

УДК 534.843.26

*Використовуючи існуючі методики розрахунку акустичних властивостей приміщень, був розроблений програмний модуль на Visual Basic для MS Excel. Розроблений модуль дозволяє автоматизувати розрахунок на різних стадіях проектування акустичних властивостей приміщень*

*Ключові слова: акустичні властивості приміщень, статистична теорія, програмне забезпечення, час реверберації*

*Используя существующие методики расчета акустических свойств помещений, был разработан программный модуль на Visual Basic для MS Excel. Данный модуль позволяет автоматизировать расчет на разных стадиях проектирования акустических свойств помещений*

*Ключевые слова: акустические свойства помещений, статистическая теория, программное обеспечение, время реверберации*

*Using existing methods of calculating the acoustic properties of space, was developed a software module in Visual Basic for MS Excel. The developed module allows you to automate the calculation at different stages of designing the acoustic properties of rooms*

*Keywords: acoustic properties of space, statistical theory, software, the reverberation time*

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОМЕЩЕНИЙ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

**В. В. Усик**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра технологии и автоматизации производства  
радиоэлектронных и электронно-вычислительных  
средств

Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166  
Контактный тел.: (057) 702-14-86  
E-mail: sergeev\_usik@ukr.net

**И. Г. Мягкий**

Главный инженер  
ООО «Мюзикленд»  
ул. Лермонтовская, 15, г. Харьков, Украина, 61024  
Контактный тел.: (057) 719-26-70  
E-mail: office@musicland.kharkov.ua

## 1. Введение

Целью разработки является создание программного обеспечения, позволяющего автоматизировать акустический расчет времени реверберации на всех октавных частотах для помещения с использованием статистической теории.

## 2. Статистическая теория акустических процессов в помещении

В архитектурной акустике большее внимание уделяется не стационарному процессу (процессу установившихся колебаний), а переходному (нестационарному), который начинается после прекращения действия источника звука и заключается в постепенном спаде звучания вследствие потерь звуковой энергии и называется отзвуком, или реверберацией.

Согласно литературным источникам [1-10] принято разделять процесс отзвука (реверберации) на две

части: начальные, достаточно редкие запаздывающие импульсы, и более уплотняющаяся во времени последовательность импульсов. Первая часть отзвука оценивается с позиций геометрической (лучевой) теории, вторая - с позиций статистической теории.

Статистическая теория является мощным и действенным инструментом исследования и проектирования помещений [1-6], поскольку дает числовые значения параметров, характеризующих акустику помещений.

Одной из основных целей акустического анализа является установление значений объективных критериев акустического качества зала, которые с определенной степенью надежности связаны с субъективными оценками слухового восприятия звуковых программ.

В соответствии с [7] субъективные оценки качества музыкальных залов зависят от ряда факторов, основными из которых является:

- гулкость, определяемая частотной характеристикой времени реверберации;

- диффузность звукового поля (однородность и изотропность), достаточно надежно определяемая характеристиками передачи.

Для оценки этих критериев для дальнейших проектных разработок необходимы надежные данные о параметрах и акустических свойствах, диапазон неопределенности которых по справочным данным весьма широк. Например, коэффициент дополнительного звукопоглощения неучтенных элементов интерьера (вентиляционными решетками, осветительной арматурой, воздушными полостями, щелями, трещинами и т.п.) меняется в пределах до  $\pm 30\%$ . Этот и другие параметры должны уточняться по данным натурных измерений проектируемого зала.

Рекомендуемое оптимальное время реверберации зависит от назначения и объема зала. В соответствии с [8-10] расчет оптимума  $T_{500}$  в секундах, для частоты 500 Гц аппроксимируется формулами:

- залы для ораторий и органной музыки

$$T_{500} = 0,60 \lg V - 0,2;$$

- залы для симфонической музыки

$$T_{500} = 0,50 \lg V - 0,2;$$

- залы для камерной музыки, залы оперных театров

$$T_{500} = 0,40 \lg V - 0,05;$$

- залы многоцелевого назначения, залы музыкально-драматических театров, спортивные залы

$$T_{500} = 0,37 \lg V - 0,1;$$

- лекционные залы, залы заседаний, залы драматических театров, кинозалы, пассажирские залы

$$T_{500} = 0,30 \lg V - 0,03;$$

- многоцелевые залы, оборудованные системами звукоусиления

$$T_{500} = 0,25 \lg V - 0,15;$$

где  $V$  – эффективный воздушный объем зала,  $m^3$ .

