

Санг Гон Ча, А. Г. Трошин

*SQ-инжиниринг, Дрим Билдинг, 160-11 Гарак-донг, Сонг-Па-гу, Сеул, Южная Корея,  
e-mail: [atroshin@yahoo.com](mailto:atroshin@yahoo.com)*

## Снижение дорожного шума активными барьерами в Южной Корее. Часть I: Предварительная оценка шума и проектирование электроакустического аппаратного обеспечения

*Получена 13.01.2011, опубликована 16.03.2011*

В настоящее время проблема транспортного шума в квартирах и частных домах является очень актуальной в Южной Корее и требует решения. В данной статье выполнен анализ уровней транспортного шума вблизи транспортных магистралей. На основе анализа частотных составляющих шума сформулированы требования к системе активного гашения шума с помощью активных барьеров. Проанализированы характеристики активных компенсирующих громкоговорителей, предварительных усилителей для микрофонов и характеристики системы цифровой обработки сигналов (ЦОС) с формулировкой предложений по проектированию системы. Требуемые технические характеристики электроакустических элементов системы, а именно активных громкоговорителей и предусилителей, а также необходимые конструкторские решения подтверждены экспериментальной проверкой разработанных прототипов.

Ключевые слова: шумозаглушающие барьеры, уровни шума, активный контроль шума, активные громкоговорители, платформа ЦОС, адаптивные алгоритмы

### ВВЕДЕНИЕ

Влияние транспортного шума на людей в местах проживания как, например, в частных домах или апартаментах является в настоящее время актуальной проблемой в Южной Корее, так как страна достаточно мала по площади, а плотность населения очень высока. Поэтому борьба с транспортным шумом путём оптимального планирования застройки и удалением зданий от дорог и скоростных магистралей является трудно реализуемой.

При этом интенсивность транспортного потока и количество единиц транспорта возрастает, а санитарные нормы по стандартным уровням шума в жилых домах требуют обеспечения общего уровня в 45 дБА в дневное время и 35 дБА ночью. Снижение воздействия транспортного шума возможно с использованием различных методов. Одним из таких методов является пассивная звукоизоляция, которая обеспечивается на низких частотах применением конструкций со значительным весом.

Также одним из методов борьбы с шумом транспорта является применение пассивных шумозащитных барьеров, которые достаточно широко используются в настоящее время в Южной Корее.

Источники транспортного шума имеют различные по своей природе компоненты: шум двигателя, шум выхлопа, взаимодействие шин с дорожным полотном и аэродинамический шум обтекания. Шум двигателя обуславливает низкочастотные составляющие спектра из-за вибраций двигателя и шума выхлопа, в то время как аэродинамический шум и шум от взаимодействия шин и дорожного полотна имеет стохастическую природу и формирует широкополосный спектр.

Для снижения низкочастотных компонент шума возможно применение активных методов в том числе и активных барьеров. Проведем обзор существующей технологии активного контроля шума. Теоретические основы для активных методов снижения шума были предложены Нельсоном и Эллиотом [1], а достаточное количество практических проектов было выполнено Хансеном и Снайдером [2]. Развитие алгоритмов цифровой обработки сигналов для активных методов контроля шума была выполнена Сен-Куо и Морганом [3]. Сочетание активных и пассивных методов снижения шума в глушителе позволяет снизить шум от систем вентиляции на 10...20 дБ в диапазоне 50...400 Гц [4]. Идея применения активного метода контроля шума для создания локальной зоны тишины в квартире была предложена и опубликована Сен-Куо и Эндюри в [5].

В Германии были проведены исследования по применению методов активного контроля шума для повышения эффективности звукоизоляции окон [6], [7]. Исследованы характеристики систем контроля шума, основанные на методах управления с обратной связью и на методах управления по входному воздействию.

Технология активного контроля шума может быть применена и для создания так называемой акустически мягкой границы вдоль шумозащитного барьера, чтобы увеличить его эффективность в диапазоне низких частот. Примеры практического применения активных барьеров приведены в публикациях [8]–[12].

Следует отметить, что активные методы контроля шума, как и любая другая технология, имеют свои преимущества и недостатки. С использованием активных методов можно не применять тяжелые и громоздкие конструкции для снижения низкочастотного шума. Эффективность же активных методов может быть очень высокой как для тональных, так и для широкополосных компонент шума. Некоторые авторы публикуют результаты, показывающие эффективность активных систем снижения шума от 20 до 40 дБ.

