

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ С МОДЕЛЬЮ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МАШИН С ОГРАНИЧЕННЫМ ШУМОМ

С.Г. Семенцов
ФГУП «НПП ВНИИЭМ»

Кратко рассмотрены управляющие структуры систем активного гашения шума. Показана возможность использования для снижения шума некоторых классов объектов неадаптивных систем с моделью передаточной функции среды распространения. Рассмотрен пример конкретной реализации такой системы на базе медицинского оборудования.

Ключевые слова: система активного гашения шума.

Среди широкого спектра выпускаемого НПП ВНИИЭМ оборудования машины с ограниченным шумом и медицинская техника занимают особое место. Помимо набора функциональных требований и требований по надежности эти классы оборудования должны обеспечивать выполнение жестких норм по акустическому шуму и вибрациям. Например для послеоперационных отсасывателей ОП-1 на расстоянии 1 м установлен допустимый уровень

звукового давления 48 дБ или уровень звука 32 дБА. Вместе с тем, при проведении выходного контроля шума готовых изделий, несмотря на отработанность конструкции и технологии сборки, в среднем только 60% отсасывателей соответствуют этим требованиям. Это заставляет принимать дополнительные меры по снижению акустического шума оборудования.

Основным источником шума в послеоперационном отсасывателе ОП-1 является кожух прибора,

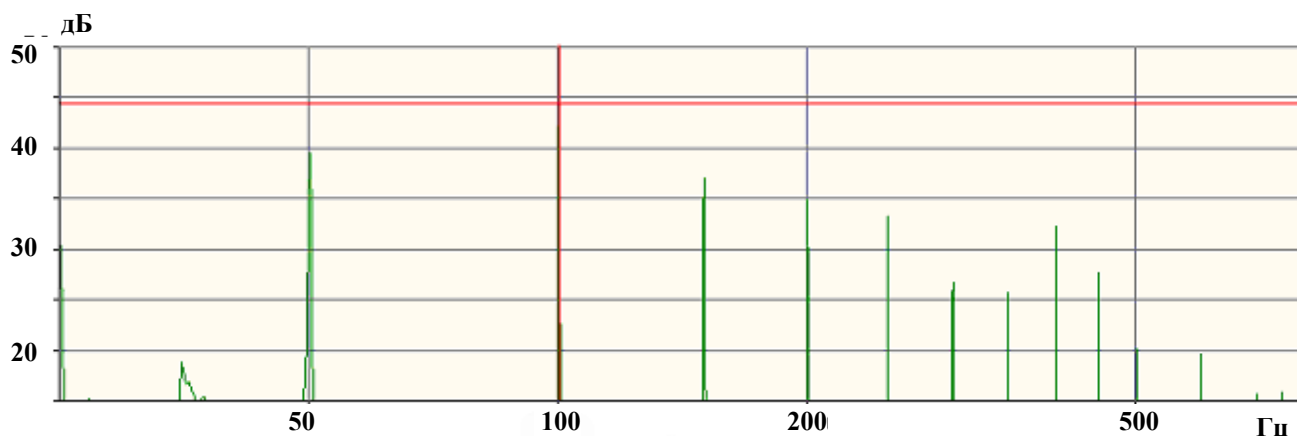


Рис. 1. Общий уровень и спектральный состав акустического шума ОП-1

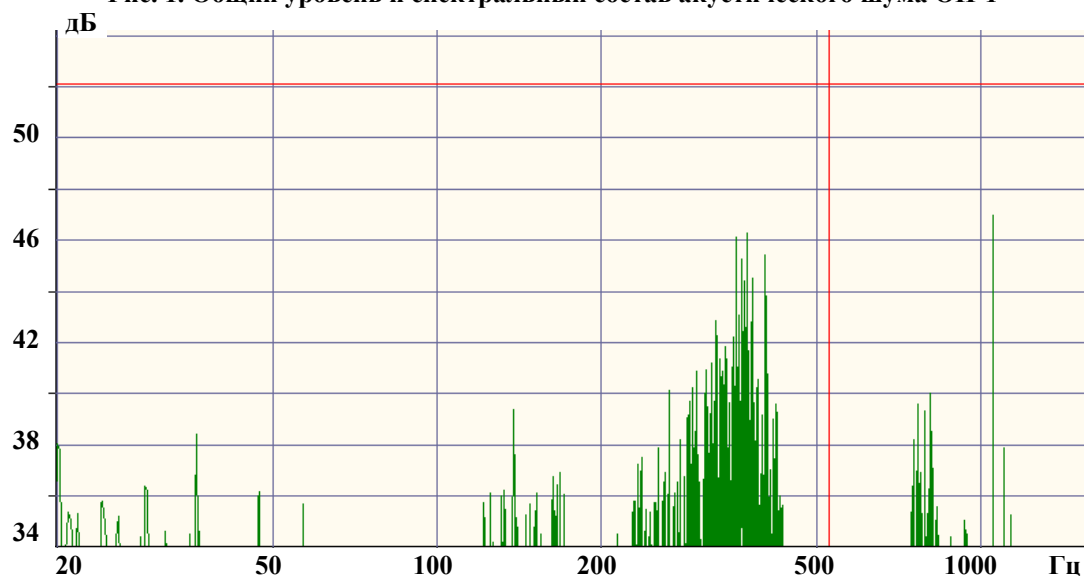


Рис. 2. Спектральный состав акустического шума асинхронной электрической машины

возбуждаемый вибрациями электрического однофазного двигателя и компрессора. При этом основная энергия шумового сигнала сосредоточена в области низких частот. Основной вклад в общий уровень шума вносят ярковыраженные спектральные компоненты на частотах 50, 100 и 150 Гц с уровнями 40, 44 и 38 дБ соответственно (рис. 1). При этом применение виброизолирующих прокладок между кожухом прибора и компрессором оказывается малоэффективным.

