

## Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.042

DOI: 10.30987/article\_5cb58f516d2bd2.01655840

В.А. Ермолаев, Ю.А. Кропотов, Н.Е. Холкина

### ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ С АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Исследованы математические модели телекоммуникационных систем с акустической обратной связью. Рассмотрены вопросы устойчивости на основе построения функционально-дифференциальных и дифференциально-разностных моделей. Представлен механизм формирования акустической обратной связи. Исследована модель акустических систем с запаздывающей

обратной связью. Приведен график ядра функционально-дифференциального уравнения, описывающего систему с обратными связями.

**Ключевые слова:** акустическая обратная связь, функционально-дифференциальные модели, дифференциально-разностные модели, идентификация моделей эха, запаздывающая обратная связь.

V.A. Yermolaev, Yu.A. Kropotov, N.E. Kholkina

### FUNCTIONAL DIFFERENTIAL AND DIFFERENTIAL MODELS OF SYSTEMS WITH ACOUSTICAL FEEDBACK

The paper reports the investigations of the functional differential and differential models of system with acoustic feedback. The aim of the work is a formation, analysis and identification of linear and non-linear functional differential models of echo, reverberation and acoustic feedback; the analysis of model sensitivity, the analysis of stability of telecommunication systems with the acoustic feedback. There is presented a mechanism of an acoustic feedback mechanism formation.

At the analysis of sound propagation in closed rooms with the use of the geometric acoustics method there is obtained a nucleus equation which is approximated by non-negative functions taking into account a model of reverberation and a model of multiple reflec-

tions. The considered procedure of echo formation and reverberation is an element of the feedback model common for warning systems and technological communication. There is investigated a model of acoustic systems with delayed feedback. A diagram of the kernel of a functional differential equation describing a system with feedback is shown.

The models of systems with acoustic feedback presented in this work ensure the approximation to reality at that, an account of possibilities of the emergence in channels of non-linear distortion sound propagation are considered to be the next problem.

**Key words:** acoustic feedback, functional differential models, differential models, identification of echo models, delayed feedback.

#### Введение

К факторам, от которых зависит качество речевой связи, в том числе ее разборчивость, относят, как известно [1-3], уровни акустического эха и реверберации и, соответственно, глубину акустической обратной связи. Особо негативно эти факторы влияют на характеристики систем со сжатием речи [4] и с глубокой акустической обратной связью – вплоть до самовозбуждения. При этом проблему ухудшения характеристик обычно принято сни-

жать адаптивными методами с использованием соответствующих моделей эха и/или реверберации. Модели эха и реверберации при озвучивании как открытых площадок, так и замкнутых помещений рассматриваются, например, в работах [1-3; 5]. Однако ряд вопросов их теории и применения, возникающих, в частности, при рассмотрении систем с акустической обратной связью, в известной литературе представлены недостаточно.

### Модели эха и реверберации

Механизм формирования акустической обратной связи поясняется рис. 1. Характеристики каналов распространения звука, имеющих место как на ближних, так и на дальних концах систем связи, интегрируются в этом случае в характеристики изображенного на рис. 1 обратного канала

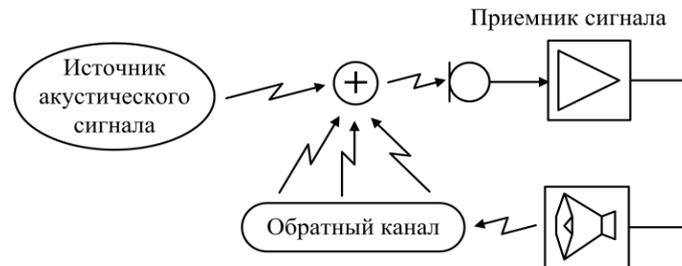


Рис. 1. Механизм формирования акустической обратной связи

Характерная для рассматриваемых телекоммуникационных систем акустическая обратная связь обуславливает обращение к моделям, описываемым функционально-дифференциальными или дифференциально-разностными уравнениями, теория которых отражена, например, в книгах [7; 8], обзорах [9; 10], многочисленных статьях и работах основателей этого направления: А.Д. Мышкиса, Л.Э. Эльсгольца, С.Б. Норкина, В.Б. Колмановского, Р. Беллмана и других. К функционально-дифференциальным уравнениям можно отнести и уравнения с непрерывным и дискретным последствием, с запаздыванием и нейтрального типа, с неограниченным и конечным последствием, детерминированные и стохастические, с непрерывным и дискретным временем. Едва ли не центральной в названных работах является тема устойчивости и неустойчивости систем с последствием.

