

УДК 621.395.623.7

УПРОЩЕНИЕ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Сулима Н.Н., Перекрестов И.С.

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова

SIMPLIFICATION THE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL INFLUENCES ON
ELECTRO-ACOUSTIC CONVERTERS PERFORMANCE

Sulima N.N., Perekrestov I.S.

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. A.S. Popov

Аннотация Рассмотрено влияние силы сопротивления воздуха на движение колебательной системы электроакустического преобразователя (громкоговорителя). С использованием основных соотношений из гидродинамики и принципа подобия предложены упрощенные соотношения для расчёта колебательных процессов в малоомощных электроакустических преобразователях (головных телефонах).

Abstract The actions of the force of air resistance on the oscillating systems of electroacoustical transducer were discussed. With using the basic hydrodynamics relations and the similarity principle were proposed simplified equations for the calculation of oscillation processes in low-power electroacoustical transducers (headphones).

ВВЕДЕНИЕ

Качество звучания современных звуковых трактов, являющихся в большинстве случаев цифровыми, полностью определяется эффективностью электромеханического преобразования в их конечных устройствах – громкоговорителях, головных телефонах, остающихся аналоговыми [1]. Таким образом, задача анализа работы электроакустических преобразователей является актуальной, а изучение процессов излучения ими звука – важнейшим этапом на пути совершенствования звуковоспроизводящей техники.

С теоретической точки зрения громкоговоритель принято рассматривать в виде комбинации электромеханического преобразователя и акустической антенны, связывающей данный преобразователь со звуковым полем [2]. Классическое представление механико-акустического звена громкоговорителя в виде простейшей механической колебательной системы (ПМКС, рис. 1а) позволяет с использованием принципа Даламбера описать колебательные процессы в нём уравнением (1), составленным на основании динамической модели (рис. 1б) без учёта влияния воздушной среды:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = m_0 \mathcal{C} \ddot{x} + r_0 \mathcal{C} \dot{x} + \frac{x}{c_0}, \quad (1)$$

где $F_1 = m_0 \cdot \ddot{x}$ – сила инерции массивного элемента ПМКС; $F_2 = r_0 \cdot \dot{x}$ – сила внутреннего трения; $F_3 = x / c_0$ – сила упругости подвеса;

m_0 , r_0 , c_0 – соответственно собственная масса, коэффициент внутреннего трения и гибкость подвижной системы ПМКС;

x , \dot{x} , \ddot{x} – смещение подвижного звена ПМКС, его первая (скорость) и вторая (ускорение) производные [3].

Противодействие окружающей среды принято характеризовать инерционным элементом, выраженным соколеблющейся массой воздуха m_R , и диссипативным элементом r_R , обуславливающим вязкое трение (рис. 1в). При этом уравнение (1) переписывается в виде (2):

$$F = F_{1,3} + F_4 + F_5 = m_0 \mathcal{C} \ddot{x} + r_0 \mathcal{C} \dot{x} + \frac{x}{c_0} + m_R \mathcal{C} \ddot{x} + r_R \mathcal{C} \dot{x} = (m_0 + m_R) \mathcal{C} \ddot{x} + (r_0 + r_R) \mathcal{C} \dot{x} + \frac{x}{c_0} \quad (2)$$

где $F_{1-3} = F_1 + F_2 + F_3$ – совокупная реакция ПМКС на действие внешней вынуждающей силы F [4, 5].

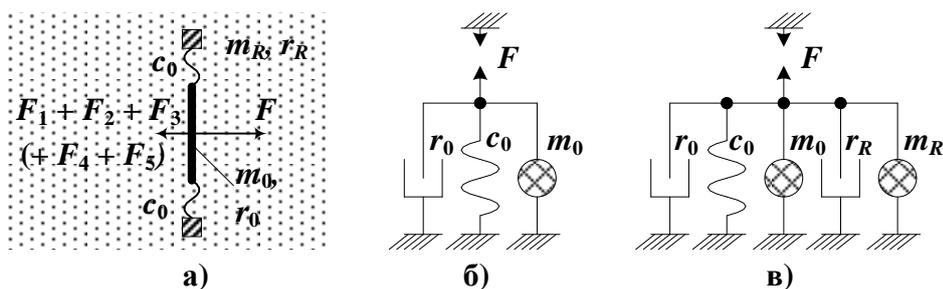


Рисунок 1 – Простейшая механическая колебательная система (ПМКС):

а) конструкция; б) динамическая модель в вакууме;

в) динамическая модель в несжимаемой воздушной среде.