Основным критерием качества акустики зала является стандартное время реверберации  $T_c$  на всех октавных частотах, которое не должно отличаться от оптимального  $T_{опт}$  более чем на  $\pm 10\%$ .

Пределы допустимых отклонений от оптимума для среднегеометрических частот  $f$ , Гц, с учетом допуска  $\pm 10\%$  рассчитываются по формулам:

$$T_f^{min} = 0,9 k_f^{min} T_{500}, T_f^{max} = 1,1 k_f^{max} T_{500},$$

где  $k_f^{min}$  и  $k_f^{max}$  – минимальное и максимальное значения рекомендуемого отношения  $T_f/T_{500}$  для частоты  $f$ , Гц.

Для расчета стандартного времени реверберации, которое ожидается после реконструкции рассчитывается по формуле Эринга. Для частот до 1000 Гц:

$$T_c = -\frac{0,163 \cdot V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_{cp})},$$

или

$$T_c = -\frac{0,163 \cdot V}{S \cdot \phi},$$

где  $T_c$  – стандартное время реверберации, с;

$V$  – эффективный воздушный объем зала,  $m^3$ ;

$S$  – суммарная площадь ограждающих поверхностей зала,  $m^2$ ;

$\phi = -\ln(1 - \alpha_{cp})$  – функция, для упрощения расчета;

$\alpha_{cp}$  – средний коэффициент звукопоглощения внутренних поверхностей зала.

$$\alpha_{cp} = \frac{A_{общ}}{S},$$

$$A_{общ} = \frac{\sum \alpha_i S_i + \sum A_i \cdot N_i + \alpha_{доб} \cdot S}{S},$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент звукопоглощения поверхности;

$S_i$  – площадь поверхности,  $m^2$ ;

$A_i$  – эквивалентное звукопоглощение слушателей и кресел,  $m^2$ ;

$N$  – количество слушателей в креслах и пустых кресел;

$\alpha_{доб}$  – коэффициент добавочного звукопоглощения.

Для частот 2000 Гц и выше:

$$T_{\geq 2000} = -\frac{0,163 \cdot V}{(S \cdot \phi + n \cdot V)},$$

где  $n$  – коэффициент, учитывающий поглощение звука в воздухе, зависящий от относительной влажности воздуха, температуры и частоты при определенном атмосферном давлении.

Статистическая теория имеет свои недостатки, поэтому ее применение осуществляется с осторожностью.

Она не объясняет акустических процессов на очень низких и очень высоких звуковых частотах, в небольших и очень больших помещениях, в помещениях с резким преобладанием какого-то линейного размера, с неравномерным распределением звукопоглощающих материалов [4-6].

### 3. Основная часть

Методика оценки акустических свойств помещений включает в себя ряд рутинных, однообразных вычислений, которые при проведении их вручную отличаются большой трудоемкостью и затрачиваемым на расчет временем. При проектировании залов очень часто необходимо провести подбор нескольких вариантов отделки помещения, а также изменение каких-либо отдельных позиций в таблице отделки помещений в связи с выбором звукопоглощающих материалов с более высокой (низкой) стоимостью. С целью автоматизации акустического расчета нами был разработан программный модуль на языке Visual Basic для MS Excel.

Для запуска модуля необходимо выбрать кнопку «Акустический расчет» на листе MS Excel файла «Акустика» (рис. 1).

Программный модуль позволяет провести следующие операции.

1. Расчет рекомендуемого времени реверберации (рис. 2).

На основе вводимых данных об объеме и назначении помещения проводится расчет рекомендуемого времени реверберации  $T_{500}$ . Полученные значения отражаются в диалоговом окне и, при необходимости, в табличном виде на Листе 3 MS Excel.

2. Расчет времени реверберации при существующей отделке помещения и определение дополнительного фонда звукопоглощения.



