

УДК 534.843.26

В.В. Усик

Національний технічний університет "ХПИ", Харків

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*В статье рассматриваются способы анализа акустических систем различного типа с использованием методов теории автоматического управления и применением программного обеспечения VisSim и Mathcad.*

**Ключевые слова:** акустическая система, передаточная функция, акустическое оформление, параметры Тила-Смолля.

### Введение

**Постановка проблемы.** Создание современных качественных акустических систем (АС) не проводится без решения следующих задач:

- исследования всех видов искажений, а соответственно и определения зависимостей между конструктивными решениями АС и ее акустическими, электрическими параметрами;
- моделирования звуковых полей синтезируемой или анализируемой АС;
- исследования влияния различных материалов и технологий создания элементов АС;
- оптимизации параметров конструкции АС с целью уменьшения искажений и улучшения линейных и энергетических характеристик звукового поля АС.

**Целью данного исследования является** использование методов теории автоматического управления для анализа и оптимизации параметров АС в НЧ области с применением программного обеспечения VisSim и Mathcad.

**Анализ достижений по теме исследований.** Получение математической модели акустической системы проводят с использованием метода электромеханической аналогии, что позволяет получить эквивалентную схему системы [1 – 3]. На основе полученной эквивалентной схемы проводится описание системы с помощью дифференциальных уравнений.

В зависимости от типа акустического оформления и вида разделительных фильтров получают математическое описание акустической системы [1-3]. Полученные уравнения позволяют получить передаточную функцию всей акустической системы или отдельных ее звеньев, исследовать частотные и временные характеристики акустической системы, оценить качество системы в переходном и стационарном режиме.

В современных акустических системах применяются методы электронной коррекции для формирования требуемых низкочастотных характеристик системы, снижения нелинейных искажений, увели-

чения звукового давления, развиваемого системой и т.д. Электронная коррекция осуществляется за счет введения электромеханической обратной связи, введения корректирующих звеньев (фильтров). Получение передаточных функций корректирующих звеньев позволяет оптимизировать параметры системы аналога и сравнить полученные частотные характеристики модели с реальными частотными и временными характеристиками. Использование методов анализа устойчивости и методов синтеза качественных систем автоматического управления позволяет получить желаемые параметры системы и, как следствие, провести необходимые конструктивные и технологические изменения в реальных или проектируемых АС.

Передаточные функции акустических систем с различным оформлением имеют вид дробно-рациональной функции и, в общем виде, могут быть представлены как

$$W(s) = W_A(s) \cdot W_k(s)$$

где  $W_A(s)$  – передаточная функция громкоговорителя в корпусе;  $W_k(s)$  – передаточная функция корректирующей цепи.

Закрытая акустическая система без корректирующей цепи описывается передаточной функцией второго порядка:

$$W_3(S) = \frac{A \cdot S^2}{\alpha_2 \cdot S^2 + \alpha_1 \cdot S + \alpha_0},$$

где  $A$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты, зависящие от параметров АС.

Фазоинверсная система без корректирующей цепи описывается передаточной функцией четвертого порядка:

$$W_\Phi(S) = \frac{B \cdot S^4}{b_4 \cdot S^4 + b_3 \cdot S^3 + b_2 \cdot S^2 + b_1 \cdot S + b_0}.$$

Закрытая система с корректирующим фильтром верхних частот первого порядка:

$$W_{3+k1}(S) = W_3(S) \cdot W_{k1}(S) = W_3(S) \cdot (S_1 / (S_1 + 1)).$$

Закрытая система с дополнительным корректирующим фильтром верхних частот второго порядка:

$$W_{3+k2}(S) = W_3(S) \cdot W_{k2}(S) = W_3(S) \cdot \frac{S_1^2}{d_2 \cdot S_1^2 + d_1 \cdot S_1 + d_0}$$

Фазоинверсная система с малыми потерями и с фильтром-корректором первого порядка в НЧ-области:

$$W_{\phi+k1}(S) = W_{\phi}(S) \cdot W_{k1}(S)$$

Фазоинверсная система с малыми потерями и с фильтром-корректором второго порядка в НЧ-области:

$$W_{\phi+k2}(S) = W_{\phi}(S) \cdot W_{k2}(S)$$

Коэффициенты передаточных функций проектируемой системы составляют вектор параметров, влияющий на форму частотных характеристик проектируемой акустической системы. Значение этого вектора зависит от параметров акустического оформления, используемых головок громкоговорителей, а также на вектор параметров влияют ограничения, продиктованные конструктивными или акустическими требованиями.