Неоднородное дифференциальное уравнение (2) принято считать каноническим, а вынуждающую силу F – зависящей от конкретного типа преобразователя. Решение этого уравнения, позволяющее определить такие важные для электроакустического преобразователя параметры как акустическая мощность и уровень звукового давления, сопряжено с рядом трудностей. Упрощению в этом случае может способствовать исключение незначимых членов уравнения, которые могут иметь место при применении данного общего уравнения к частным случаям анализа. В связи с тем, что в литературе, посвященной электроакустике, подробно не обговариваются условия применимости уравнения (2), значимость отдельных его членов и их влияние на решение, возникает необходимость проведения более полного анализа указанного уравнения. Основной задачей данной работы является подтверждение или опровержение гипотезы о возможном упрощении уравнения (2) в случае описания с его помощью работы колебательных систем таких электроакустических преобразователей, как громкоговорители и головные телефоны. Основанием для гипотетического упрощения являются относительно небольшие колебательные скорости \dot{x} , имеющие место в громкоговорителях, что, согласно известным положениям механики сплошных сред, может свидетельствовать о преобладании сил вязкого трения над силами инерции [6]. Пристальное внимание, в связи с акустической направленностью исследования, уделяется анализу диссипативных свойств окружающей воздушной среды с целью получения уточнённого математического описания её влияния на работу громкоговорителей и условий, позволяющих упростить это описание, а вместе с тем и само уравнение (2). При этом не ставится задача полного формального решения приведённого уравнения, а планируется лишь определение условий, при которых характеризующие влияние окружающей среды члены уравнения могут быть отброшены как незначимые.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ОЦЕНКА СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Постулируя полную эквивалентность задачи о движении массивного элемента в неподвижной воздушной среде и задачи об обтекании движущейся воздушной средой неподвижного элемента, можно рассмотреть влияние окружающей среды на ПМКС с использованием известных положений гидродинамики, которые одинаково справедливы и для газообразных сред [7].

Слагаемое $(m_0 + m_R) \cdot \ddot{x}$ в уравнении (2) представляет собой не что иное как продифференцированный по времени полный импульс системы “массивный элемент ПМКС m_0 – соколеблющаяся масса воздушной среды m_R ” и справедливо лишь в случае идеального газа, не приводящего к диссипации колебаний, и движущегося ламинарно (без турбулентностей). При этом слагаемое $F_4 = m_R \cdot \ddot{x}$ имеет смысл силы реакции среды на движущееся тело или

силы инерции [7]. Действительно, в случае ламинарного течения воздушного потока, некоторая его часть будет находиться непосредственно у колеблющейся поверхности ПМКС, нагружая массивный элемент m_0 дополнительной массой m_R (рис. 1в). Имеющее же место в воздушной среде затухание колебаний ПМКС учитывается в уравнении (2) слагаемым $F_5 = r_R \cdot \dot{x}$, являющимся по определению силой вязкого трения. Таким образом, воздействие окружающей воздушной среды определяется суммой:

$$F_c = F_4 + F_5 = m_R \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} \quad (3)$$

где первое слагаемое отражает инерционную составляющую, а второе – диссипирующую составляющую силы сопротивления.

Полученное выражение (3) полностью соответствует известной формуле Стокса, определяющей силу сопротивления среды F_c , которое, согласно поставленной задаче, необходимо качественно и количественно исследовать на предмет наличия незначительных членов, для чего применимы известные гидродинамические методы решения [8].