Полученным в области теории функционально-дифференциальных уравнений результатам естественно сопутствует интерес и к их практическому воплощению [9; 10]. Необходимо также отметить, что при всем обилии работ и результатов в этой области еще не все вопросы получили свое полное разрешение. В частности, не получили полного разрешения вопросы моделирования эха, реверберации и акустической обратной связи. Возникающие здесь проблемы проистекают из распреде-

[5]. Следует отметить, что проблема, аналогичная проблеме эха, имеет место и в системах цифровой пакетной связи, задержка доставки пакетов и, соответственно, информации в которых может достигать сотен миллисекунд.

ленного характера задержек, их большого числа и нелинейных искажений в каналах передачи, вносимых в первую очередь источниками звука; из потребности построения, анализа и идентификации функционально-дифференциальных и дифференциально-разностных моделей эха, реверберации и акустической обратной связи.

Целью настоящей работы является построение, анализ и идентификация линейных и нелинейных функционально-дифференциальных моделей эха, реверберации и акустической обратной связи; анализ чувствительности моделей, опирающийся на результаты работ [7; 8]; анализ устойчивости телекоммуникационных систем с акустической обратной связью. В соответствии с [9] моделируются как прямые (ранние) звуки, так и реверберация с дискретным и распределенным характером задержки. Модели акустической обратной связи описываются при этом функционально-дифференциальными уравнениями.

Акустическое эхо при озвучивании открытых территорий является, строго говоря, результатом либо отражения звуковых волн от удаленных объектов, либо наличия приходящих по разным траекториям волн от разнесенных в пространстве источников звука, призванных обеспечить необходимую зону равномерного озвучивания. Модель акустического эха в этом простейшем случае естественно предста-

вить линейной комбинацией  $u(t)$  запаздывающих копий излучаемого сигнала  $u_0(t)$ :

$$u(t) = \sum_{k=1}^r \alpha_k u_0(t - \tau_k). \quad (1)$$

Здесь  $\tau_k$  и  $\alpha_k$  – соответственно время распространения (задержка) и амплитуда звуковой волны, формируемой  $k$ -м источником в области наблюдения;  $r$  – число источников.

При непрерывном распределении задержек звуковых волн, отраженных, например, от протяженных объектов, модель эха можно задать выражением

$$u(t) = \sum_{k=1}^r \int_{-\infty}^0 h_k(\theta) u_0(t - \tau_k + \theta) d\theta, \quad (2)$$

где  $h_k(\theta)$  – ядро (функция) непрерывного распределения интенсивности отраженного сигнала в заданной точке пространства по величине задержки (начиная со значения  $\tau_k$ , которое при значениях  $\theta > 0$  принимается равным нулю). Если  $h_k(\theta) = \alpha_k \delta(\theta)$ , то в силу свойств обобщенной функции  $\delta(\theta)$  уравнение (2), как и должно быть, эквивалентно уравнению (1).

При анализе распространения звука в замкнутых помещениях методами геометрической акустики [8] уравнение (2), ядра  $h_k(\theta)$  которого по определению должны аппроксимироваться неотрицательными функциями, естественно интерпретировать как одну из возможных моделей реверберации, назвав ее по этой причине моделью множественных отражений [1; 6].

Учитывая, что акустические свойства помещений характеризуются не только законами распространения и отражения звуковых волн, но и комплексом резонансных частот, уравнение (2) можно также интерпретировать как систему резонаторов, ядра (в этом случае импульсные функции)  $h_k(\theta)$  которых отвечают названным частотам или модам. Здесь  $k = 1, \dots, r$ ,  $r$  – число резонаторов. При такой интерпретации модель будет называться моделью резонансных мод. Естественно, в рамках любой из названных интерпретаций уравнению (2) можно сопоставить схему, приведенную на рис. 2.