Проведение расчетов и дальнейший анализ системы вручную является достаточно трудоемкой задачей, а существующие программные продукты не дают возможности в реальном масштабе времени вмешиваться и изменять параметры. Таким образом, перед автором была поставлена задача создания расчетных моделей и виртуальных лабораторных стендов для проектирования и анализа акустической системы с заданными параметрами.

### Основная часть

Для создания расчетных модулей использовался MathCAD. Полученные модули дают возможность по заданным параметрам головок громкоговорителей получить объем и размеры акустического оформления, провести расчет характеристик получаемой системы (КПД системы, акустическую мощность, максимальный уровень звукового давления, электрическую мощность) и провести расчет коэффициентов передаточной функции.

На рис. 1, 2 представлены снимки экрана Mathcad с фрагментом расчета характеристик акустической системы с фазоинвертором и коэффициентов передаточной функции.

По расчетным значениям коэффициентов передаточной функции в программе VisSim создавались виртуальные лабораторные стенды и проводились исследования частотных характеристик получаемой системы.

При получении коэффициентов передаточной функции были использованы следующие выражения:

– для акустической системы с фазоинвертором:

$$W(S) = \frac{\tau_0^4 \cdot S^4}{\tau_0^4 \cdot S^4 + a_1 \cdot \tau_0^3 \cdot S^3 + a_2 \cdot \tau_0^2 \cdot S^2 + a_3 \cdot \tau_0 \cdot S + 1};$$

$$\tau_0 = \sqrt{\tau_B \cdot \tau_S};$$

$$h = \frac{f_B}{f_S} = \frac{\tau_S}{\tau_B} = 1;$$

$$a_1 = \frac{QL + h \cdot Qts}{\sqrt{h \cdot QL \cdot Qts}};$$

$$a = \frac{C_{AS}}{C_{AB}}; a_3 = \frac{QL \cdot h + Qts}{\sqrt{h \cdot QL \cdot Qts}};$$

– для закрытой акустической системы:

$$W_A(S) = \frac{S^2 \cdot C_{AT} \cdot M_{AC}}{(S^2 \cdot C_{AT} \cdot M_{AC} + S \cdot C_{AT} \cdot R_{AT} + 1)};$$

$$C_{AT} = \frac{C_{AB} \cdot C_{AS}}{(C_{AB} + C_{AS})};$$

$$R_{AT} = \frac{1}{\omega_S \cdot C_{AT} \cdot Qts};$$

$$M_{AC} = M_{ms} \cdot S_d^2$$

На рис. 3 представлен снимок экрана с расчетом коэффициентов передаточной функции для акустической системы с фазоинвертором.