Одним из методов, позволяющих упростить решение уравнения (2), является пренебрежение инерционным членом $m_R \cdot \ddot{x}$, при этом сила сопротивления F_c оказывается пропорциональной колебательной скорости и в пределе равна:

$$F_c /_{m_R \cdot \ddot{x}=0} = r_R \cdot \dot{x} = A \cdot \eta \cdot \dot{x} \cdot l, \quad (4)$$

где A – множитель, зависящий от конфигурации поверхности движущегося тела;

η – динамическая вязкость среды;

l – характерный размер движущегося тела [9].

Однако определение силы сопротивления среды выражением (4) возможно только при доминирующем влиянии сил вязкости в сравнении с силами инерции. В качестве индикатора, позволяющего определить незначительность инерционных сил в сравнении с силами вязкости, принято использовать один из критериев подобия, а именно число Рейнольдса Re , представляющее собой отношение силы вязкости к силе инерции. При этом считается, что если $Re \ll 1$, среда вязкая, и выражение (4) справедливо [10]. Для большей точности дальнейших выражений приму эквивалентными условия $Re \ll 1$ и $Re < 0.1$, что определяет малость числа Рейнольдса к единице как минимум на порядок.

Учитывая проведённые рассуждения, уравнение (2) можно переписать в виде системы уравнений (5):

$$F = \begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x} + (r_0 + r_R) \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0}, & Re < 0,1; \\ (m_0 + m_R) \cdot \ddot{x} + (r_0 + r_R) \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0}, & Re > 0,1. \end{cases} \quad (5)$$

С другой стороны, в случае достаточно больших чисел Рейнольдса ($Re > 1000$), вязкость среды перестаёт вносить весомый вклад в значение силы сопротивления и может быть отброшена из-за преобладающего влияния сил инерции [11]. Для учёта этого эффекта системе (5) необходимо дополнить ещё одним уравнением:

$$F = \begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x} + (r_0 + r_R) \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0}, & Re < 0,1; \\ (m_0 + m_R) \cdot \ddot{x} + (r_0 + r_R) \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0}, & 0,1 < Re < 1000; \\ (m_0 + m_R) \cdot \ddot{x} + r_0 \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0}, & Re > 1000. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, установить возможность отбрасывания некоторых членов уравнения (2) можно только определив конкретные значения числа Рейнольдса и пределы их изменений для данного типа движения, после чего выбрать соответствующее уравнение из системы (6).

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ТЕЛ

Согласно изложенным выше рассуждениям, для выбора конечного уравнения колебаний ПМКС из системы (6) следует определить число Рейнольдса – безразмерный коэффициент подобия, определяющий вклад вязкости и трения в общую силу сопротивления среды.

Для классического случая набега жидкости или газа на тело, определение числа Рейнольдса не вызывает трудности и возможно по выражению (7):

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{U \cdot L \cdot \rho}{\eta} \quad (7)$$

где U – скорость набегающего потока среды, м/с;

L – характерный размер, м;

ν – кинематическая вязкость среды, м²/с;

ρ – плотность газообразной или жидкостной среды, кг/м³;

η – динамическая вязкость среды, кг/(м·с).

Не составляет трудности перейти от случая набегающей на неподвижное тело среды со скоростью U к случаю движущегося в неподвижной среде тела со скоростью V . Действительно, с учётом принципа взаимности и условия неразрывности, можно утверждать равенство скоростей $U=V$, что позволяет записать (7) в виде (8):

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\eta} \quad (8)$$

где V – скорость движения тела, м/с.

Известно, что для колебательного движения с заданной частотой ω скорость определяется амплитудой смещения x (9):

$$V = \omega \cdot x \quad (9)$$

где ω – частота колебаний, с⁻¹.