Недостаток или ограничение технологии активного контроля связаны с частотным диапазоном или, иными словами, с размерами длины акустической волны и сложностью первичного акустического поля. Типовое значение граничной частоты разделения методов на пассивные и активные составляет 500...1000 Гц.

В действительности, чтобы выполнить реконструкцию акустического поля расстояние между компенсирующими громкоговорителями не должно превышать

размера половины длины волны. Однако с увеличением частоты длина волны становится короче, и число компенсирующих громкоговорителей и каналов управления увеличивается. Это усложняет контроль и обслуживание, а также увеличивает общую стоимость системы.

В первой части статьи будут рассмотрены и обсуждены следующие исследовательские и конструкторские задачи: исследование частотных компонент транспортного шума, формирование общих требований к аппаратному обеспечению цифровой обработки сигналов (ЦОС), проектирование компенсирующих громкоговорителей и проектирование предусилителей для микрофонов опорного сигнала и сигнала ошибки.

## 1. АНАЛИЗ ДОРОЖНОГО ШУМА

Необходимо провести анализ частотных компонент шума, чтобы обнаружить наличие интенсивных низкочастотных составляющих в спектре, при отсутствии которых субъективно слышимая эффективность активной системы на низких частотах в соответствии с законом Флетчера-Монсона будет очень мала. Для этого был выполнен частотный анализ транспортного шума вблизи дорог. Результаты анализа представлены на рис. 1.

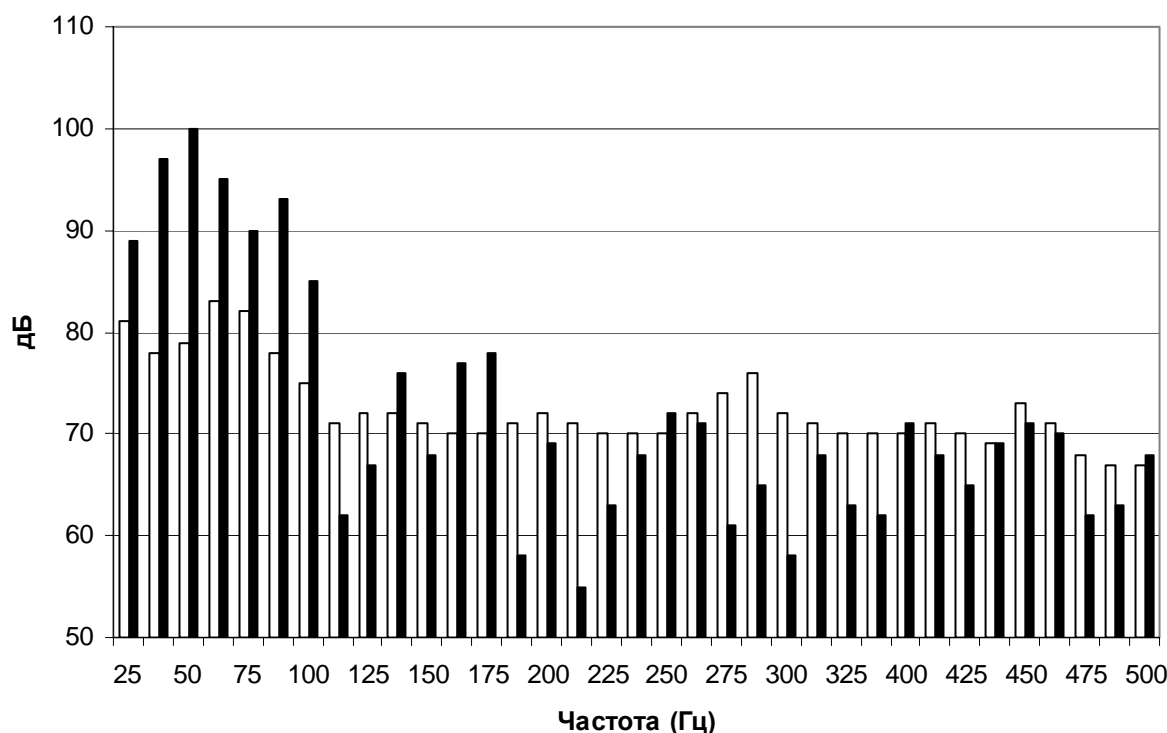


Рис. 1 Спектр транспортного шума с разрешением 1/24 октавы:

