

УДК 725.812

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-105-118

Ю.И. ИСАКОВ,
Новосибирский государственный университет
архитектуры, дизайна и искусств им. А.Д. Крячкова,
ООО «Ямаха Мюзик»

ВИРТУАЛЬНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА ФИЛАРМОНИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗВУКОВЫМ ПОЛЕМ

Рассмотрены актуальные решения по изменению акустических параметров многоцелевых зрительных залов для симфонической и академической музыки без архитектурной реконструкции или полной перестройки. Проанализированы старые аналоговые и современные системы с цифровой обработкой звуковых сигналов, использующих технологии активного управления звуковым полем. Рассмотрен опыт инсталляции системы активного управления звуковым полем AFC3 в Большом зале Тюменской филармонии. Представлены графики структур ранних отражений, полученные в результате компьютерного акустического моделирования Большого зала. Приведены результаты контрольных измерений, подтверждающие эффективность решений. Собственное время реверберации зала – 1,1 с. С системой AFC3 время реверберации можно изменять до 2,65 с. Кроме того, в Тюменской филармонии, впервые в России, построена электронная оболочка глубинно-колосниковой сцены, позволившая улучшить акустические условия музыкантов.

Ключевые слова: архитектурная акустика; компьютерная акустическая модель; электронная архитектура; активное управление звуковым полем; электронная оболочка сцены.

Для цитирования: Исаков Ю.И. Виртуальная акустическая реконструкция архитектуры зрительного зала филармонии на основе технологии активного управления звуковым полем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 105–118.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-105-118

Yu.I. ISAKOV,
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts,
ООО “Yamaha Music”

VIRTUAL ACOUSTIC RECONSTRUCTION OF THE GREAT HALL OF THE TYUMEN PHILHARMONIC ARCHITECTURE BASED ON ACTIVE FIELD CONTROL

The paper focuses on changes in the acoustic parameters of multi-purpose audience space for symphonic music without architectural and complete reconstruction. Old analog and modern systems with digital signal processing are analyzed using active field control (AFC). The AFC3 system from Yamaha, Moscow, Russia, installed in the Great Hall of the Tyumen Philharmonic is considered. The diagrams of early reflections are obtained by computer acoustical simulation of the Great Hall. The control measurement results confirm the effectiveness of the proposed solutions. The intrinsic reverberation time is 1.1 s. The AFC3 system provides the increase in the reverberation time up to 2.65 s. For the first time in Russia, the electronic

shell is constructed for the fly-loft stage in the Tyumen Philharmonic, that allows improving the acoustical conditions for musicians.

Keywords: architectural acoustics; computer-assisted acoustic model; electronic architecture; active field control; electronic shell.

For citation: Isakov Yu.I. Virtual'naya akusticheskaya rekonstruktsiya arkhitektury zritel'nogo zala filarmonii s ispol'zovaniem tekhnologii aktivnogo upravleniya zvukovym polem [Virtual acoustic reconstruction of the Great Hall of the Tyumen Philharmonic architecture using active field control]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 6. Pp. 105–118.

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-105-118

Введение

В XX в. было распространено строительство типовых многоцелевых зрительных залов. Сейчас такие зрительные залы перестали отвечать современным социально-культурным запросам, и возникла необходимость реконструировать или перестраивать их. Но даже удачная перестройка филармонического зрительного зала под симфоническую музыку требует решения проблем с остальными жанрами. С одной стороны – хоровая и органная музыка, с другой – эстрадная популярная музыка. Эти задачи решают механические системы изменения архитектурной акустики (Йордан В.Л. Акустическое проектирование концертных залов и театров. Москва: Стройиздат, 1986. С. 32), но это очень сложные и дорогостоящие системы.

Другой путь, с более позитивным результатом, выдерживающий аспекты экономических обстоятельств, – это использование технологии активного управления звуковым полем (АУЗП). Поэтому изменение акустических параметров существующих зрительных залов без реконструкции или полной перестройки является актуальной задачей. Для архитекторов, которые занимаются проектированием, перестройкой и реконструкцией зрительных залов в этом направлении, в статье сделан краткий обзор существующих сегодня технологий АУЗП и описан опыт инсталляции системы активного управления звуковым полем AFC3 в Большом зале им. Ю. Гуляева в Тюменской филармонии.

1. Понятие и основные характеристики звукового поля

Известно, что под звуковым полем понимается область пространства распространения звуковых волн. На параметры звукового поля зрительного зала влияет форма ограждающих поверхностей, их поглощающие или отражающие свойства, а также взаимное расположение источников и приемников звуковых волн.

Для каждого жанра (симфония, опера и т. д.) существует оптимальное значение времени реверберации, которое также зависит и от объема зрительного зала¹. Время реверберации RT_{60} – это теоретически расчетное время затухания энергии звукового сигнала 0 до –60 дБ, после выключения источника или измеренное по кривой затухания энергии на участке 10 дБ (от –5 до

¹ СНиП 23-03–2003. Защита от шума. Москва: Госстрой России, 2004. С. 32.