№ п/п	Наименование материала	Площадь, м <sup>2</sup>	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м <sup>2</sup> на частотах:											
			125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц						
1	PLASTLIT, акустическая панель по проекту	183.64	0.02	3.71	0.02	3.71	0.03	3.57	0.04	7.43	0.04	7.43	0.03	5.37
2	НАКРД/СГТ, перегородка по проекту	128.19	0.04	4.03	0.04	4.03	0.07	4.48	0.06	7.37	0.06	7.27	0.07	6.48
3	WOODFLY К/Д, акустический брус по проекту	1.32	0.15	0.20	0.11	0.15	0.19	0.15	0.07	0.09	0.06	0.08	0.07	0.09
4	WOODFLY К/Д, акустический брус по проекту	33.97	0.15	3.10	0.11	3.74	0.19	3.40	0.07	2.38	0.06	2.04	0.07	2.38
5	Стекло, перегородка	26.73	0.35	9.36	0.25	6.68	0.18	4.81	0.12	3.21	0.07	1.87	0.04	1.07
6	Пол деревянный паркетный	2.37	0.04	0.09	0.04	0.09	0.07	0.17	0.06	0.14	0.06	0.14	0.07	0.17
7	НАКРД/СГТ, перегородка по проекту	155.56	0.25	36.79	0.10	15.52	0.05	7.76	0.04	6.21	0.07	10.86	0.07	10.86
8	ОГРБД К, гипсокартон 12 мм	4.74	0.04	0.19	0.04	0.19	0.07	0.33	0.06	0.28	0.06	0.28	0.07	0.33
9	НАКРД/СГТ, перегородка по проекту	331.22	-	62.28	-	34.93	-	30.61	-	27.01	-	29.97	-	29.97

Рис. 4. Результаты заполнения таблиц на примере акустического расчета камерного зала Харьковской областной филармонии

А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н
Объем зала = 585*1000 м <sup>3</sup>							
Рекомендуемое время реверберации							
Частота, Гц:		125	250	500	1000	2000	4000
Торт, с:		1.17	1.11	1.06	1.01	0.95	0.90
Определение требуемого звукопоглощения зала							
Общая эквивалентная площадь звукопоглощения							
Частота, Гц:		125	250	500	1000	2000	4000
Абсц., м <sup>2</sup>		85.53	73.18	85.40	87.01	91.47	91.47
Средний коэффициент звукопоглощения: аср=Абсц./Sобц							
Частота, Гц:		125	250	500	1000	2000	4000
аср:		0.16	0.14	0.16	0.16	0.17	0.17
Определение функции среднего коэффициента звукопоглощения							
Частота, Гц:		125	250	500	1000	2000	4000
f:		0.18	0.15	0.18	0.18	0.19	0.19
Время реверберации:							
T=0.163*V/Sобц*f(аср)							
Частота, Гц:		125	250	500	1000	2000	4000
T, с:		1.00	1.20	1.00	1.00	0.90	0.90

Рис. 5. Результаты расчетов акустики помещения камерного зала Харьковской областной филармонии



Рис. 6. График частотной зависимости времени реверберации для камерного зала Харьковской областной филармонии (границы по [5])

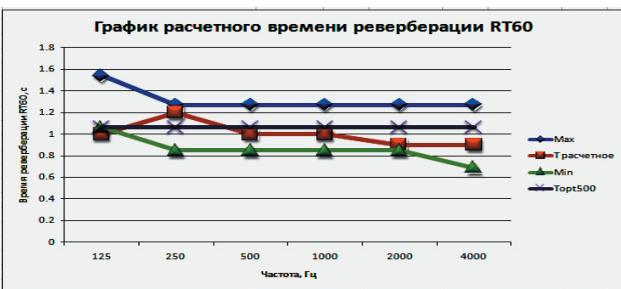


Рис. 7. График частотной зависимости времени реверберации для камерного зала Харьковской областной филармонии (границы по [1])

Для проверки достоверности полученных результатов акустического расчета было проведено моделирование камерного зала Харьковской областной филармонии в программе Ease 4.2 при 75% заполнении зрительного зала (рис. 8-9).

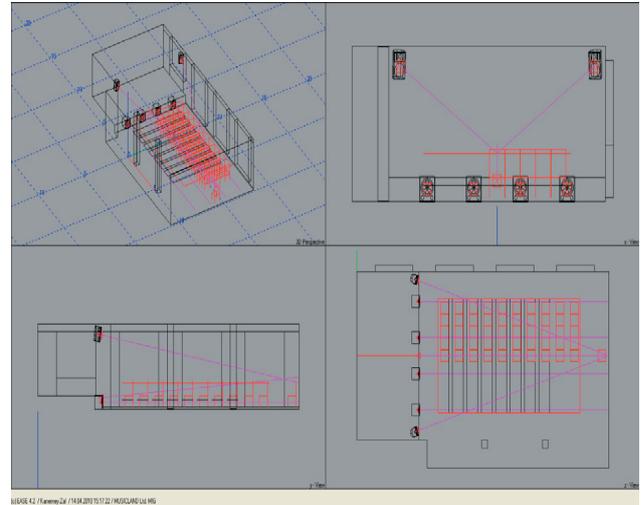


Рис. 8. 3D – модель камерного зала Харьковской областной филармонии, построенная в Ease 4.2