Черный цвет – высокоскоростная магистраль, расстояние 1 м от полотна дороги, асфальтовое покрытие, движение 8 полосное, тяжелые грузовики и автобусы, г. Чхонан.  
Белый цвет – высокоскоростная магистраль, расстояние 1 м от полотна дороги, асфальтовое покрытие, движение 6 полосное, легковые автомобили, г. Кымчон

Выполняя анализ уровней транспортного шума можно сделать вывод, что в низкочастотном диапазоне присутствуют низкочастотные составляющие в критических полосах частот 25...100 Гц, 125 Гц...175 Гц, 225 Гц...300 Гц, 250 Гц...325 Гц и 450 Гц. Используя эти данные можно сделать заключение, что компенсирующие громкоговорители должны иметь, по крайней мере, стандартную чувствительность в диапазоне 90...100 дБ на 1 Ватт электрической мощности, так как необходимо обеспечить воспроизведение анти шума с теми же уровнями что и уровни источника для обеспечения деструктивной интерференции двух волн: акустической волны источника и волны, генерируемой компенсирующим громкоговорителем. Кроме этого, чтобы обеспечить долговременную надежность, активные компенсирующие громкоговорители должны иметь запас как по акустической, так и по электрической мощности при их непрерывной и долговременной эксплуатации в составе системы. [16]

## 2. ФОРМУЛИРОВКА ТРЕБОВАНИЙ К АРХИТЕКТУРЕ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ШУМА

Применяя активные методы, в общем случае мы имеем дело с трехмерным акустическим полем за исключением простых случаев шума, например, вентилятора в воздуховоде и активных головных телефонов, когда акустическое поле одномерно. Существует несколько конструкторских задач, которые требуют решения при промышленном применении технологии активного снижения шума. Кратко их можно перечислить следующим образом:

- где следует установить компенсирующие громкоговорители?
- где следует установить микрофоны ошибки?
- если предполагается использовать алгоритм управления по входному воздействию, где следует установить опорные микрофоны?
- какой метод управления следует использовать: с обратной связью, управление по входному воздействию или комбинированный метод?
- какой из алгоритмов наиболее эффективен в полевых условиях?
- какую платформу Цифровой Обработки Сигналов (ЦОС) предполагается использовать?

Проблемы указанные выше будут рассмотрены во второй части статьи.

## 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ

### 3.1. Общие требования к системе ЦОС активного контроля шума

Рассмотрим общие требования к параметрам системы ЦОС для активного контроля шума. Эти параметры следующие: частота дискретизации, число коэффициентов адаптивного фильтра, задержки сигнала в электроакустическом тракте и в системе ЦОС.

Из теоремы Котельникова-Шеннона (теорема отсчетов) известно, что частота дискретизации должна быть минимум в два раза выше наивысшей частоты исследуемого спектра сигнала. Однако Витариус и соавторы [13] публикуют результаты исследования, свидетельствующие о том, что для более точного восстановления сигнала необходимо, чтобы частота дискретизации была в 4 раза выше.

Для более точного представления импульсной характеристики  $h(\tau)$  распространения сигнала от опорного микрофона до микрофона ошибки необходимо выполнить следующее равенство:

$$\delta T_{pp} = N \cdot f_s, \quad (1)$$

где  $\delta T_{pp}$  — время распространения сигнала от опорного микрофона до микрофона ошибки,  $N$  — число коэффициентов адаптивного фильтра,  $f_s$  — частота дискретизации.