Для электрических асинхронных машин основным источником шума является спектральная компонента, обусловленная лопаточной частотой вентилятора. Например для машин АН122 частота этой компоненты равна 525 Гц при уровне 52 дБ (рис. 2).

Поскольку в обоих случаях основная энергия шума сосредоточена в низкочастотной части спектра, то для его снижения необходимо использование пассивных глушителей значительного размера и массы. Вместе с тем, рассматриваемые классы оборудования имеют жесткие ограничения на массогабаритные характеристики, что не допускает установку дополнительных демпферов и поглотителей. В этой ситуации целесообразно применение активных средств гашения шума, обладающих наибольшей эффективностью в области низких частот.

Идея активного гашения шума не нова [1] и основана на формировании противофазной исходному шуму гасящей волны. Системы активного гашения (САГ), как правило, строятся по адаптивной и неадаптивной схеме.

В адаптивных САГ [2] при воздействии внешнего шума $x(k)$ блок управления вырабатывает отклик $y(k)$ (рис. 3). Разностный сигнал (сигнал ошибки гашения) $e(k)$ по-

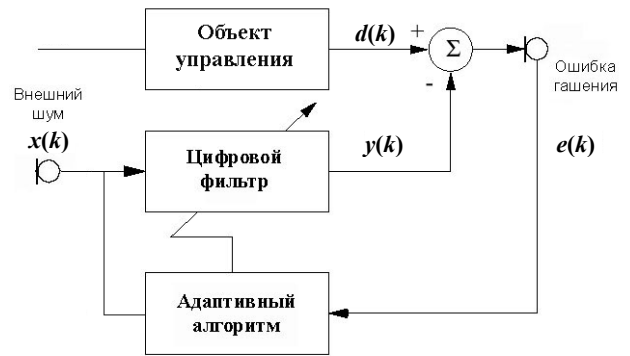


Рис. 3. Структура адаптивной САГ

ступает снова в блок управления, где по критерию минимизации мощности сигнала ошибки с помощью адаптивного алгоритма пересчитываются коэффициенты цифрового фильтра, т.е. формируется новый отклик $y'(k)$.

Таким образом, в процессе настройки системы адаптивный фильтр моделирует передаточную функцию объекта управления для заданного входного воздействия. Вместе с тем, при наличии достаточно адекватной модели передаточной функции, а также при выполнении следующих условий: неизменность передаточной функции объекта управления; высокая пространственная однородность передаточной функции; неизменность и стационарность входного воздействия. Эффективные САГ могут быть реализованы и по неадаптивной схеме. Для реальных объектов эти условия выполняются лишь для узкого класса систем. Тем не менее, неадаптивные САГ используются для гашения шума силовых электроустановок (трансформаторы, реакторы) [3].

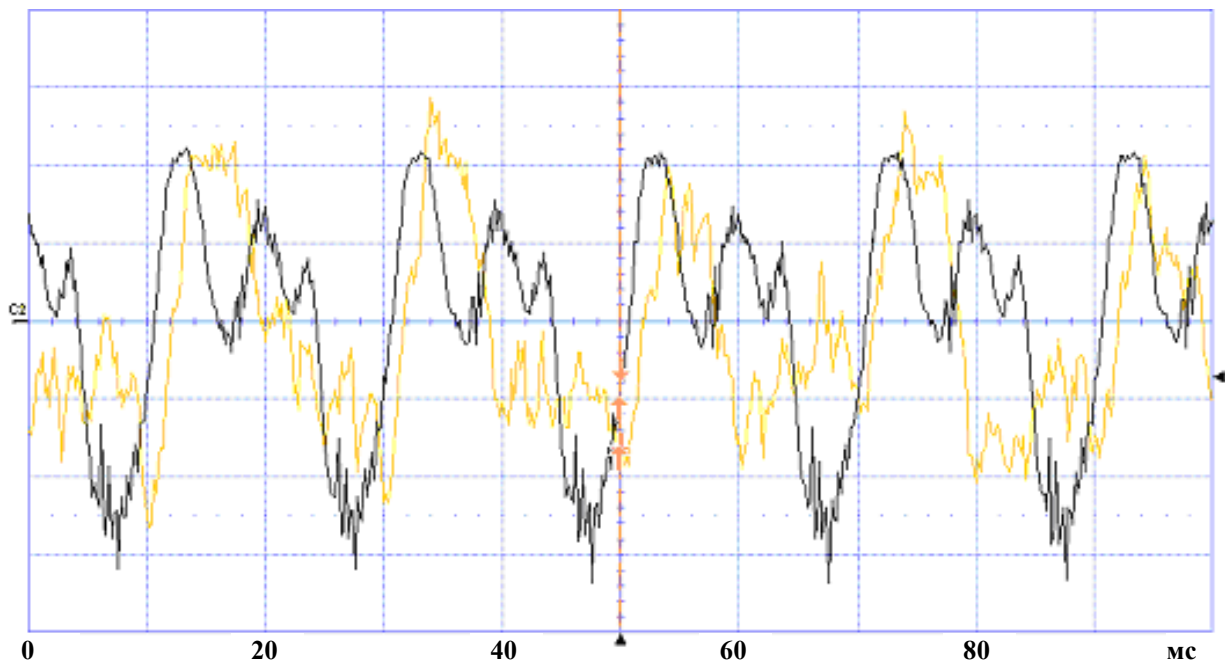


Рис. 4. Временное представление сигналов вибрации (черный) и шума (серый)

Рассмотрим особенности реализации неадаптивной САГ с моделью передаточной функции на примере снижения шума ОП-1.