–15 дБ), 20 дБ (от –5 до –25 дБ) и 30 дБ (от –5 до –35 дБ) и умноженное соответственно на $6 = T_{10}$, на $3 = T_{20}$ и на $2 = T_{30}$. Более поздние исследования XX столетия показали, что время реверберации является основным критерием, но недостаточным для хорошего звучания зала. Основные эксперты в оценке качества звучания зала – это слушатели и музыканты. Новые акустические параметры зрительного зала сформировались благодаря более глубокому анализу слухового восприятия человеком – психоакустике. Вот некоторые из них. Сила звука G – это ощущение увеличения громкости звучания, например, оркестра в зале по сравнению с безэховым пространством. Индекс прозрачности музыки S_{80} – это возможность расслышать каждую ноту в партитуре и др. В 80-х гг. прошлого столетия были исследованы акустические условия музыкантов на сцене, и к параметрам зрительного зала добавились параметры сцены. Индексы поддержки сцены $ST_1(ST_{Early})$ и $ST_2(ST_{Late})$ характеризуют акустические условия исполнения в ансамбле и ощущения объемности звучания музыкального инструмента. В настоящее время важность перечисленных выше параметров поддержана многими учеными в мире, и поэтому они вошли в стандарт. Подробное описание параметров и методик их измерений приведено в ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 «Акустика, измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы».

2. Электроакустические системы активного управления звуковым полем

Мечта скорректировать акустику помещения возникла практически сразу, как только были созданы первые студийные микрофоны и громкоговорители. Но поскольку это был конец 30-х гг. прошлого столетия, то решение этой задачи стало возможным только после Второй мировой войны. Кроме того, некоторые восстановленные после войны значимые для мировой культуры театры и концертные залы потеряли свою превосходную акустику. Стало актуальным найти решения по улучшению акустики без изменения архитектуры.

В 1950-е гг. исследования в этой области проводились во многих странах. Одна из первых систем совершенствования акустики была запатентована фирмой Philips. Принцип получил название амбиофония. В амбиофонической системе микрофоны, находящиеся на сцене, воспринимали как прямой звук, так и ранние отражения от ограждающих поверхностей сцены, затем эти сигналы усиливались, суммировались и подавались на магнитофонную линию задержки, с выходов которой сигналы подавались на группы разноудаленных от сцены громкоговорителей. Сегодня такая система может считаться очень грубой, но в 1959 г. эта система была восхитительной. Она применялась в нескольких залах Европы и даже в знаменитом театре Ла Скала в Милане [1].

В России усовершенствованная амбиофоническая система применялась в Кремлевском дворце съездов. Структура системы была дополнена реверберационной камерой, внутри которой помещался громкоговоритель и микрофон, сигнал которого подмешивался к сигналам задержек для улучшения временной структуры реверберации. Звукорежиссер мог оперативно управлять параметрами звукового поля. Время реверберации изменялось от 1,5 до 3,0 с на средних частотах [2, с. 74–79].

Основная проблема аналоговых амбиофонических систем – это непостоянство параметров. Невозможно было произвести регулировку и сохранить все параметры настройки в памяти системы. Поэтому всегда должен был работать высококвалифицированный звукооператор, который регулировал электроакустические параметры системы и во время репетиций, и во время концерта на слух. Цифровая обработка звуковых сигналов привела к скачку в качественных характеристиках аудиосистем. Построение DSP (цифрового сигнального процессора) позволило использовать алгоритмы обработки звуковых сигналов в реальном времени, недоступных в аналоговых приборах. Благодаря цифровой обработке звуковых сигналов аудиосистемы достигли качества, соизмеримого с психоакустическими возможностями человека. Цифровая обработка звуковых сигналов стала базой для создания алгоритмов АУЗП зрительного зала, основанных на архитектурной акустике, психоакустике и информатике. Такие системы стали называть «электронной архитектурой» [3]. А главное, в цифровых системах появилась возможность сохранять в памяти процессоров настройки, которые мог переключать сам дирижер без звукооператора. Новые технологии управления звуковым полем являются продолжением архитектурной акустики или ее составной частью, как виртуальные ограждающие поверхности с управляемыми акустическими параметрами. Следует отметить, что любые технологии активного управления звуковым полем способны виртуально лишь увеличить объем зрительного зала, увеличить время реверберации, увеличить количество отражений.

Существуют различные технологии АУЗП, построенные на базе цифровой обработки сигналов: линейная технология S-SF (синтез звукового поля) и технология с обратной связью A-SF (коррекция звукового поля), с применением или без алгоритмов искусственной реверберации [4, с. 64]. Технология S-SF позволяет синтезировать звуковое поле в помещениях, в которых реверберационное звуковое поле незначительно или отсутствует. Синтез такого поля осуществляется с помощью алгоритмов искусственной реверберации. Экстремальными примерами могут считаться концертная площадка на открытом воздухе (практически свободное звуковое поле) или кинотеатр («мертвая» акустика). Технология A-SF (коррекция звукового поля) построена на использовании обратной связи и называется регенеративной. Системы, использующие эту технологию, только подправляют существующую «живую» акустику помещения. Существуют системы, использующие обе технологии. Эти системы построены по регенеративной технологии A-SF, но в обработку сигнала добавлены алгоритмы искусственной реверберации, базирующиеся на математических методах свертки и КИХ-фильтрации, такие системы называют гибридными.