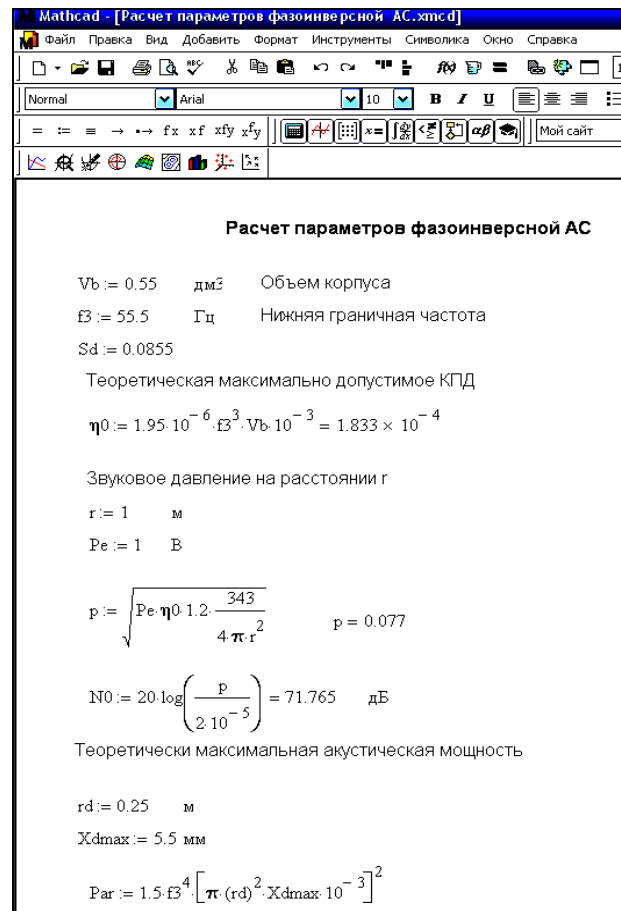


Рис. 1. Снимок экрана MathCad с модулем для расчета характеристик акустической системы

**Расчет параметров закрытой АС**

$V_b := 25$  дм<sup>3</sup> Объем корпуса  
 $f_3 := 50$  Гц Нижняя граничная частота

Теоретическая максимально допустимое КПД  
 $\eta_0 := 1 \cdot 10^{-6} \cdot f_3^3 \cdot V_b \cdot 10^{-3} = 3.125 \times 10^{-3}$

Звуковое давление на расстоянии r  
 $r := 1$  м  
 $P_e := 1$  В

$$p := \sqrt{P_e \cdot \eta_0 \cdot 1.2 \cdot \frac{343}{4 \cdot \pi \cdot r^2}} \quad p = 0.32$$

$N_0 := 20 \cdot \log\left(\frac{p}{2 \cdot 10^{-5}}\right) = 84.081$  дБ

Теоретически максимальная акустическая мощность  
 $r_d := 0.150$  м  
 $X_{dmax} := 7$  мм

$$P_{ar} := 0.425 \cdot f_3^4 \cdot [\pi \cdot (r_d)^2 \cdot X_{dmax} \cdot 10^{-3}]^2 \quad P_{ar} = 0.65 \quad \text{Вт}$$

Максимальный уровень звукового давления

$$N_{max} := 20 \cdot \log\left(\sqrt{\frac{P_{ar} \cdot 1.2 \cdot \frac{343}{4 \cdot \pi \cdot 1}}{2 \cdot 10^{-5}}}\right) \quad N_{max} = 107.263 \quad \text{дБ}$$

Рис. 2. Снимок экрана MathCad с модулем для расчета характеристик закрытой акустической системы

**Расчет передаточной функции**

$f_f = 44.4$      $Q_L = 9$      $Cas = 0.11$   
 $f_s = 37$      $Q_{ts} = 0.31$      $d = 0.393$

$V_b = 0.02234$

$h := \frac{f_f}{f_s}$      $h = 1.2$

$T_s := \frac{1}{f_s}$      $T_b := \frac{1}{f_f}$

$T_0 := \sqrt{T_b \cdot T_s} \quad T_0 = 0.025$

$a_1 := \frac{(Q_L + h \cdot Q_{ts})}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}} \quad a_1 = 5.122$

$Sef := 0.44 \cdot d^2 \quad Sef = 0.068$

$C_{ab} := \frac{1}{(1.412 Sef^2) \cdot V_b} \quad C_{ab} = 2.879 \quad C_{33} := \frac{1}{ws^2 \cdot Mms}$

$a := \frac{Cas}{C_{ab}} \quad a = 3.651 \times 10^{-5} \quad Cas = 1.051 \times 10^{-4}$

$a_2 := \frac{[h + (a + 1 + h^2) \cdot Q_L \cdot Q_{ts}]}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}} \quad a_2 = 4.376$

$a_3 := \frac{(Q_L - h + Q_{ts})}{\sqrt{h \cdot Q_L \cdot Q_{ts}}} \quad a_3 = 6.072$

$W(s) = \frac{(T_0^4 \cdot s^4)}{T_0^4 \cdot s^4 + a_1 \cdot T_0^3 \cdot s^3 + a_2 \cdot T_0^2 \cdot s^2 + a_3 \cdot T_0 \cdot s + 1}$

Рис. 3. Снимок экрана MathCad с модулем для получения значения коэффициентов передаточной функции