В данном случае, принимая во внимание область применения прибора, невозможно использовать в качестве опорного сигнала для работы САГ сигнал с микрофона, поскольку такой подход может привести к возникновению акустической обратной связи и, как следствие, к потенциальной неустойчивости системы. Поэтому в качестве опорного может быть использован сигнал с вибродатчика, расположенного на кожухе прибора. Акустический и вибрационный сигналы когерентны, однако акустический сигнал имеет более высокий уровень высших гармоник (рис. 4).

Таким образом, для формирования адекватного гасящего сигнала необходимо построение модели, описывающей передаточную функцию среды распространения при излучении звука кожухом прибора. Для решения этой задачи может быть использована модель в среде MATLAB, представленная на рис. 5, где $x(n)$ – вибрационный сигнал, $y(n)$ – акустический сигнал.

В процессе проведения процедуры идентификации модель передаточной функции была реализована в виде КИХ-фильтра 128-го порядка с тактовой частотой 800 Гц (блок Digital Filter). Отклик полученной модели в частотной области представлен на рис. 6.

На базе созданной модели была разработана управляющая структура неадаптивной САГ шума ОП-1 в среде MATLAB (рис. 7).

Она включает в себя следующие блоки:

- From Wave Devices – блок чтения данных из модуля АЦП;
- Antialiasing Filter – блок НЧ-фильтра;
- Transfer Function Model – цифровой фильтр, описывающий модель передаточной функции;
- Delay – блок задержки для подстройки фазы компенсирующего сигнала;
- dB Gain – блок усиления для подстройки амплитуды компенсирующего сигнала;

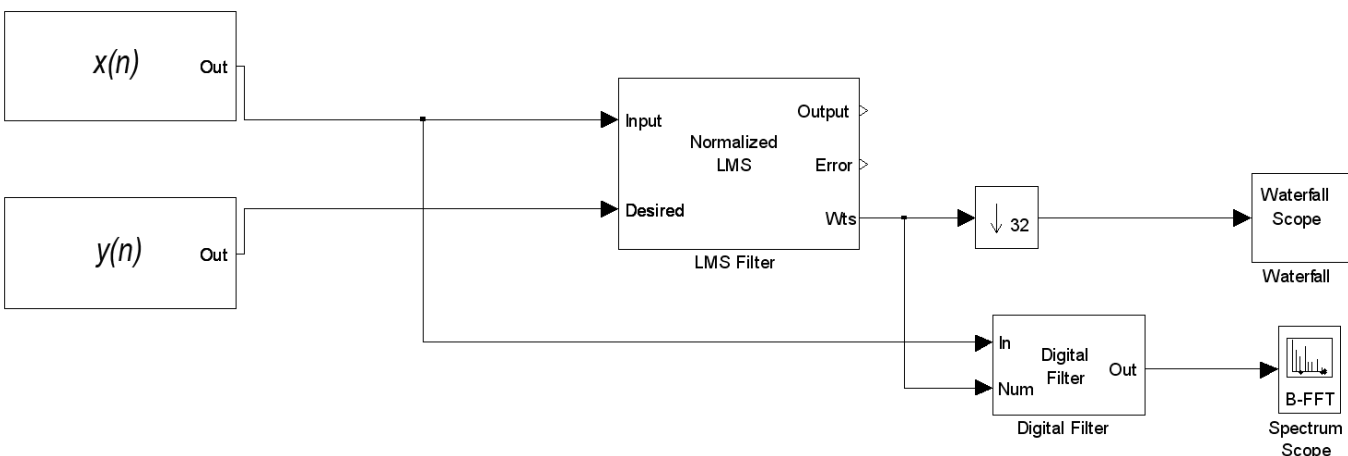


Рис. 5. Модель в среде MATLAB для идентификации передаточной функции

туды компенсирующего сигнала;

- To Wave Device – блок для вывода данных на модуль ЦАП.

Помимо программных блоков экспериментальная установка также включает в себя следующее оборудование:

- акселерометр Брюль & Кьер 4333 в комплекте с усилителем заряда 2635;
- усилитель мощности Брюль & Кьер 2706;
- фазовращатель;
- малогабаритный НЧ-излучатель .

НЧ-излучатель монтировался непосредственно на кожухе прибора через виброизолирующую прокладку. Настройка фазы и амплитуды гасящего сигнала проводилась по минимуму сигнала на контрольном микрофоне, расположенном на расстоянии 1 м от кожуха прибора.

В силу физических ограничений эффективность излучения компоненты 50 Гц малогабаритным излучателем низка. Чтобы избежать перегрузки излучателя в систему был введен ВЧ-фильтр с частотой среза 80 Гц.