Очевидно, что гибридные системы более эффективны. Авторам известны две из них: А. Система Constellation (Созвездие), ранее имела название VRAS (Система изменяемой акустики помещения) от фирмы Meyer Sound. Б. Система AFC (Активное управление звуковым полем) от фирмы Yamaha.

В России система «Созвездие» от Meyer Sound установлена в Московском международном Доме музыки в Большом концертном зале им. Е.Ф. Светланова в 2013 г. В системе использовано около 100 микрофонов и 150 громкоговорителей [4, с. 67].

Если сравнивать системы, построенные по линейной технологии S-SF, и системы, построенные по технологии A-SF, то последние имеют очень точные настройки, которые в виде пресетов хранятся в памяти процессоров и не требуют вмешательства звукооператора. Переключать пресеты могут помощники режиссеров, члены музыкальных коллективов, дирижеры. Однако по желанию заказчика системы могут быть спроектированы так, что очень ограниченный перечень параметров может меняться оперативно, например степень влияния системы на акустику зрительного зала.

3. Технологии активного управления звуковым полем в Тюменской филармонии

Большой зал им. Ю. Гуляева Тюменской филармонии рассчитан на 1200 зрителей, которые располагаются в партере, на балконе, под балконом и в ложах. Зал имеет глубинную колосниковую театральную сцену с просцениумом. Результаты анализа объемно-планировочного решения Большого зала показали, что по параметрам он соответствует многоцелевому залу. При объеме зала $V = 5560 \text{ м}^3$ удельный объем на одного зрителя составляет $4,63 \text{ м}^3$, длина зала – 34 м. Практически весь репертуар зала – концертные программы со звукоусилением.

В 2015 г. был создан Тюменский государственный симфонический оркестр под управлением Евгения Ивановича Шестакова. С первых дней работы оркестра стало понятно, что плохие акустические условия затрудняют игру музыкантов даже на репетиции, когда зал не занят слушателями. Во время концерта оркестр звучит «сухо», хотя в составе оркестра очень талантливые музыканты. Причины – малое количество отражений на сцене и малое время реверберации.

Руководством филармонии рассматривались разные варианты улучшения звучания оркестра с помощью архитектурной акустики. Для сцены предлагалось использовать мобильную акустическую раковину. Трудности использования мобильной акустической раковины заключаются в том, что, во-первых, портал имеет ширину всего 13 м и высоту 7,95 м, что не позволяет применить стандартную акустическую раковину. Во-вторых, даже если применить акустическую раковину специальных размеров, то ее нужно часто собирать и разбирать из-за репертуара филармонии. В-третьих, еще одна проблема – хранение. Требуется довольно большой объем около сцены, но в филармонии нет театральных карманов сцены для хранения декораций.

Но еще большей проблемой является малое время реверберации в зрительном зале, которое без значительной реконструкции зала увеличить невозможно. Прежде всего, для симфонической музыки по нормам² требуется объем на одного зрителя 8–10 м^3 . Для 1200 зрителей это 9600–2000 м^3 , только тогда достигается оптимальное время реверберации $RT60 = 1,8\text{--}1,85 \text{ с}$ для заполненного зрителями зала.

3.1. Моделирование Большого зала Тюменской филармонии

Компьютерная модель существующего Большого зала была создана в программе EASE4.4. С помощью компьютерной акустической модели (рис. 1)

² СНиП 23-03–2003. Защита от шума. Москва: Госстрой России, 2004. С. 32.

анализировалось изменение параметров звукового поля со зрителями и без зрителей, структуры ранних отражений и оптимальное расположение громкоговорителей системы АУЗП.



Рис. 1. Компьютерная акустическая модель Большого зала Тюменской филармонии:
M1–M5 – контрольные места в зрительном зале для моделирования и измерений

В компьютерной модели использованы акустические параметры ограждающих поверхностей, близкие к тем, которые использованы в существующем зале. Значение времени реверберации $RT60$ на средних частотах, рассчитанное с помощью модели (табл. 1), намного меньше, чем требуется для симфонической музыки при количестве зрительских мест, равном 1200.

Таблица 1

**Время реверберации Большого зала в октавных полосах,
рассчитанное с помощью модели**

Центральная частота октавной полосы, Гц	250	500	1000	2000	4000	8000	500–1000
$RT60$ unpss, с без зрителей	1,24	1,13	1,07	1,01	0,96	0,72	1,10
$RT60$ oss, с со зрителями	1,14	1,03	0,95	0,87	0,85	0,65	0,99

В Большом зале филармонии используются мягкие кресла, поэтому время реверберации уменьшилось всего на 10 % при полностью заполненном зрителями зале. Поскольку в реальных условиях измерения проводятся без зрителей, то эти данные помогут рассчитать ожидаемое время реверберации в заполненном зрителями зале.