Для более длинного пути распространения сигнала следует выбирать более высокую частоту дискретизации, чтобы уменьшить число коэффициентов фильтра и вычислительную нагрузку на процессор. Время для обработки и вычисления коэффициентов адаптивного фильтра можно оценить по формуле

$$\delta T_{dsp} = (N - 1) / 2 f_s. \quad (2)$$

Следует также упомянуть так называемую проблему причинности, которая заключается в том, что суммарная величина задержек в электронных компонентах и электроакустических звеньях системы должна быть меньше, чем время распространения сигнала от опорного микрофона до микрофона ошибки. Это условие можно записать как:

$$\delta T_{adc} + \delta T_{dsp} + \delta T_{dac} + \delta T_{speaker} + \delta T_{power\_amp} < \delta T_{pp}, \quad (3)$$

где  $\delta T_{adc}$  — задержка сигнала в АЦП,  $\delta T_{dsp}$  — задержка сигнала на время вычисления процессором,  $\delta T_{dac}$  — задержка сигнала в ЦАП,  $\delta T_{speaker}$  — задержка сигнала в электроакустической системе громкоговорителя,  $\delta T_{power\_amp}$  — задержка сигнала в усилителе мощности.

Проблема с задержкой, обусловленной акустическим аппаратным обеспечением, может быть решена с применением алгоритма FxLMS, предложенного Сен Куо и Д. Морганом [3]. При этом в процессе подачи в систему тестового сигнала определяется задержка, которая компенсируется самим алгоритмом. Таким образом, неравенство (3) можно переписать как

$$\delta T_{adc} + \delta T_{dsp} + \delta T_{dac} < \delta T_{pp}. \quad (4)$$

Для сведения к минимуму члена  $\delta T_{adc} + \delta T_{dac}$  в неравенстве (4) следует применять аудио кодеки (АЦП/ЦАП) с минимально возможной групповой задержкой. Проблема причинности в акустическом смысле может быть также выражена как

$$\frac{1}{f_s} < \frac{L}{c}, \quad (5)$$

где  $f_s$  — частота дискретизации,  $L$  — длина пути распространения сигнала от опорного микрофона до микрофона ошибки,  $c$  — скорость звука.

Последнее неравенство означает, что время выборки сигнала  $t_s = 1/f_s$  должно быть существенно меньше времени распространения сигнала  $\delta T_{pp}$  от опорного микрофона до микрофона ошибки.

### 3.2. Микрофоны и предусилители

Характеристики системы активного контроля шума также существенно зависят от качества опорного сигнала. Поэтому опорный микрофон следует размещать как можно ближе к источнику шума. Но для движущегося источника в системе активных барьеров такое условие невыполнимо. Поэтому целесообразно располагать опорные микрофоны за барьером со стороны движения транспорта.

Аналоговые предусилители для микрофонов должны обеспечивать кондиционирование сигнала: согласование импедансов, преобразование несимметричного сигнала в стандарт парафазного аудио сигнала и обеспечивать соответствующее усиление сигнала, чтобы передать по кабелю усиленный сигнал, так как опорный микрофон размещается на определенном расстоянии от блока сигнального процессора ЦОС. Пример схемы разработанного авторами предусилителя для электретного микрофона и его практическая реализация приведены на рис. 2. Усилитель обеспечивает усиление 20 дБ в диапазоне частот 20 Гц...1 кГц, имеет напряжение питания от  $\pm 5$  В до  $\pm 15$  В и оборудован балансным выходом.

Следует также принять во внимание стоимость микрофонов и предусилителей. Так как система должна быть многоканальной из-за значительной протяженности барьеров, то необходимо проанализировать возможность применения относительно недорогих микрофонов, применяемых в слуховых аппаратах или мультимедийных устройствах, а не дорогих образцов, используемых на дискотеках, концертах и в индустрии звукозаписи.

Целесообразно использовать электретные микрофоны, так как они обеспечивают плоскую частотную характеристику в диапазоне от 20 Гц до 1 кГц. Этот диапазон частот и представляет наибольший интерес для активных систем гашения шума. Необходимо также учесть при проектировании системы влияние факторов окружающей среды на микрофоны и громкоговорители, таких как температура, дождь и влажность, так как в Южной Корее из-за особенности климата диапазон температур достаточно широк, при этом ярко выражен сезон интенсивных муссонных дождей.