На рис. 4 – 6 представлены передаточные функции и графики логарифмических частотных характеристик для акустических систем с фазоинвертором, полученные в VisSim:

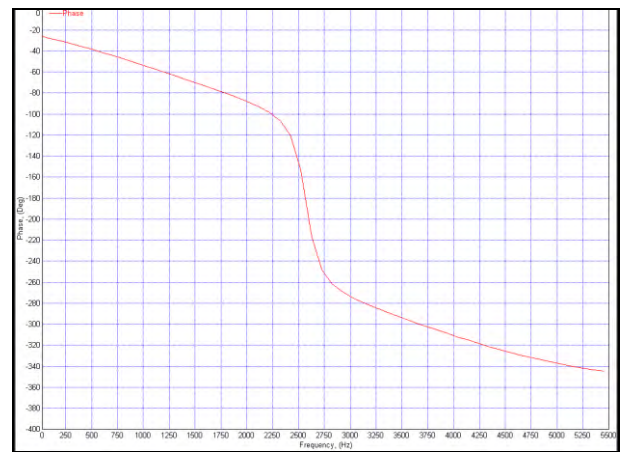
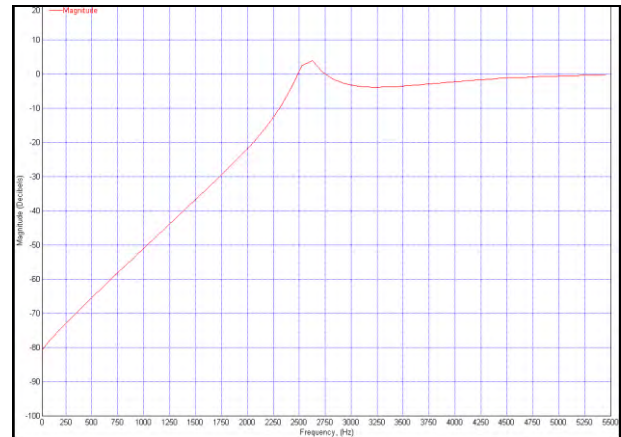


Рис. 4. ЛАЧХ и ЛФЧХ акустической системы

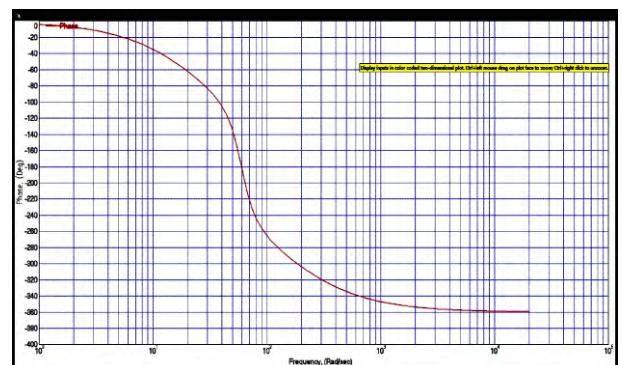
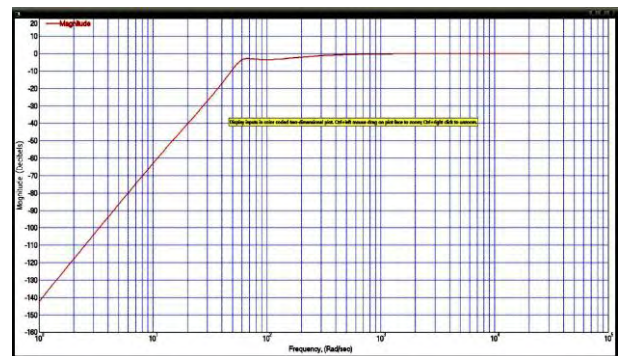


Рис. 5. ЛАЧХ и ЛФЧХ акустической системы

$$W(S) = \frac{0,00000065S^4}{0,00000065S^4 + 0,000017S^2 + 0,00069S^2 + 0,076S + 1}$$

$$W(S) = \frac{7,716 \cdot 10^{-8} \cdot S^4}{7,716 \cdot 10^{-8} \cdot S^4 + 1,787 \cdot 10^{-5} \cdot S^3 + 9,747 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 + 6,433 \cdot 10^{-2} \cdot S + 1}$$