Технологии АУЗП позволяют улучшить структуру ранних отражений за счет добавления виртуальных отражений к существующим. Даже симулируя отражения первого порядка, мы получаем дополнительные отражения второ-

го, третьего и больших порядков от существующих ограждающих поверхностей в конкретном зрительном зале. С помощью модели проанализируем структуру ранних отражений ER с первого по третий порядок на месте M1 за период 100 мс (рис. 2) при расположении эталонного всенаправленного источника на оси симметрии сцены на глубине 2,5 м от края сцены и на высоте 1,5 м от планшета сцены. Добавив всего один дополнительный излучатель, симулирующий отражение первого порядка ER+1, мы получаем дополнительные отражения второго и третьего порядка и увеличиваем в целом суммарную энергию ранних отражений. По технологии АУЗП добавляется несколько излучателей, в описываемой системе используется 12 громкоговорителей, расположенных по правой и левой сторонам зала. В результате симуляции отражений первого порядка с помощью 12 громкоговорителей получаем значительное повышение энергии ранних отражений ER+12 второго и третьего порядка на контрольном месте M1.

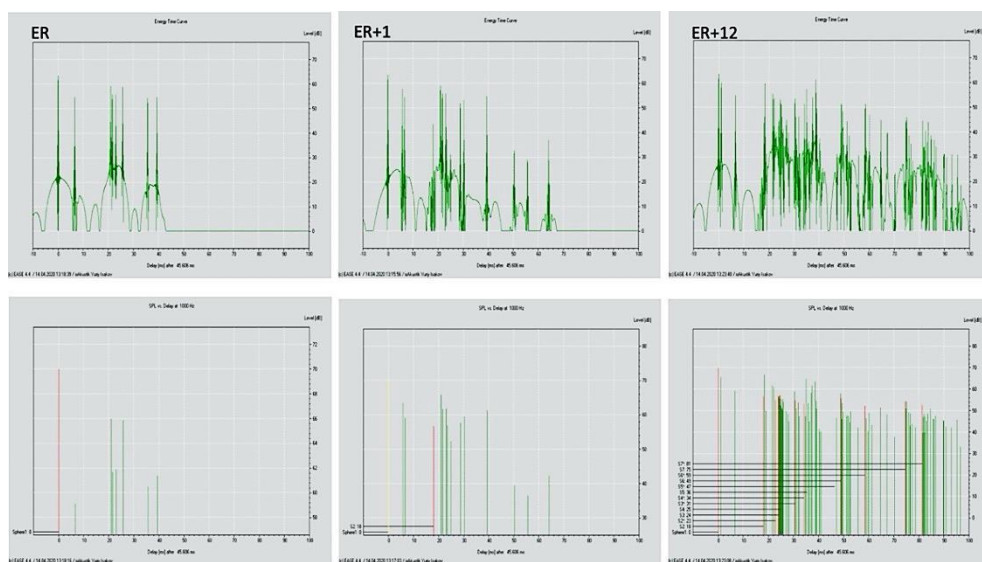


Рис. 2. Структура ранних отражений на контрольном месте M1

На разных местах в зрительном зале звуковое поле имеет различные параметры. Поэтому проанализированы структуры ранних отражений (рис. 3) на месте M2 – ближе к боковой стене, M3 – место под балконом, M4 – ближе к центру балкона, M5 – ближе к боковой стене балкона (рис. 1).

Анализируя структуру ранних отражений до третьего порядка на контрольных местах в зрительном зале, мы обнаруживаем бедность собственных отражений зала. Симуляцией отражений первого порядка с помощью технологии АУЗП удастся значительно обогатить ранние отражения на любых зрительских местах в зале.

Для оценки эффективности электронной оболочки сцены проанализируем структуру ранних отражений на сцене: с мягкой одеждой сцены, с акустической раковиной, с мягкой одеждой сцены, но с электронной оболочкой сце-

ны (рис. 5). Для сравнения используем одни и те же контрольные точки SM1, SM2, SM3, SM4 (рис. 4) и временной интервал 100 мс. В дальнейшем измерения параметров $ST1(ST_{Early})$ и $ST2(ST_{Late})$ будут проводиться в этих же контрольных точках. Для оценки структуры ранних отражений на расстоянии 1 м от каждой контрольной точки на высоте 1,5 м от планшета сцены располагается эталонный всенаправленный источник звукового сигнала.