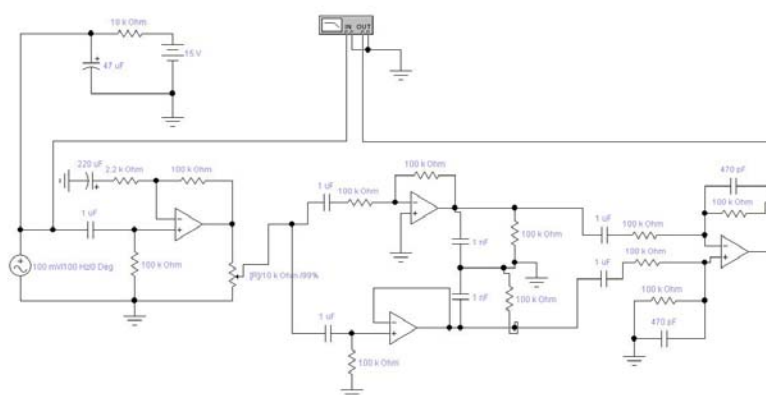


Рис. 2. Пример схемы микрофонного предусилителя низкой ценовой категории (5\$...10\$) и его практической реализации

### 3.3. Активные компенсирующие громкоговорители

Компенсирующий сигнал генерируемый сигнальным процессором должен быть усилен и излучен громкоговорителем. Несмотря на большое количество моделей громкоговорителей на современном рынке аудиотехники, их непосредственное применение в системах активного контроля шума проблематично. Для уличной системы активного контроля шума необходимы специфические требования, такие как устойчивость к снегу и дождю. Другое требование к громкоговорителю — возможность долговременного генерирования уровней звукового давления 90...100 дБ относительно 20 микропаскалей. Кроме этого, нижняя граничная частота генерируемого громкоговорителем звука должна быть не ниже 40...50 Гц.

Большинство недорогих мультимедийных сабвуферов не обеспечивают указанных характеристик, а высокоэффективные низкочастотные громкоговорители класса Hi-End очень дороги. Поэтому следует уделить специальное внимание проектированию компенсирующего громкоговорителя.

Зная параметры Тиля-Смолла для головки прямого излучения, возможно рассчитать необходимый объем закрытого ящика. Описание метода измерения указанных параметров с использованием двухканального Фурье-анализатора и кривой электрического импеданса громкоговорителя приведено в работе [13]. Зная измеренные параметры головки, такие как эквивалентный объем  $V_{as}$ , частоту резонанса  $f_s$  и общую добротность  $Q_{ts}$  головки, можно определить нижнюю граничную частоту громкоговорителя, объем ящика и подъем АЧХ в низкочастотном диапазоне. Результаты измерения параметров головок громкоговорителей моделей №128 и 1240 и расчета эквивалентного объема приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений головок громкоговорителей

Номер модели головки громкоговорителя	128	1240
Диаметр, см	27	27
Коэффициент гармонических искажений (Кг)	0.3% (–50 дБ)	1% (–40 дБ)
Чувствительность головки громкоговорителя, дБ/Ватт·м	96	98
Частота резонанса головки, $f_s$ , Гц	33	45
Расчетное значение объема ящика $V_b$ , л	33	37
Эквивалентный объем $V_{as}$ , л	23	13

Схема стандартного усилителя мощности низкой ценовой категории приведена на рис. 3, а конструкция разработанного и изготовленного прототипа активного громкоговорителя с использованием данного усилителя показана на рис. 4. Дополнительный источник двухполярного питания малой мощности в схеме усилителя мощности  $\pm 15$  В может быть использован для питания микрофонного предусилителя.

Усилитель обеспечивает коэффициент усиления 31 дБ в диапазоне частот 20 Гц...1 кГц. Выходная мощность 50 Ватт на нагрузке 8 Ом с коэффициентом нелинейных искажений 0.07%. Максимальное входное напряжение 1 В СКЗ.

Частотная характеристика одного из прототипов громкоговорителя, изготовленного согласно сформулированным в статье требованиям, приведена на рис. 5 и 6.