Результаты эксперимента по подавлению частотной компоненты 100 Гц приведены на рис. 8.

Как можно заметить в ходе эксперимента эффективность гашения на частоте 100 Гц составляет более 18 дБ. Для частотных компонент 150 и 200 Гц эффективность составила 10 и 8 дБ соответственно.

Для исследования пространственной структуры акустического поля в режиме активного гашения снималось распределение звукового давления на частоте 100 Гц в полузаглушенной камере объемом 327 м³. Испытываемый образец располагался непосредственно на отражающем полу. Измерялось невзвешенное звуковое давление по 8 точкам на расстоянии 0,5, 1, 1,5 и 2 м от прибора в одной плоскости на высоте 1 м от отражающего пола. В процессе измерений уровень фонового шума в полосе 30 – 10000 Гц не превышал 20 дБ.

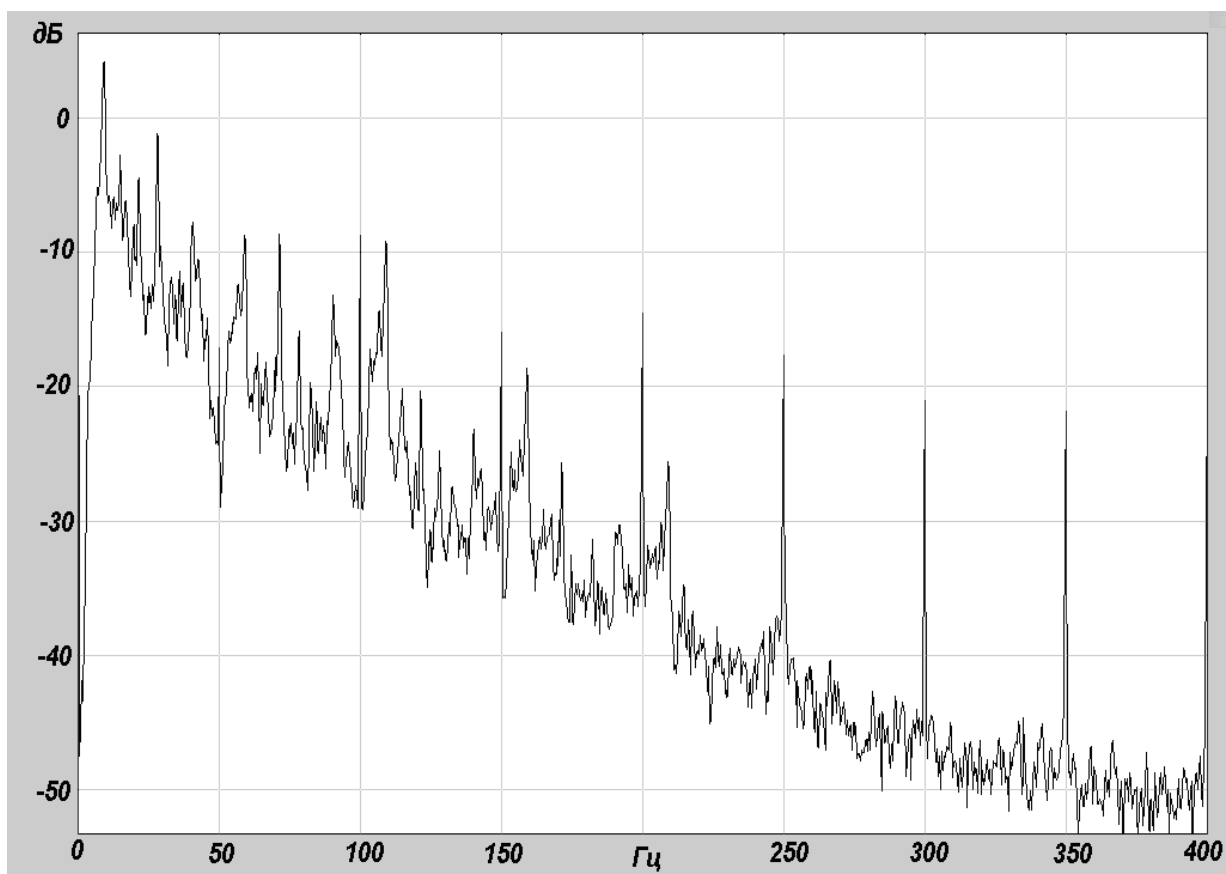


Рис. 6. Отклик в частотной области модели передаточной функции

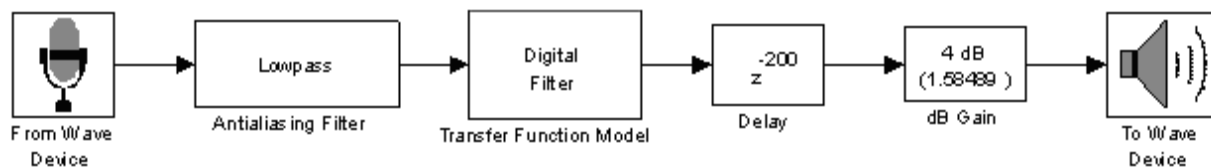


Рис. 7. Управляющая структура в среде MATLAB

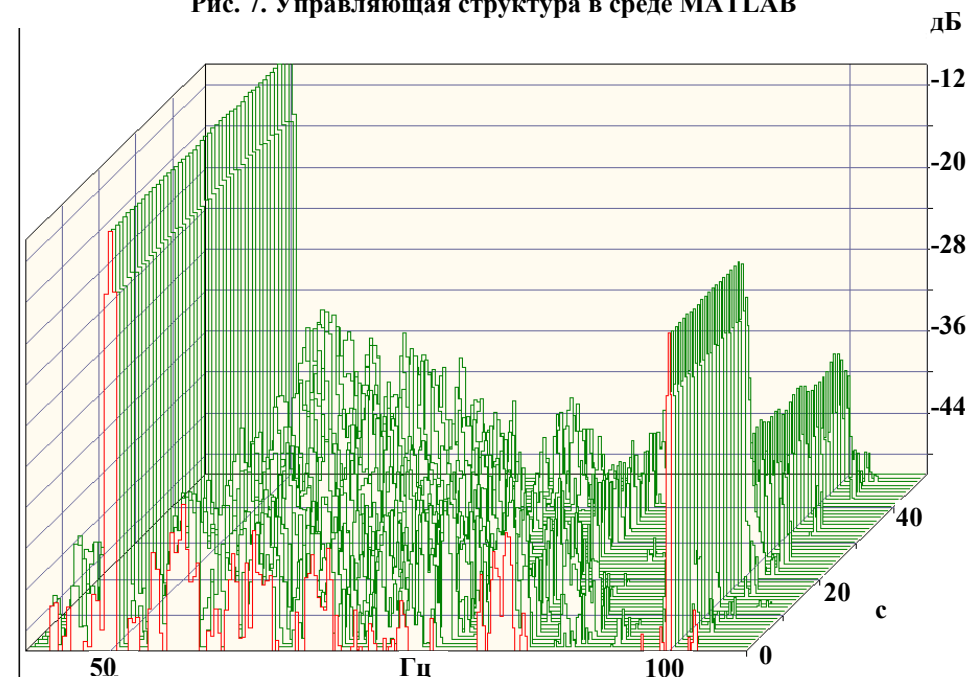


Рис. 8. Изменение спектра шумового сигнала при включении компенсирующего источника на частоте 100 Гц

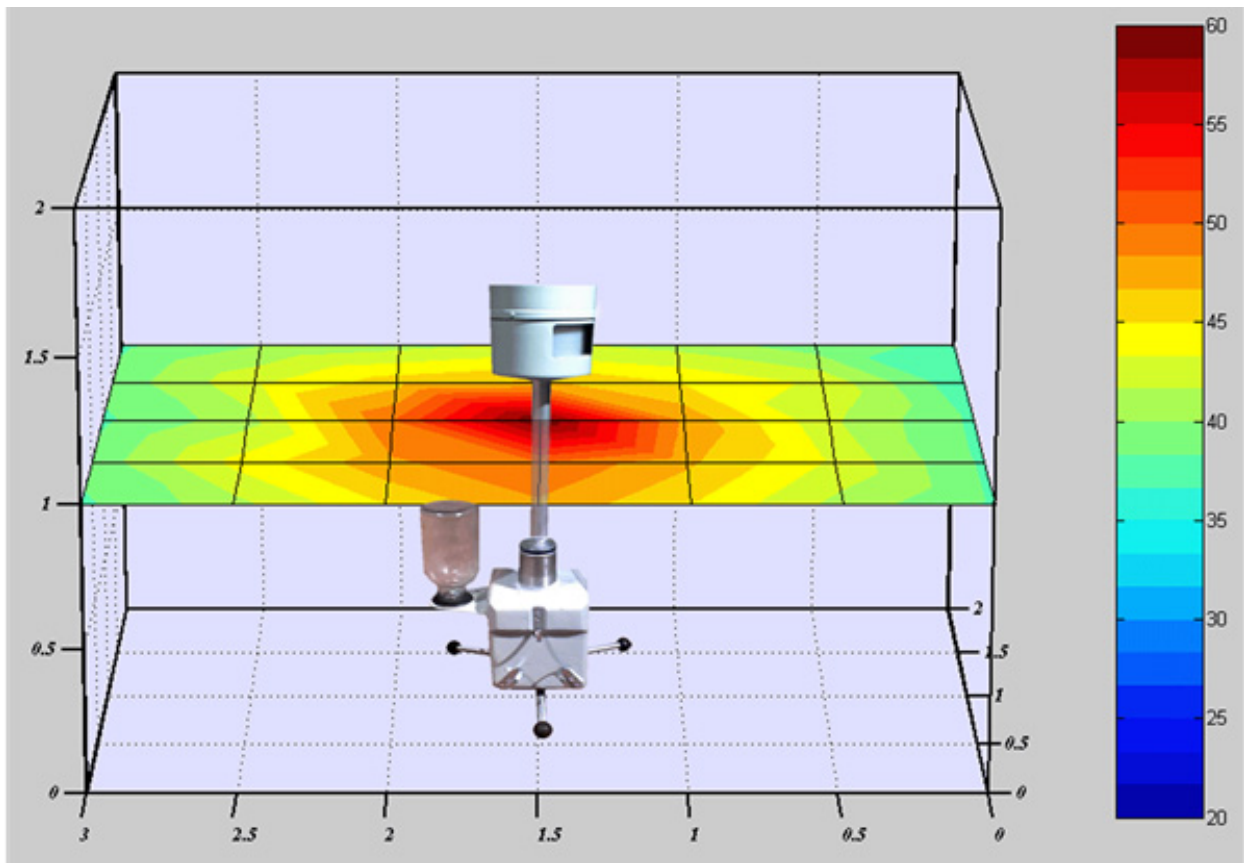


Рис. 9. Распределение звукового давления на частоте 100 Гц при отсутствии компенсирующего сигнала