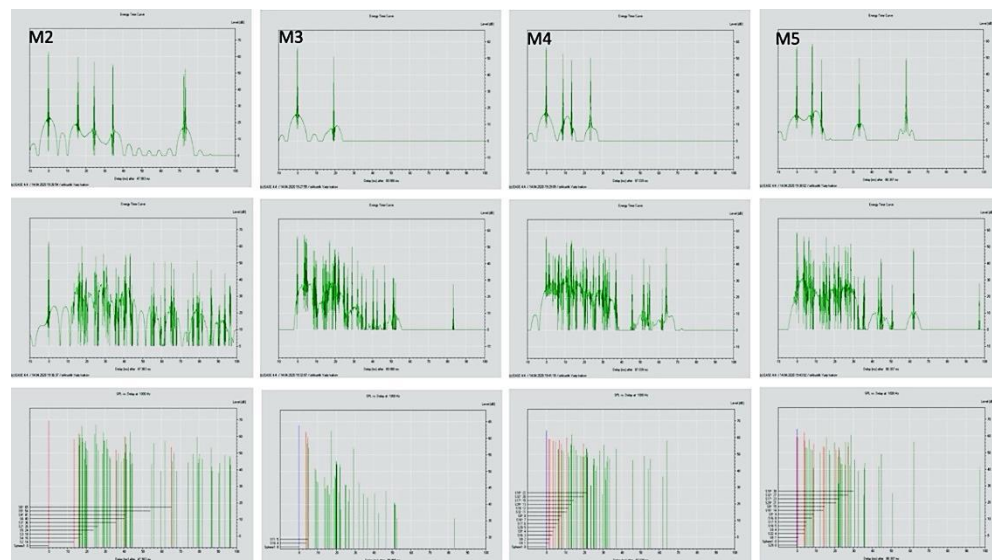


Рис. 3. Структура ранних отражений на контрольных местах M2, M3, M4, M5: верхний ряд – энергия ранних отражений в существующем зале; средний ряд – энергия ранних отражений с системой АУЗП; нижний ряд – красным отмечены сигналы громкоговорителей системы, симулирующие отражения первого порядка

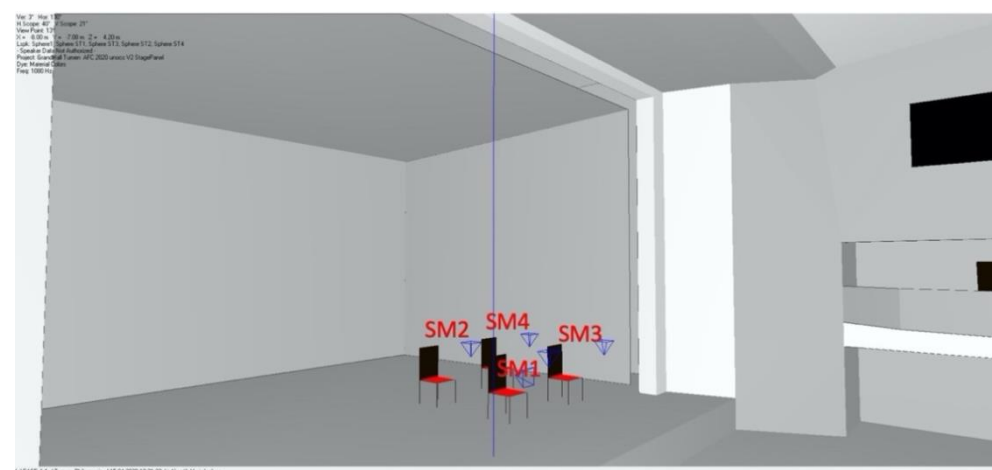


Рис. 4. Модель сцены с акустической раковиной: SM1, SM2, SM3, SM4 – контрольные точки

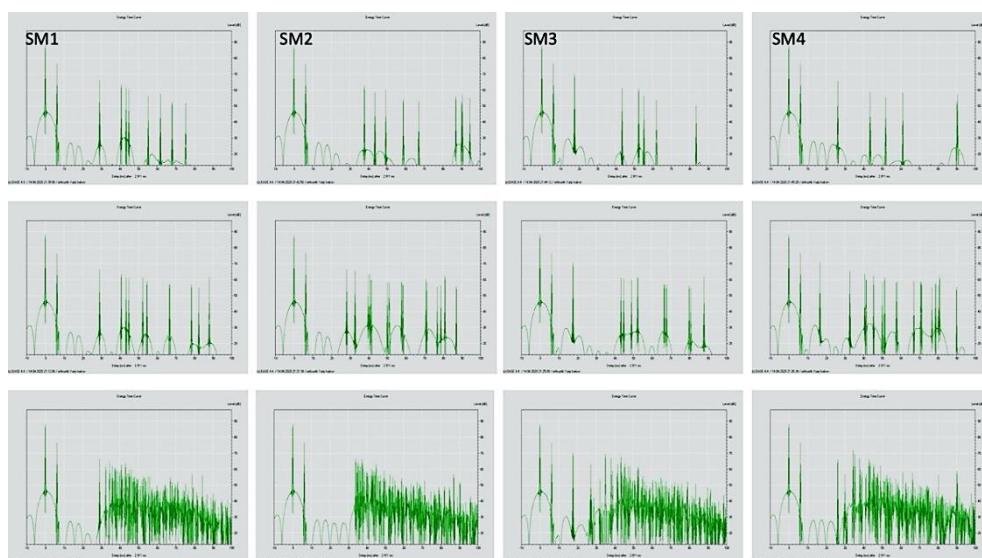


Рис. 5. Структура ранних отражений на сцене в контрольных точках SM1, SM2, SM3, SM4: верхний ряд графики энергии отражений на сцене с мягкой одеждой; средние графики – с акустической раковиной на сцене; нижний ряд графиков – с мягкой одеждой сцены и с электронной оболочкой

Очевидно, что акустическая раковина благоприятно меняет энергию и структуру ранних отражений на сцене, но также видно, что это изменение более существенно при работе электронной оболочки сцены (рис. 5).