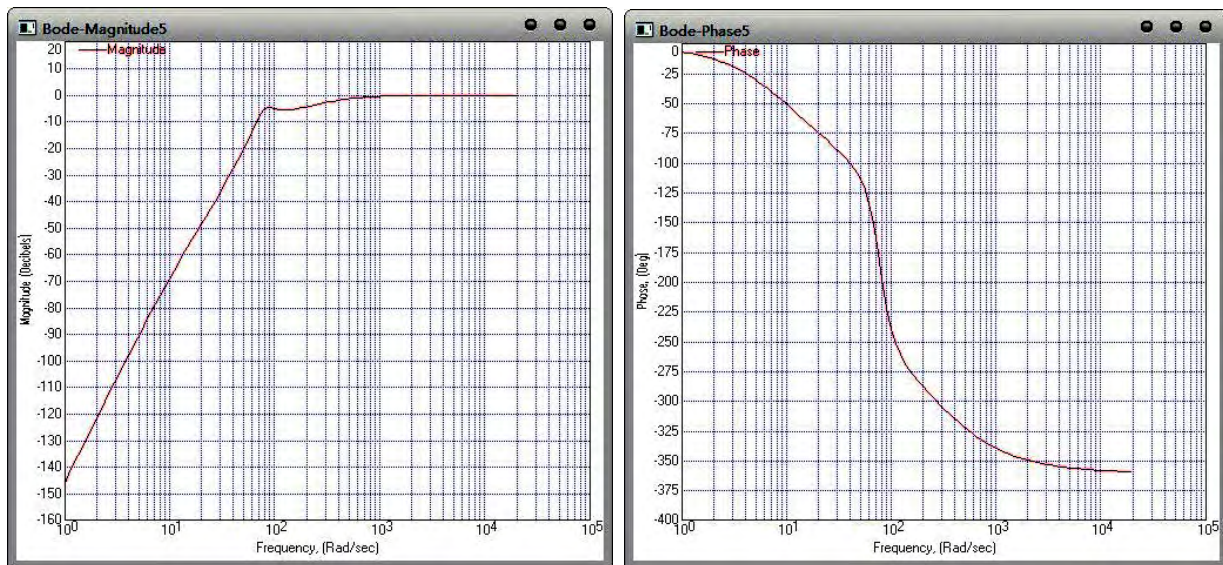


Рис. 6. ЛАЧХ и ЛФЧХ акустической системы

Расчетные модули прошли апробацию в учебном процессе кафедры мультимедийных информационных технологий и систем НТУ "ХПИ" при подготовке бакалавров по специальности акустотехника.

### Выводы

Автором проведена разработка расчетных модулей и лабораторных стендов для исследований передаточных функций акустических систем с корректирующими фильтрами с использованием методов теории автоматического управления для анализа и оптимизации параметров АС в НЧ-области с применением программного обеспечения VisSim и Mathcad.

### Список литературы

1. Афонин С.М. Создание акустических систем в домашних условиях / С. М. Афонин. – М.: Эксмо, 2008. – 160 с.
2. Алдошина И.А. Высококачественные акустические системы и изучатели / И.А. Алдошина, А. Г. Войшвилло. – М.: Радио и связь, 1985. – 168 с.
3. Алдошина И.А. Бытовая электроакустическая аппаратура: Справочник / И.А. Алдошина, В.Б. Бревдо, Г.Н. Веселов. – М.: КВБК-а, 1996. – 320 с.

Поступила в редколлегию 2.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ІСНУЮЧОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В.В. Усик

У статті розглядаються способи аналізу акустичних систем різного типу з використанням методів теорії автоматичного управління та застосування програмного забезпечення VisSim та Mathcad.

**Ключові слова:** акустична система, передавальна функція, акустичне оформлення, параметри Тіля-Смолля.

### SYNTHESIS AND ANALYSIS OF ACOUSTIC SYSTEMS USING EXISTING SOFTWARE

V.V. Usik

This paper discusses how to analyze different types of speaker systems using the methods of control theory and VisSim and Mathcad applied software packages.

**Keywords:** acoustic system, the transfer function, acoustic design, the Thiele-Small parameters.