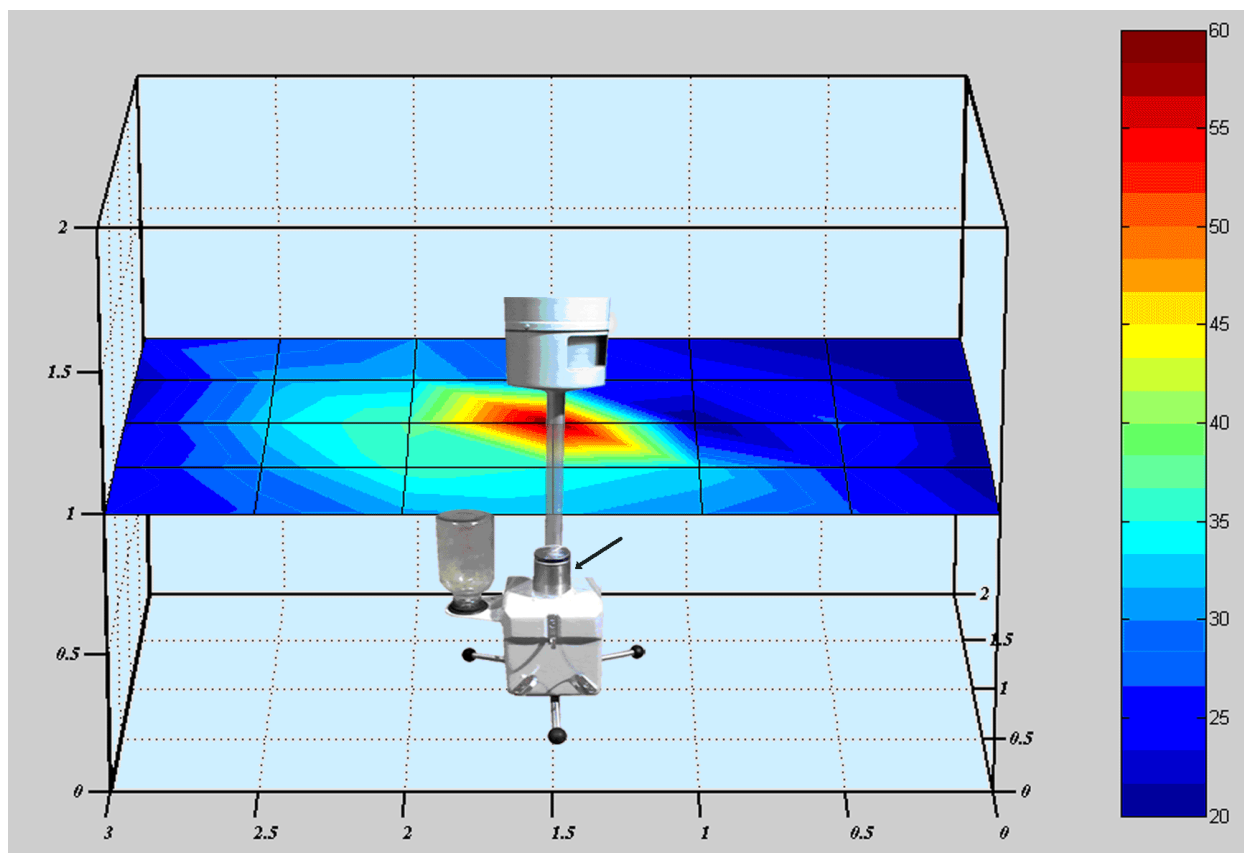


Рис. 10. Распределение звукового давления на частоте 100 Гц при наличии компенсирующего сигнала

На рис. 9 показано распределение звукового давления при отсутствии компенсирующего сигнала, на рис. 10 – при наличии. Место установки компенсирующего излучателя показано стрелкой.

Несимметричность распределения остаточного поля вызвана тем, что начальная настройка системы проводилась по критерию минимального сигнала в области расположения датчика опорного сигнала (правая сторона кожуха).

При реализации САГ шума электрических асинхронных машин в шпиндельном исполнении в качестве опорного сигнала невозможно использовать датчик вибрации, поскольку в данном случае шум имеет аэродинамическую природу и никак не коррелирован с вибрациями на кожухе.

Также, несмотря на высокую долговременную стабильность частоты лопаточной составляющей, в качестве опорного нельзя использовать сигнал от генератора, поскольку из-за аэродинамических эффектов акустический сигнал имеет значительные биения по амплитуде со случайной огибающей (рис. 11).

Как можно заметить амплитуда биений превышает 10 дБ за время менее 20 мс.

При такой нестационарности входного сигнала применение адаптивных систем активного гашения неэффективно, поскольку даже при применении современных средств цифровой обработки и быстрых алгоритмов настройки такие системы обладают примерно на порядок большим временем адаптации.