Дополнительно электронная оболочка позволяет изменять высоту виртуальной раковины. Однако время прихода первых отражений зависит от высоты расположения микрофонов и громкоговорителей над планшетом сцены, и, следовательно, виртуальная раковина не может быть ниже реальной высоты их расположения. Графики структуры отражений показывают, что наиболее эффективно будет скорректирован параметр $ST2(ST_{Late})$ – объемность звучания музыкальных инструментов.

С учетом вышеизложенное было принято решение использовать для изменения акустических параметров Большого зала Тюменской филармонии систему AFC3. Цифра означает использование третьего поколения процессоров для систем AFC фирмы Yamaha. Система уже зарекомендовала себя во многих залах мира. За период с 1985 г. по настоящее время установлено уже более 150 систем [5, с. 69].

3.2. Что такое AFC?

Основной принцип работы системы – это управление звуковым полем на основе технологии A-SF, или регенерации – акустической обратной связи (рис. 6). Такой принцип позволяет улучшить существующую акустику в зале, сохраняя натуральность звучания.

В базовой системе AFC используется 4 микрофона, 4 основных канала обработки и множество независимых выходных каналов, которые заканчива-

ются громкоговорителями, расположенными на потолке и стенах в зрительном зале [5]. Количество выходных каналов и громкоговорителей зависит от размеров зала.

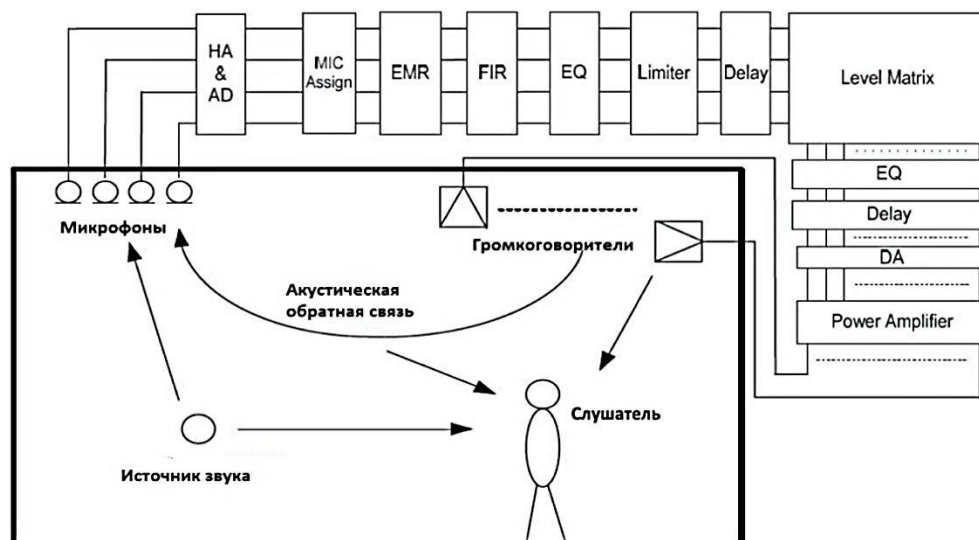


Рис. 6. Общая схема базовой системы AFC. Т. Watanabe [5]

Основными алгоритмами обработки звукового сигнала, отличающими систему AFC от всех систем других производителей, являются блоки EMR и FIR. EMR – электронный «вращатель» микрофонов – блок, который позволяет поочередно подключать к каждому каналу обработки все четыре микрофонных сигнала, но в каждый момент времени только один микрофонный сигнал подключен к одному каналу. Основная задача – усреднение звукового поля в области расположения микрофонов и в области зрителей. Применение такого метода позволяет также иметь дополнительный запас устойчивости системы к самовозбуждению 4 дБ [6, с. 123–125]. В каждом основном канале применяется цифровая обработка с помощью FIR-фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Зал, акустически представленный в виде фильтра КИХ более чем 16 000 порядка, можно подправить с помощью коэффициентов фильтра, которые вычисляются в этом же зале при настройке системы. Вот почему систему AFC можно считать продолжением архитектурной акустики. В разных условиях может применяться несколько систем AFC одновременно. В больших залах используются самостоятельные системы для сцены, для зрительских зон партера, балкона и под балконом.

3.3. Описание системы AFC3 Большого зала Тюменской филармонии

Проблемы архитектурной акустики зрительного зала Тюменской филармонии было предложено решить с помощью системы АУЗП AFC3 Yamaha, состоящей из четырех подсистем: подсистемы электронной оболочки сцены, подсистемы управления реверберацией зрительного зала, подсистемы улучшения

ранних отражений в партере, подсистемы улучшения акустических условий зрителей под балконом, на балконе и в ложах. Всего использовано 5 процессоров третьего поколения AFC3-64, 80 громкоговорителей, 80 каналов усиления и 12 микрофонов. Все активные компоненты объединены в локальную сеть Dante. При настройке системы были учтены пожелания заказчиков создать пресеты акустических параметров для разных жанров, а не только для симфонического оркестра. Переключение настроек акустических параметров осуществляется с помощью настенной панели управления. Использовано две панели, одна панель расположена около сцены, которой пользуется инспектор оркестра. Другая – на месте звукорежиссера.