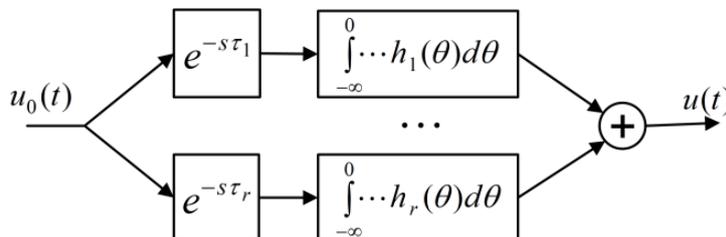


Рис. 2. Модель процесса реверберации

Сведения по модели множественных отражений, равно как и лежащие в ее основе механизмы и законы формирования акустического поля, законы распространения, отражения и поглощения звука, детально рассматриваются в [1]. В этой работе выделяются основной звук, ранние отражения и многократные отражения, отвечающие за образование процесса реверберации. Ранние отражения определяются как небольшое число волн, запаздывающих относительно основного звука на величину около 60 мс, а реверберация – как волны, запаздывающие на 60...300 мс. Следует, однако, отметить, что данная классификация не вполне подходит к сис-

темам оповещения и технологической связи, поскольку основной звук, выделяемый по своей интенсивности, может оказаться внутри области ранних отражений и даже реверберации.

Рассмотренная схема формирования эха и реверберации является, как следует из рис. 3, элементом модели акустической обратной связи, характерной для систем оповещения и технологической связи. Естественно, уравнения подобных моделей в зависимости от использованного подхода могут относиться к различным типам, теория которых рассматривается, например, в [1; 7-10].

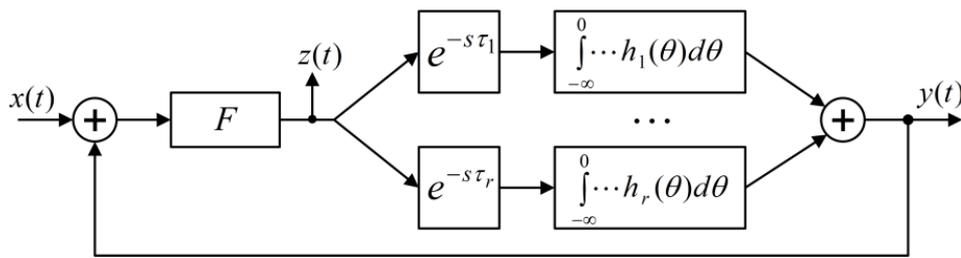


Рис. 3. Модель системы с акустической обратной связью

Следует отметить, что нижний предел интегрирования, принятый в выражении (2) и, соответственно, на рис. 2 и 3 равным  $-\infty$ , отвечает случаю неограни-

ченного последствия. В системах с конечным последствием этот предел принимает конечное отрицательное значение [7; 8].

**Модели акустических систем с запаздывающей обратной связью**

Уравнение (2) после выделения из него слагаемых, отвечающих за каналы прямого распространения основного звука

и ранних отражений, принимает в системах с конечным последствием вид

$$u(t) = \sum_{l=1}^q \alpha_l u_0(t - \tau_l) + \sum_{k=q+1}^r \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta) u_0(t - \tau_k + \theta) d\theta. \tag{3}$$

Здесь  $q$  – число каналов прямого распространения;  $\gamma_k > 0$  – максимальная величина задержки в  $k$  – канале эха с распределенным запаздыванием.

Применение двустороннего преобразования Лапласа позволяет записать уравнение (3) в изображениях как

$$U(s) = U_0(s) \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-\tau_l s} + U_0(s) \sum_{k=q+1}^r e^{-\tau_k s} \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta) e^{\theta s} d\theta. \tag{4}$$

При этом изображенную на рис. 3 модель системы с акустической обратной

связью в линейном приближении можно описать уравнением

$$Z(s) = \frac{F(s)}{1 - F(s)G(s)} X(s), \quad Y(s) = G(s)Z(s). \tag{5}$$

Здесь  $Y(s)$  и  $Z(s)$  – изображения оригиналов  $y(t)$  и  $z(t)$ ,  $Y(s) \doteq y(t)$ ,  $Z(s) \doteq z(t)$ . Кроме того, в соответствии с (4)

$$G(s) = \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-\tau_l s} + \sum_{k=q+1}^r e^{-\tau_k s} \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta) e^{\theta s} d\theta. \tag{6}$$

Если передаточную функцию  $F(s)$  изображенного на рис. 3 блока представить отношением двух многочленов, т.е.