Высокая стабильность частоты лопаточной составляющей дает возможность организовать управление при построении САГ шума асинхронного двигателя по

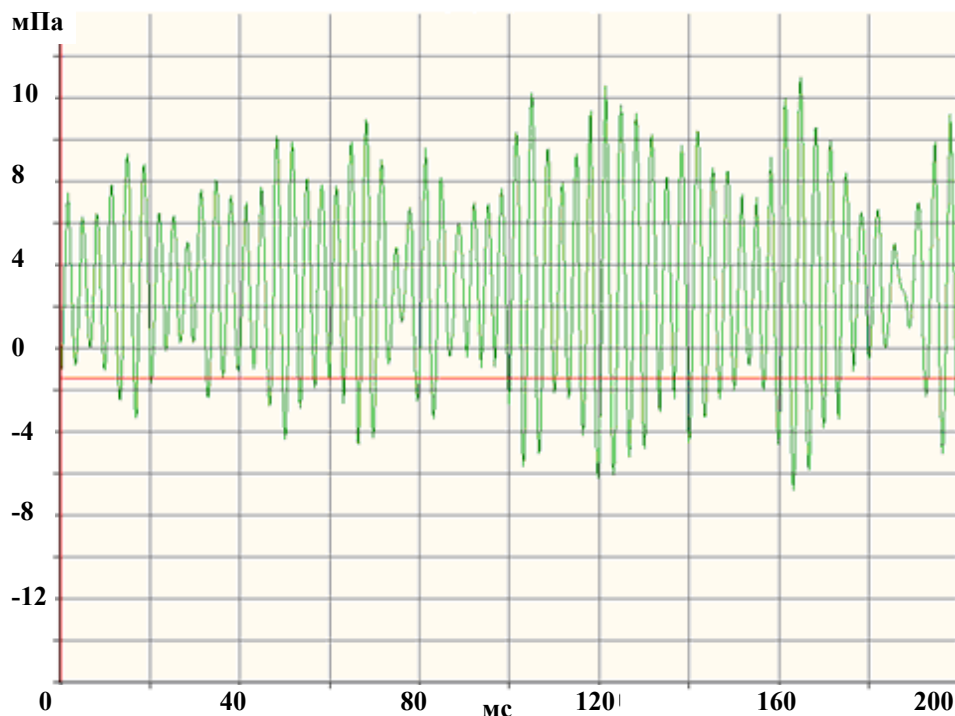


Рис. 11. Временное представление лопаточной составляющей (применен полосовой третьоктавный фильтр с центральной частотой 500 Гц)

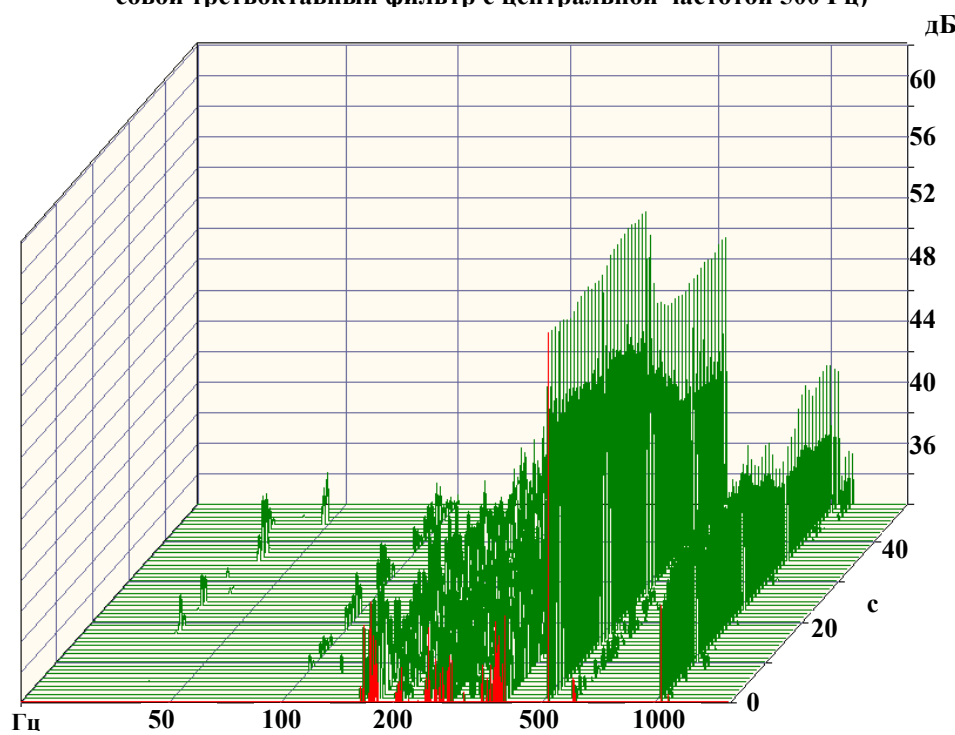


Рис. 12. Изменение спектра шумового сигнала при включении компенсирующего источника

неадаптивной схеме с управлением по возмущению и опорным микрофоном.