4. Результаты измерений акустических параметров Большого зала Тюменской филармонии с учетом системы AFC3 Yamaha

После настройки системы были измерены параметры звукового поля зрительного зала, на сцене и в зоне зрителей, при выключенной системе и при включенной системе в разных режимах. Параметры измерялись для двух размеров сцены – большой и камерной. Камерная сцена отличается тем, что задний занавес располагается на половине глубины большой сцены. Параметры измерялись на тех же контрольных местах зрительного зала, что и в компьютерной акустической модели. В качестве источника звука использовался додекаэдр и усилитель итальянской фирмы Outline. Источник звука был установлен в центре сцены на расстоянии 2,5 м от края сцены и на высоте 1,5 м от планшета сцены.

Все измерения проводились в незаполненном зрителями зале. Измерения времени реверберации в Большом зале филармонии (табл. 2) проводились без системы и с системой, работающей в разных режимах.

Таблица 2

Результаты измерения времени реверберации в Большом зале без системы и с системой AFC3 (с разрешения ООО «Ямаха Мюзик» Россия)

Пресет (высота виртуаль- ной оболочки сце- ны) (Назначение)	Время реверберации T_{20} (с) в октавных полосах (Гц) без зрителей						T_{20} (с) без зрителей	T_{20} (с) со зрителями (расчет)	Режим сцены
	250	500	1000	2000	4000	8000	500–1000		
Choral (7 м) (Хор)	2,83	2,60	2,70	2,58	1,93	1,24	2,65	2,39	Большая сцена
Organ (10 м) (Орган или брасс- ансамбль)	2,85	2,58	2,65	2,52	1,95	1,21	2,62	2,36	
Symphonic Large (10 м) (Симфония, романтика)	2,71	2,33	2,47	2,38	1,69	1,20	2,40	2,16	

Окончание табл. 2

Пресет (высота виртуальной оболочки сцены) (Назначение)	Время реверберации T_{20} (с) в октавных полосах (Гц) без зрителей						T_{20} (с) без зрителей	T_{20} (с) со зрителями (расчет)	Режим сцены
	250	500	1000	2000	4000	8000	500–1000		
Symphonic General (7 м) (Симфония классика)	2,40	2,08	2,18	2,04	1,55	1,07	2,13	1,92	
OFF (Full-stage)	1,18	1,15	1,05	0,94	0,71	0,50	1,10	0,99	
Chamber (7 м) (Камерная музыка)	1,74	1,62	1,63	1,49	1,10	0,86	1,63	1,47	Камер- ная сцена
Theatrical (Театр)	1,39	1,35	1,37	1,13	0,82	0,53	1,36	1,22	
OFF (Half-stage)	1,15	1,08	1,08	0,95	0,72	0,53	1,08	0,97	

Результаты измерений показали, что собственное время реверберации Большого зала $T_{20} = 1,10$ с без системы на средних частотах при большой сцене и совпадает с расчетным R_{60} упосс (табл. 1). Это позволяет рассчитать значения времени реверберации T_{20} со зрителями. Таким образом, при включенной системе AFC3 можно изменять время реверберации T_{20} от 1,22 до 2,39 с на средних частотах в заполненном зрителями Большом зале в зависимости от выбранного пресета.

В результате субъективных экспертных оценок дирижера и музыкантов более комфортным для исполнения классической симфонической музыки, например, таких композиторов, как Моцарт, Гайдн, выбран режим Symphonic General с временем реверберации 1,92 с, что всего на 6 % больше оптимального и равен 1,85 с. Режим Symphonic Large с временем реверберации 2,16 с больше подходит для больших симфонических форм, в том числе для хора с оркестром и симфонической классики периода романтики.

В режимах Symphonic также измерялись значение силы звука G и индекс прозрачности музыки S_{80} . Измерения показали, что усредненное по зрительским местам значение силы звука G при включении системы AFC3 увеличивается на 1,3 дБ. При этом значение индекса прозрачности музыки S_{80} изменяется до 2,16 дБ в режиме Large и до 2,42 дБ в режиме General, что лучше для симфонической музыки, чем 5,26 дБ без системы.

Параметры $ST_1(ST_{Early})$ и $ST_2(ST_{Late})$ – акустическая поддержка сцены (табл. 3) измерялись в тех же контрольных местах на сцене, что и в модели. Измерения показали, что эффективность электронной оболочки больше для $ST_2(ST_{Late})$, что соответствует результатам моделирования.

Таблица 3

**Акустическая поддержка сцены Большого зала с системой AFC3
(с разрешения ООО «Ямаха Мюзик» Россия)**

Пресет (высота виртуальной оболочки сцены)	ST1(дБ)	Δ ST1(дБ)	ST2 (дБ)	Δ ST2(дБ)
Выкл.	-17,1	–	-21,1	–
Symphonic General (7 м)	-15,5	1,6	-18,4	2,7
Symphonic Large (10 м)	-15,0	2,1	-17,7	3,4

Заключение

Использование технологий активного управления звуковым полем (АУЗП) для изменения акустических параметров зрительного зала является распространённым решением в современном мире. Однако в России это единичные случаи, хотя опыт создания таких систем на основе аналоговых технологий был получен еще в 60-е гг. прошлого столетия.

