997 (in Russ.).
- [9] Soloveychik L.I. Review of the literature on the use of active suppression systems noise in manufacturing and transport. *Primenenie sredstv vibropogloshcheniya i vibrogasheniya v promyshlennosti*

- nosti i na transporte: Sbornik* [The use of vibration absorbing and vibration absorption in industry and transport: a Collection], Leningrad, Znanie Publ., 1990, pp. 9–17 (in Russ.).
- [10] Vlasov A.I., Volodin E.A., Sementsov S.G., Shakhnov V.A. Electronic systems of active management of wave fields: history and tendencies of development. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Telecommunications and Radio Engineering], 2002, no. 4, pp. 3–23 (in Russ.).
- [11] Vlasov A.I. Hardware realization of neuroadaptive systems of active management of wave fields in the industrial RS-104 standard. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 1998, no.12, pp. 13–17 (in Russ.).
- [12] Vlasov A.I. Hardware implementation neuro computing control systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems: monitoring, control, and diagnostics], 1999, no. 2, pp. 61–65 (in Russ.).
- [13] Vlasov A.I. Neural network realization of microprocessor systems active noise- and vibration control. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputing: development, application], 2000, no. 1, pp. 40–44 (in Russ.).
- [14] Vlasov A.I., Safiullin R.R. Principles and experiments with active noise control system in one-dimensional waveguide. *Proceedings of the Eleventh International Congress on Sound and Vibration*, St.-Petersburg, 05 July 2004, St.-Petersburg, Politekhnik Publ., pp. 279–282.
- [15] Vlasov A.I., Sementsov S.G. Analysis of the systems basis of design of functions of transmissions of the second channel for systems of active extinguishing of noise of aviation technique. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2008, no. 10, pp. 43–49 (in Russ.).
- [16] Vlasov A.I. Features of creation of systems of the automated synthesis and modeling of means of protection from influence of wave fields. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 1997, no. 9, pp. 31–38 (in Russ.).
- [17] Dudko V.G., Vereynov K.D., Shakhnov V.A., Vlasov A.I., Timoshkin A.G. Application of algorithm of net approximation of the environment in adaptive systems for active suppression of acoustic noise of the electronic equipment. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya proizvodstvom i razrabotkami* [Questions of radio electronics. series: the automated production control system and development], 1996, no. 2, pp. 45–49 (in Russ.).
- [18] Sementsov S.G. Analog-Digital and Digital-to-Analog Converters in Systems of Active Control of Acoustic Fields. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering], 2008, no. 4, pp. 88–102 (in Russ.).
- [19] Beletskiy A.F. Teoriya lineynykh elektricheskikh tsepey [The theory of linear electric circuits]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 544 p. (in Russ.).
- [20] Verzunov M.V. Odnopolosnaya modulyatsiya v radiosvyazi [Single-sideband modulation in radio communications]. Moscow, Voenizdat Publ., 1972. 295 p. (in Russ.).
- [21] Avramenko V.L., Galyamichev Yu.G., Lanne A.A. Elektricheskie linii zaderzhki i fazovrashchateli: spravochnik [Electrical delay lines and phase shifters: a handbook]. Moscow, Svyaz' Publ., 1973. 22 p. (in Russ.).

Vanroye N.K. — Bachelor's Degree student of the Department of Design and Manufacture of Electronic Equipment, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — A.I. Komkin, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.