С учётом (9) число Рейнольдса (8) запишется в конечном виде (10):

$$Re = \frac{\omega \cdot x \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot x \cdot L}{\eta} \quad (10)$$

При этом возникают определённые разночтения в определении характерного размера L . В литературе встречаются несколько различных вариантов определения числа Рейнольдса, а именно использование в качестве характерного размера L длины волны λ [12] или диаметра колеблющегося тела d [6, 7]. Кроме того, логичным является рассмотрение в качестве характерного размера также смещения тела x . При этом применительно к громкоговорителям характерно соотношение $\lambda \gg d \gg x$, что, очевидно, приведёт к соотношению (11) для чисел Рейнольдса:

$$Re_{L=\lambda} \gg Re_{L=d} \gg Re_{L=x} \quad (11)$$

Порядок получаемых чисел Рейнольдса, соответственно, изменяется в достаточном широком диапазоне.

РАСЧЁТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ГРОМКОГОВОРТЕЛЕЙ РАЗНЫХ МОЩНОСТЕЙ

В связи с тем, что в справочной литературе для громкоговорителей приводится уровень создаваемого ими звукового давления либо величина этого давления, целесообразно выра-

зять число Рейнольдса с учётом известного соотношения между звуковым давлением и колебательной скоростью (12):

$$N_p = 20 \cdot \lg \frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \cdot \lg \frac{\rho \cdot C \cdot V}{2 \cdot 10^{-5}}, \quad (12)$$

где N_p – уровень звукового давления, дБ;

$p = \rho \cdot C \cdot V$ – звуковое давление, Па;

C – скорость распространения звуковой волны, м/с.

С учётом (12) выражение (8) переписывается в виде (13):

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{p \cdot L}{\rho \cdot C \cdot \nu} = \frac{p \cdot L}{C \cdot \eta}. \quad (13)$$

Для колебаний в воздушной среде ($C = 331$ м/с; $\eta = 1,71 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с)) при расчёте числа Рейнольдса можно сохранить лишь зависимость от характерного размера и звукового давления (14):

$$Re = \frac{p \cdot L}{C \cdot \eta} = 176,7 \cdot p \cdot L. \quad (14)$$

Используя (14), легко определить имеющие место числа Рейнольдса для любого громкоговорителя с известной величиной создаваемого им звукового давления.

В табл. 1 представлены параметры громкоговорителей и даны рассчитанные для них по выражению (14) числа Рейнольдса в случае выбора в качестве характерного размера:

- длины волны $\lambda=0,331$ м. на стандартной для измерений частоте 1 кГц;
- диаметра излучателя d согласно паспортным данным на тот или иной громкоговоритель;
- смещения x , для удобства принимаемого равным $5 \cdot 10^{-3}$ м. для громкоговорителей мощностью до 1 Вт и 10^{-2} м. для громкоговорителей большей мощности.

Таблица 1 – Расчётные значения чисел Рейнольдса для громкоговорителей разных мощностей [13]

Модель	Мощность, Вт	Звуковое давление, Па	Диаметр, м	Число Рейнольдса по		
				по длине волны	по диаметру	по смещению
0,025ГД-1	0,025	0,15	0,040	8,77	1,06	0,13
0,1ГД-8	0,100	0,10	0,060	5,85	1,06	0,09
0,25ГД-9	0,250	0,28	0,070	16,38	3,46	0,25
0,5ГД-14	0,500	0,23	0,102	13,45	4,15	0,20
1ГД-1	1,000	0,25	0,150	14,62	6,63	0,44
2ГД-7	2,000	0,23	0,152	13,45	6,18	0,41
3ГД-28	3,000	0,25	0,204	14,62	9,01	0,44
5ГД-10	5,000	0,30	0,252	17,55	13,36	0,53
6ГД-1	6,000	0,35	0,222	20,47	13,73	0,62
10ГД-17	10,000	0,30	0,295	17,55	15,64	0,53

Согласно полученным результатам, в случае определения числа Рейнольдса по смещению, имеет место его незначительность, которая возрастает, если учесть, что в качестве расчётных выбраны достаточно большие значения смещения. Кроме того, ещё большему уменьшению числа Рейнольдса способствует то, что, строго говоря, в связи с колебательным характером движения в качестве характерного размера следует оперировать не самой величиной смещения x , а её половинным значением, т.к. именно на это расстояние колебательная система смещается из положения равновесия.