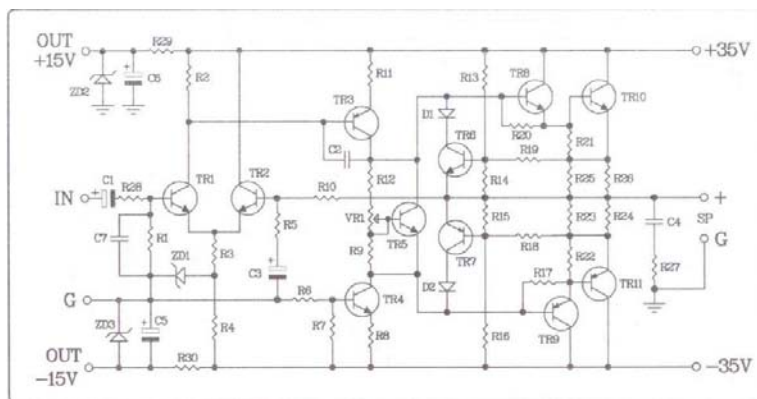


Рис 3. Схема стандартного усилителя мощности активного громкоговорителя низкой ценовой категории (~15 \$)



Рис. 4. Внешний вид изготовленного прототипа активного компенсирующего громкоговорителя

Можно видеть из рис. 5 и рис. 6 что спроектированный прототип активного громкоговорителя системы активного контроля шума для барьеров обладает высокой чувствительностью достаточной для генерирования анти шума, и влияние дождезащитной крышки на его частотную характеристику минимально. Основываясь на результатах испытаний можно сделать выводы, что микрофонный предусилитель и компенсирующий громкоговоритель могут быть использованы в практических активных барьерах.

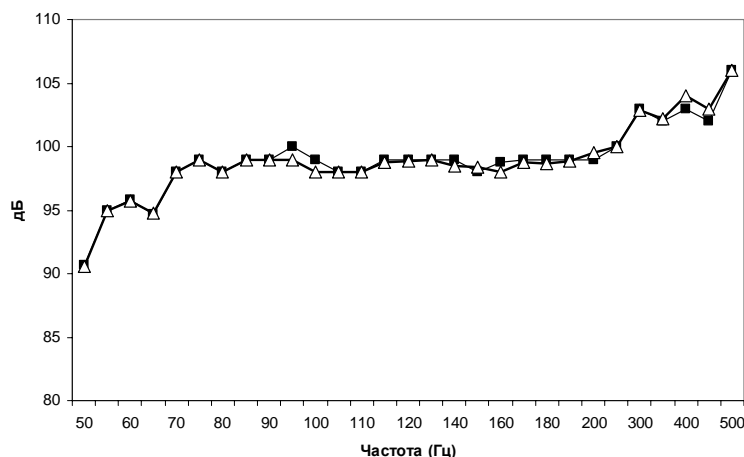


Рис. 5 Частотная характеристика прототипа активного громкоговорителя при входном напряжении 1 В СКЗ. Эффект влияния дождезащитной пластиковой крышки: прямоугольные маркеры — громкоговоритель без крышки, треугольные маркеры — громкоговоритель с крышкой

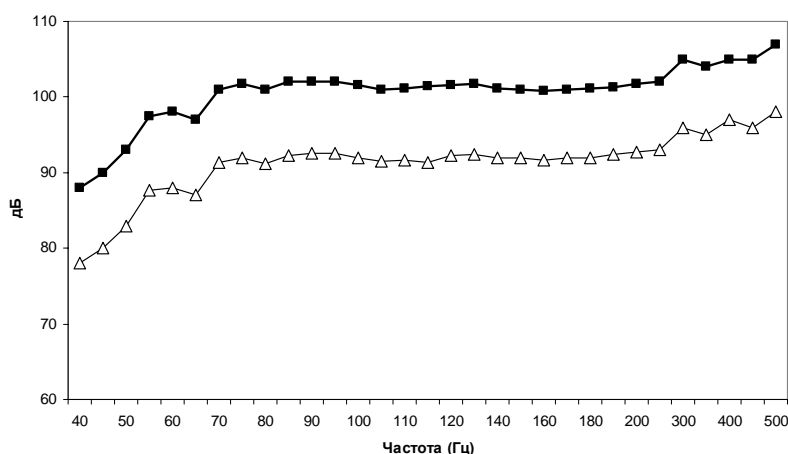


Рис. 6. Частотная характеристика прототипа активного громкоговорителя при входном напряжении: прямоугольные маркеры — входное напряжение 1 В СКЗ, треугольные маркеры — входное напряжение 0.3 В СКЗ