$F(s) = A(s)/B(s)$ , то уравнению (5) с учетом (6) можно придать вид

$$[B(s) - A(s) \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-\tau_l s} - A(s) \sum_{k=q+1}^r e^{-\tau_k s} \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta) e^{\theta s} d\theta] Z(s) = A(s) X(s). \tag{7}$$

Характеристический многочлен этого уравнения равен

$$B(s) - A(s) \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-\tau_l s} - A(s) \sum_{k=q+1}^r e^{-\tau_k s} \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta) e^{\theta s} d\theta.$$

Ограничившись, в частности, одним каналом прямого распространения эха и одним каналом с распределенным запаз-

дыванием, уравнение (7) можно записать в виде

$$[ B(s) - A(s)\alpha_1 e^{-\tau_1 s} - A(s)e^{-\tau_2 s} \int_{-\gamma}^0 h(\theta)e^{\theta s} d\theta ] Z(s) = A(s)X(s), \tag{8}$$

$$Y(s) = [ \alpha_1 e^{-\tau_1 s} + e^{-\tau_2 s} \int_{-\gamma}^0 h(\theta)e^{\theta s} d\theta ] Z(s).$$

В области оригиналов уравнения (7) и (8) относятся к классу функционально-дифференциальных; чтобы показать это, переменную Лапласа  $s$  достаточно заме-

нить оператором дифференцирования  $d/dt$ . Так, из (8) в этом случае следует уравнение

$$B(d/dt)z(t) - \alpha_1 A(d/dt)z(t - \tau_1) - A(d/dt) \int_{-\gamma}^0 h(\theta)z(t - \tau_2 + \theta)d\theta = A(d/dt)x(t), \tag{9}$$

$$y(t) = \alpha_1 z(t - \tau_1) + \int_{-\gamma}^0 h(\theta)z(t - \tau_2 + \theta)d\theta.$$

Уравнению (7) можно придать аналогичную форму, произведя в (9) замены:

$$\alpha_1 z(t - \tau_1) \rightarrow \sum_{l=1}^q \alpha_l z(t - \tau_l) \text{ и } \int_{-\gamma}^0 h(\theta)z(t - \tau_2 + \theta)d\theta \rightarrow \sum_{k=q+1}^r \int_{-\gamma_k}^0 h_k(\theta)z(t - \tau_k + \theta)d\theta.$$

В моделях множественных отражений ядра интегральных выражений – непрерывные (возможно, за исключением конечного числа точек разрыва, распределения интенсивностей эха по величине запаздывания) – подлежат аппроксимации неотрицательными функциями, графики

которых аналогичны по форме графику, приведенному на рис. 4.

Функция, изображенная на рис. 4, описывается выражением  $h(\theta) = -\theta - 0,02(\exp(-5\theta) - 1)$  или, более строго, выражением

$$h_2(\theta) \equiv h(\theta) = \begin{cases} \eta_2(1 - e^{\lambda\theta}) - \eta_1\theta, & \theta \in [0, -\gamma] \\ 0, & \theta \notin [0, -\gamma] \end{cases} \tag{10}$$

$$\eta_1 > \eta_2 > 0, \lambda = -\frac{1}{\gamma} \ln(\eta_1\gamma/\eta_2 + 1) > 0, \gamma > 0,$$

при значениях параметров  $\eta_1 = 1, \eta_2 = 0,02, \lambda = -5$  и  $\gamma = 0,725$ .

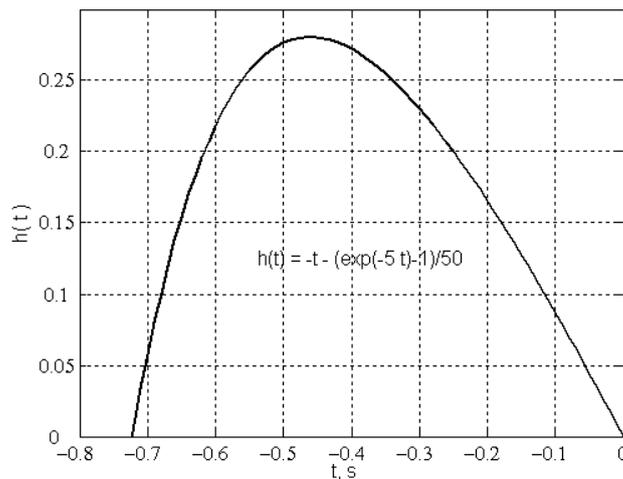


Рис. 4. Пример графика ядра функционально-дифференциального уравнения (9)