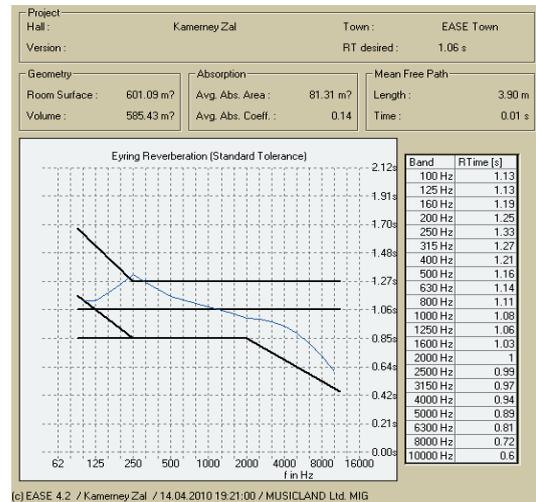


Рис. 9. Расчетное время реверберации RT60, полученное в Ease 4.2 при 75% заполнении зала слушателями камерного зала Харьковской областной филармонии

### Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить оценку акустики помещения при существующей отделке поверхностей («предпроектное» состояние), дает возможность получить необходимые показатели для дополнительного звукопоглощения, провести подбор и соответствующие расчеты для проектных предложений по отделке зала, получить рекомендуемые значения времени реверберации для залов с различными назначениями. Процесс расчета акустических свойств зала проводится в интерактивном режиме за достаточно короткий промежуток времени.

## Литература

1. В.Анерт, Ф.Штеффен. «Техника звукоусиления. Теория и практика». – Москва: «ПКФ»Лерушаа», 2003.
2. Йордан В. Л. «Акустическое проектирование концертных залов и театров». – Москва: Стройиздат, 1985.
2. Йордан В. Л. «Акустическое проектирование концертных залов и театров». – Москва: Стройиздат, 1985.
3. Макриненко Л. И. «Акустика помещений общественных зданий». – Москва: Стройиздат, 1986.
4. Ковригин С. Д. «Архитектурно-строительная акустика». – Москва: «Высшая школа», 1980.
5. Акустика: Справочник / под ред. М.А. Сапожкова. - М.: Радио и связь, 1989.
6. Фурдудев В.В. Акустические основы вещания. - М.: Связьиздат, 1960.
7. ГОСТ 24146-89. Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации. – М.: Госстрой СССР – 8 с.
8. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости/ НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1981. – 47 с.
9. Справочник по акустике/ Под ред. М.А. Сапожкова – М.:Связь, 1979. – 312 с.
10. Ковригин С.Д., Крышов С.И. Архитектурно-строительная акустика. – М.: Высшая школа, 1986. – 256 с.

*Представлено метод машинного синтеза дискретных коригующих фільтрів мінімального порядку для складних багатозв'язкових динамічних систем з виучуваною внутрішньою моделлю мінімального порядку в контурі керування. Наведено приклад реалізації методу*

*Ключові слова: синтез, ДКФ – дискретний коригуючий фільтр, ВМ – внутрішня модель*

*Представлен метод машинного синтеза дискретных корректирующих фильтров минимального порядка для сложных много-связных динамических систем с обучаемой внутренней моделью минимального порядка в контуре управления. Приведен пример реализации метода*

*Ключевые слова: синтез, ДКФ - дискретный корректирующий фильтр, ВМ - внутренняя модель*

*The method of machine synthesis of discrete approach-correcting filters of the minimum order for difficult multicoherent dynamic systems with trained internal model of the minimum order in a control loop is presented. The example of realisation of a method is resulted*

*Keyword: synthesi: DACF – discrete approach - correcting filter, IM - internal model*

УДК 681.51.015

# ЭТАПЫ МАШИННОГО СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

В.Г. Зотов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Контактный тел.: (057) 760-38-76

## 1. Введение

Традиционный подход к построению задачи синтеза корректирующих фильтров с внутренней моделью (ВМ) предполагает выбор ВМ точно отражающей основные свойства объекта управления (ОУ). В связи с этим, до недавнего времени, порядок ВМ выбирался равным порядку ОУ.

Задача в таком виде была чрезвычайно громоздка и формулировка целей проектирования усложнялась. В последнее время отмечено стремление исследователей к редуцированию дифференциальных уравнений, описывающих ВМ с сохранением качественных характеристик [1- 4]. При этом, естественно, ВМ все-таки вносит некоторые ошибки в систему за счет своей грубости.