Для устранения влияния волновой обратной связи был использован опорный микрофон с узкой диаграммой направленности и узкополосный полосовой фильтр с шириной полосы 1% и центральной частотой

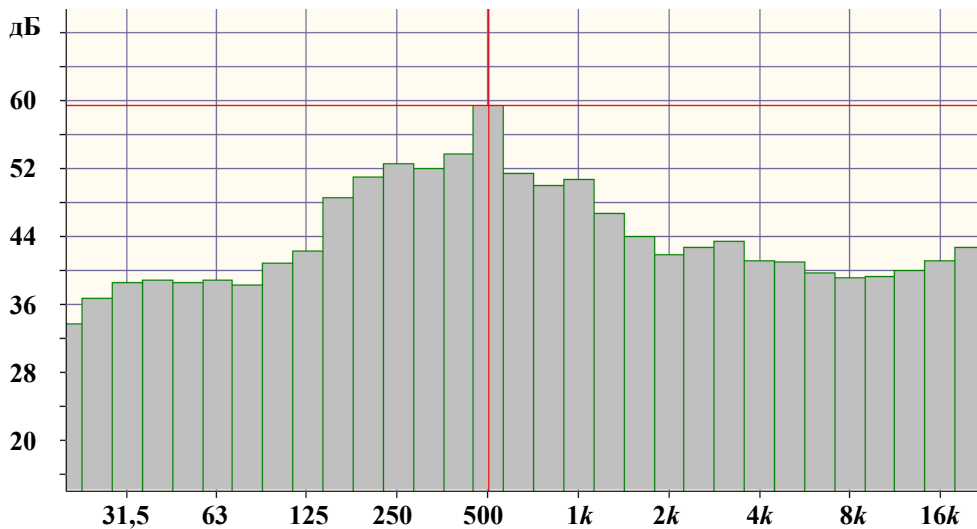


Рис.13. Спектр шума асинхронной машины без САГ в третьоктавных полосах

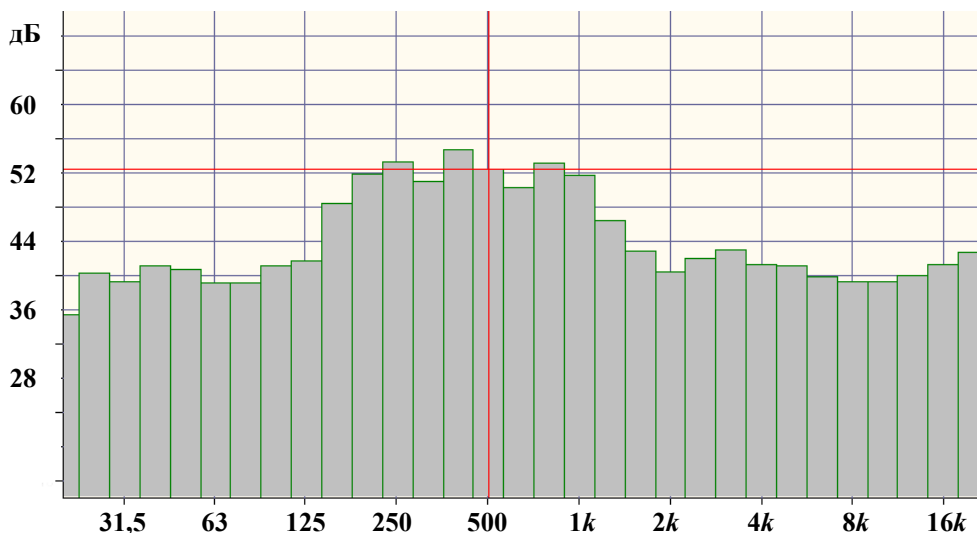


Рис.14. Спектр шума асинхронной машины с САГ в третьоктавных полосах

525 Гц. Конструктивно компенсирующий излучатель располагался на защитной сетке двигателя непосредственно над вентилятором. После выделения лопаточной составляющей сигнал подвергается фазовому сдвигу, усиливается и выводится на излучатель.

Результаты эксперимента по подавлению лопаточной составляющей приведены на рис. 12 – 14.

Как можно заметить в ходе эксперимента, эффективность гашения на частоте 525 Гц составляет более 10 дБ. Достигнутая эффективность гашения отличается высокой временной стабильностью. В пределах третьоктавных полос эффективность гашения составляет 7 дБ (рис. 13–14).

Пространственная структура остаточного звукового поля на частоте 525 Гц в режиме активного

гашения отличается высокой однородностью. Флуктуации интенсивности не превышают 4 дБ.

По результатам проведения экспериментальных исследований разработанных вариантов САГ с моделью передаточной функции и САГ с управлением по возмущению можно сделать следующие выводы:

- с учетом характеристик рассмотренных объектов управления применение активных методов весьма эффективно. Эффективность гашения в области НЧ на отдельных частотах превышает 10 дБ при высокой временной стабильности снижения шума;
- эффективность снижения общего невзвешенного уровня звукового давления в режиме активного гашения составляет 3 – 6 дБ при высокой пространственной однородности остаточного шумового поля;
- при невысокой стоимости реализации предложенные в работе методы построения неадаптивных САГ с моделью объекта управления позволяют строить на их основе эффективные системы активного гашения шума медицинского и промышленного оборудования.

Литература

1. Kristensen S.H. Active Noise Cancellation in Headsets Aalborg University. Institute of Electronic Systems. Applied Signal Processing and Implementation. Technical Report – 1998.
2. Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family. Application Report. Texas Instruments. – 1996.
3. Лизунов С.Д. Силовые трансформаторы: справочная книга / С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

Станислав Григорьевич Семенцов, канд. техн. наук,
ст. научный сотрудник, т. 365-50-00, e-mail: vniiem@vniiem.ru.