Пример построения и эксплуатации системы AFC3 от корпорации Yamaha в Большом зале им. Ю. Гуляева Тюменской филармонии доказывает, что использование современных цифровых регенеративных технологий АУЗП для улучшения архитектурной акустики существующих многоцелевых залов актуально. Это решение позволяет добиться оптимальных параметров для симфонической и академической музыки без реконструкции или полной перестройки зала. Кроме того, появляется возможность изменять акустические параметры зрительного зала и сцены для разных жанров (эстрада, театр, камерная музыка, симфоническая, хоровая).

Очевидно, что любая реконструкция существующего многоцелевого зала для симфонической и академической музыки требует значительного времени и больше средств, чем инсталляция системы активного управления звуковым полем между сезонами. Но кроме экономической выгоды наиважнейшим является мнение зрителей и музыкантов. Новую акустику Тюменской филармонии уже положительно оценили известные в нашей стране музыканты и дирижеры: Екатерина Мечетина, Денис Мацуев [7], Фабио Мастранджело и, конечно, маэстро Евгений Шестаков, который отметил, что симфонический оркестр Тюменской филармонии в родном зале с системой AFC3 стал звучать на мировом уровне.

Авторы продолжают исследования по архитектуре зрительных залов с учетом использования технологий активного управления звуковым полем.

Авторы статьи выражают благодарность ООО «Ямаха Мюзик» Россия, Москва, Центру Театральных Технологий Сибири (Новосибирск) и руководству Тюменской филармонии за предоставленные материалы для статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ron Bakker. Active Acoustic Enhancement Systems – introducing Yamaha AFC3 – presentation at the 27th Ton Meister Tagung in Cologne, Germany, 23-11-2012.

2. Фурдуйев В.В. Стерефония и многоканальные звуковые системы. Москва : Энергия, 1973. С. 74–79.
3. Chuck McGregor. Electronic architecture: The Musical Realities of Its Application // Jaffe Acoustics, Inc. AES 6th international conference, May 5–8. Nashville, Tennessee, 1988.
4. Исаков Ю.И. Цифровая обработка звуковых сигналов в музыкальной акустике. Электроакустическая система активного управления звуковым полем // Вестник музыкальной науки. 2016. № 2 (12). С. 60–74.
5. Watanabe T., Miyazaki H., Ikeda M. Electronic Shell – Improvement of Room Acoustics without Orchestra Shell Utilizing Active Field Control // AES 140th Convention, June 4–7. Paris, France, 2016.
6. Анерт В., Райхардт В. Основы техники звукоусиления: пер. с нем. Москва : Радио и связь, 1984. С. 123–125.
7. Мацуев Д. Обновленный звук в Тюменской филармонии просто льется // Портал КТО Тюмени. URL: <https://tgf.kto72.ru/news/5070/>

REFERENCES

1. Ron Bakker. Active acoustic enhancement systems - introducing Yamaha AFC3. Presentation at the 27th Ton Meister Tagung in Cologne, Germany, 2012.
2. Furduev V.V. Stereofoniya i mnogokanal'nie zvukovie sistemi [Stereophonics and multichannel sound systems]. Moscow: Energiya, 1973. Pp. 74–79. (rus)
3. Chuck McGregor. Electronic architecture: The musical realities of its application. *Proc. AES 6th Int. Conf. 'Sound Reinforcement'*. Nashville, Tennessee, 1988.
4. Isakov Yu. Digital processing of audio signals in musical acoustics. Electroacoustic system of sound field active control. *Journal of Musical Science*. 2016. No. 2 (12). Pp. 60–74.
5. Watanabe T., Miyazaki H., Ikeda M. Electronic shell – improvement of room acoustics without orchestra shell utilizing active field control. AES 140th Convention. Paris, France, 2016.
6. Ahnert W., Reichardt W. Osnovy tekhniki zvukousileniya [Sound reinforcement engineering: Fundamentals and practice]. Moscow: Radio i svyaz', 1984. Pp. 123–125. (transl. from Germ.)
7. Matsuev D. Obnovlenniy zvuk v Tyumenskoi filarmonii prosto l'etsya [Modernized sound in the Tyumen Philharmonic]. Available: <https://tgf.kto72.ru/news/5070/>

Сведения об авторе

Исаков Юрий Иосифович, аспирант, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств им. А.Д. Крячкова, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, isakoustik@gmail.com; специалист по проектам ООО «Ямаха Мюзик» 121059, г. Москва, ул. Киевская, 7, подъезд 7, оф. 37, yuriy.isakov@music.yamaha.com

Author Details

Yurii I. Isakov, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture, Design and Fine Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia; Project Expert, ООО “Yamaha Music”, 7, Kievskaya Str., 121059, Moscow, Russia; yuriy.isakov@music.yamaha.com