Следует отметить, что в пользу выбора в качестве характерного размера именно смещения x свидетельствует, как минимум, тот факт, что в аэродинамике характерным размером часто считают длину огибающей движущегося тела [6]. Кроме того, анализ обтекания жидкостями различных тел позволяет предположить, что наиболее верным методом является использование в качестве характерного размера именно смещения [14]. При этом значения чисел Рейнольдса для большинства громкоговорителей малой и средней мощности составляют десятые доли от единицы, что позволяет утверждать справедливость использования первого уравнения системы (6), позволяющего упростить процесс анализа работы ПМКС в целом.

Очевидно, что приведенные теоретические рассуждения требуют серьезного экспериментального подтверждения, которое представляется возможным на основании принципа подобия с помощью, например, гидроакустического моделирования с использованием ультразвуковых источников. Однако уже сейчас можно говорить о неправомерности использования в качестве характерного размера длины волны, формируемой излучателем для случаев анализа взаимодействия колебательной системы электроакустического преобразователя и окружающей среды.

Несмотря на неоднозначность в определении характерного размера для расчёта числа Рейнольдса, полученные данные позволяют утверждать целесообразность использования канонического уравнения, описывающего динамические процессы в колебательных системах электромеханических преобразователей средней и большой мощности. Однако, для преобразователей малых мощностей и малых линейных размеров, использующихся в головных телефонах (наушниках) каноническое уравнение движения однозначно может быть упрощено за счёт отбрасывания незначительной в этих условиях соколеблющейся массы воздушной среды и инерционного члена силы сопротивления ей обусловленного.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ковалгин Ю. А. Стерефоническое радиовещание и звукозапись: учеб. пособ. [текст] / Ковалгин Ю. А., Вологдин Э. И., Кацнельсон Л. Н.; под ред. Ю. А. Ковалгина. // М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 720 с.
- 2 Римский-Корсаков А.В. Электроакустика [Текст] / Римский-Корсаков А.В. // М.: Связь, 1973. – 272 с.
- 3 Акустика: Учебник для вузов [Текст] / Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Щевьев Ю.П.; под ред. Ю.А. Ковалгина М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
- 4 Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура [текст] / Вахитов Я.Ш. М: Искусство. – 1982. – 415 с.
- 5 Фурдуев В.В. Акустические основы вещания [текст] / Фурдуев В.В. // М.: Связьиздат. – 1960. – 320 с.
- 6 Наугольных К.А. Нелинейные волновые процессы в акустике [текст] / К.А. Наугольных, Л.А. Островский / Наугольных К.А., Островский Л.А. // М.: Наука, 1990. – 237 с.
- 7 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика [текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Издание 4-е, стереотипное. – М.: Наука, 1988. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.
- 8 Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1 [текст] / Седов Л.И. // М.: Наука, 1970. – 492 с.
- 9 Аржаников Н.С. Аэродинамика [текст] / Н.С. Аржаников, В.Н. Мальцев // Издание 1-е. – М.: Оборонгиз, 1952. – 481 с.
- 10 Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. –Том 1. Учеб. руководство: [для вузов] [текст] / Абрамович Г.Н. // М.: Наука. – 1991. – 600 с.
- 11 Бондарев Е.Н. Аэрогидромеханика. Учебник [для студентов высших технических учебных заведений] [Текст] / Бондарев Е.Н., Дубасов В.Т., Рыжов Ю.А // М.: Машиностроение. – 1993. – 608 с.
- 12 Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов // М.: Наука, 1984. – 403 с.
- 13 Дольник А.Г. Громкоговорители [Текст] / Дольник А.Г. – М. – Л.: “Энергия”, 1964. – 32 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып 555).
- 14 Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа [Текст] пер. с англ. Л.В. Соколовской, под ред. Г. И. Баренблатта и В. П. Шидловского. – М : Мир. – 1986