При этом подстановка функции (10) под знак интеграла в уравнении (8) и интегрирование дает выражение

$$\int_{-\gamma}^0 (\eta_2(1 - e^{\lambda\theta}) - \eta_1\theta)e^{s\theta} d\theta = [\eta_1(s^{-2} - \theta s^{-1})e^{s\theta} - \eta_2(e^{(s+\lambda)\theta}(s+\lambda)^{-1} - e^{s\theta}s^{-1})] \Big|_{-\gamma}^0 =$$

$$= \frac{1}{s^2(s+\lambda)} \left\{ [(\eta_1 + \eta_2\lambda)s + \eta_1\lambda] - [(\eta_1\gamma + \eta_2 - \eta_2e^{-\lambda\gamma})s^2 + (\eta_1 + \eta_1\gamma\lambda + \eta_2\lambda)s + \eta_1\lambda] e^{-s\gamma} \right\} \equiv$$

$$\equiv a_1 \frac{s + b_1}{s^2(s + \lambda)} + a_2 \frac{s^2 + b_2s + b_3}{s^2(s + \lambda)} e^{-s\gamma}.$$

Это означает, что при подобной аппроксимации ядра функционально-дифференциальное уравнение (9) в рамках рассмотренной модели может считаться и

дифференциально-разностным. Действительно, уравнение (8) с учетом полученного выражения может быть записано в виде

$$[B_d(s) - A_n(s)\alpha_1 e^{-\tau_1 s} - A_{n1}(s)e^{-\tau_2 s} - A_{n2}(s)e^{-(\tau_2+\gamma)s}]Z(s) = A_n(s)X(s),$$

$$Y(s) = [\alpha_1 e^{-\tau_1 s} + \frac{a_1(s + b_1)}{s^2(s + \lambda)} e^{-\tau_2 s} + \frac{a_2(s^2 + b_2s + b_3)}{s^2(s + \lambda)} e^{-(\tau_2+\gamma)s}]Z(s).$$

Здесь

$$B_d(s) = s^2(s + \lambda)B(s), \quad A_n(s) = s^2(s + \lambda)A(s),$$

$$A_{n1}(s) = a_1(s + b_1)A(s), \quad A_{n2}(s) = a_2(s^2 + b_2s + b_3)A(s).$$

Отсюда, собственно, и следует дифференциально-разностное уравнение  $B_d(d/dt)z(t) - A_n(d/dt)\alpha_1 z(t - \tau_1) - A_{n1}(d/dt)z(t - \tau_2) - A_{n2}(d/dt)z(t - \tau_2 - \gamma) = A_n(d/dt)x(t)$ .

Аналогично, при похожем способе аппроксимации ядер, функционально-дифференциальное уравнение, отвечающее выражению (7), также может быть представлено в дифференциально-разностной форме.

Рассмотренная выше в представлениях геометрической акустики модель множественных отражений предполагает необходимость нахождения ядер – неотрицательных весовых функций, характеризующих распределение интенсивности отраженных звуковых волн, содержащих соответствующую информацию, от величины

их запаздывания. В отличие от этой модели, в модели резонансных мод акустическая среда рассматривается как резонансная система, описываемая в зависимости от геометрии озвучиваемой зоны набором соответствующих резонансных частот, и, соответственно, эхо и реверберация моделируются реакцией резонансной системы на звуковые колебания. Уравнения (3) и (4), моделирующие эхо и реверберацию, при этом записываются (при сохранении слагаемых, отвечающих за каналы прямого распространения звука) в виде

$$u(t) = \sum_{l=1}^q \alpha_l u_0(t - \tau_l) + \sum_{k=q+1}^r \int_{-\infty}^t h_k(\theta) u_0(t - \tau_k - \theta) d\theta,$$

$$U(s) = U_0(s) \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-\tau_l s} + U_0(s) \sum_{k=q+1}^r e^{-\tau_k s} H_k(s).$$

Здесь  $h_k(\theta)$  – импульсные функции каналов резонансной системы, а  $H_k(\theta)$  – их изображения,  $H_k(s) \doteq h_k(\theta)$ . Ниже, например, будет считаться, что  $H_k(s) = P_k(s)/Q_k(s)$  – это рациональная функция, в частности функция вида  $H_k(s) = d_k s / (s^2 + 2\sigma_k s + \sigma_k^2 + \omega_k^2)$ .