## ВЫВОДЫ

В результате проделанных исследований и экспериментов проанализирован шум транспортного потока, и определены уровни звукового давления и критические полосы частот, необходимые для проектирования компенсационных громкоговорителей системы активного гашения транспортного шума. Сформулированы общие требования к многоканальной системе цифровой обработки сигналов и технические и экономические требования к электроакустическим компонентам системы активного гашения шума транспортного потока: микрофонным предусилителям, активным громкоговорителям и системе ЦОС. Спроектированы, изготовлены и испытаны

двухканальный микрофонный усилитель с балансным выходом низкой ценовой категории и высокоэффективный недорогой компенсационный активный громкоговоритель с чувствительностью 90...100 дБ и полосой воспроизводимых частот 40...500 Гц. Экспериментально показано, что дождезащитная крышка оказывает минимальное влияние на чувствительность и АЧХ громкоговорителя. Спроектированные на начальном этапе опытно-конструкторской работы электроакустические компоненты системы соответствуют сформулированным техническим требованиям и могут быть использованы в активных шумозащитных барьерах, применяемых для снижения шума транспортного потока проникающего в жилые дома и апартаменты.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке по гранту код 09 Программы Инновационных Технологий в Строительстве, финансируемой Министерством Транспорта, Наземного и Морского развития правительства Республики Южная Корея.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nelson P. A., Elliott S. J. Active control of sound. Academic press, 1992.
- [2] Colin H. Hansen. Understanding active noise cancellation. Spon Press, London and New York, 2001. Active Noise Control, Primer.
- [3] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan. Active Noise Control System Algorithm and DSP implementations, John Wiley & Sons, 1996.
- [4] M. Larsson, S. Johansson, L. Håkansson, I. Claesson. A system implementation of an active noise control system combined with passive silencers for improved noise reduction in duct. Fan Noise 2007, Lyon (France), 17-19 September 2007.
- [5] S. M. Kuo, R. K. Yenduri. Design of a quiet-comfort headboard. Consumer Electronics, ICCE '06. 2006, Digest of Technical Papers, 07/02/2006; DOI: 10.1109/ICCE.2006.1598372.
- [6] Andre Jakob, Michael Moser. Active control of double-glazed windows. Part I: Feedforward control. Applied Acoustics, (2003) 64, pp. 163-182.
- [7] Andre Jakob, Michael Moser. Active control of double-glazed windows. Part II: Feedback control. Applied Acoustics (2003) 64, pp. 183-196.
- [8] Feng Niu, Haishan Zou, Xiaojun Qiu, Ming Wu. Error sensor location optimization for active soft edge noise barrier. Journal of Sound and Vibration (2007) 299, pp. 409-417.
- [9] A. Omoto, K. Takashima, K. Fujiwara, M. Aoki and Y. Shimizu. Active suppression of sound diffracted by a barrier: an outdoor experiment. Journal of Acoustical Society of America, 1997, v. 102, pp. 1671-1679.
- [10] Akira Omoto, Daisuke Morie and Kyoji Fujiwara. Behavior of adaptive algorithms in active noise control systems with moving noise sources. (2002) Acoust. Sci. & Tech. 23, 2.
- [11] J. Yang W. S. Gan. On the actively controlled noise barrier. Journal of Sound and Vibration, 2001, v. 240(3), pp. 592-597.

- [12] Arthur P. Berkhoff. Control strategies for active noise barriers using near-field error sensing. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 118, No. 3, Pt. 1.
- [13] Christopher J. Struck. Determination of the Thiele-Small Parameters Using Two-Channel FFT Analysis. 1987 Brüel & Kjaer Instruments Hoffman Estates, Illinois.  
<http://www.bksv.com/doc/bo0202.pdf>
- [14] Paschal Minogue, Neil Rankin, Jim Ryan. Adaptively Canceling Server Fan Noise Principles and Experiments with a Short Duct and the AD73522 dsp converter, Analog Dialogue, Volume 34, Number 02, March, 2000
- [15] Patrick J. Vitarius, Don A. Gregory, John T. Wiley, Valentin Korman. Sampling rate error in acoustic measurements. Electronic Journal “Technical Acoustics”,  
<http://www.ejta.org>, 2006, 7.
- [16] Colin H Hansen. Sensors and actuators for active noise control systems. ANVC Group School of Mechanical Engineering, University of Adelaide, SA 5005.