Как и выше, слагаемые  $\alpha_l e^{-s\tau_l}$  моделируют основные и ранние звуки, а функции  $H_k(s) = P_k(s)/Q_k(s)$  – реверберацию. Если, кроме того, принять, что функция  $F(s) = A(s)/B(s)$  является рациональной, то уравнение системы с акустической обратной связью может быть записано в виде

$$\left( W(s)B(s) - W(s)A(s) \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-s\tau_l} - A(s) \sum_{k=q+1}^r P_k(s)W_k(s)e^{-s\tau_k} \right) Z(s) = W(s)A(s)X(s), \quad (11)$$

$$Y(s) = \left( \sum_{l=1}^q \alpha_l e^{-s\tau_l} + \sum_{k=q+1}^r P_k(s)Q_k^{-1}(s)e^{-s\tau_k} \right) Z(s),$$

где  $W_k(s) = W(s)/Q_k(s)$  и  $W(s)$  – наименьшее общее кратное многочленов  $Q_k(s)$ .

Если принять, что  $W(s)B(s) = \sum_{n=0}^{N_w} b_n s^n$ ,  $W(s)A(s) = \sum_{m=0}^{M_w} a_m s^m$  и  $A(s)P_k(s)W_k(s) = \sum_{n=0}^{L_k} d_{kn} s^n$ , то уравнение (11) во временной области принимает вид дифференциально-разностного уравнения:

$$\sum_{n=0}^{N_w} b_n z^{(n)}(t) - \sum_{m=0}^{M_w} a_m \sum_{l=1}^q \alpha_l z^{(m)}(t - \tau_l) - \sum_{k=q+1}^r \sum_{n=0}^{L_k} d_{kn} p^n z^{(n)}(t - \tau_k) = \sum_{m=0}^{M_w} a_m x^{(m)}(t). \quad (12)$$

Если ограничиться одним каналом прямого и одним – распределенного распространения звука, а также принять, что

$$\left( (s^2 + 2\sigma s + \omega_\rho^2)(B(s) - \alpha_1 A(s)e^{-s\tau_1}) - \beta s A(s)e^{-s\tau_2} \right) Z(s) = A(s)(s^2 + 2\sigma s + \omega_\rho^2) X(s).$$

Отсюда, в свою очередь, следует, что дифференциально-разностное уравнение (12) резонансной модели системы с аку-

$$\begin{aligned} (p^2 + 2\sigma p + \omega_\rho^2)B(p)z(t) &= \alpha_1(p^2 + 2\sigma p + \omega_\rho^2)A(p)z(t - \tau_1) + \\ &+ \beta p A(p)z(t - \tau_2) + (p^2 + 2\sigma p + \omega_\rho^2)A(p)x(t), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования по времени  $t$ .

Очевидно, что если степень многочлена  $A(p)$  меньше степени многочлена  $B(p)$ , то уравнение (13) относится к клас-

$H_2(s) = \beta s / (s^2 + 2\sigma s + \omega_\rho^2)$ , то уравнение (11) принимает вид

стической обратной связью в рассмотренном частном случае можно представить, используя операторную форму, в виде

су разностного типа, а если степени одинаковы – к классу нейтрального типа, как, например, в случае  $F(s) = A(s)/B(s) = \mu = const$ .

### Заключение

Представленные выше модели систем с акустической обратной связью обеспечивают, по существу, важное, но только первое приближение к действительности; в них, в частности, не учитывается возможность возникновения в трактах распространения звука нелинейных искажений, причиной которых может стать в первую очередь нелинейность оператора  $F(\cdot)$ , а также нестабильность распределения вре-

мени запаздывания по величине. Нелинейность оператора  $F(\cdot)$ , во многом обусловленную нелинейностью источника звука (громкоговорителя), можно учесть в рамках модели Винера или Гаммерштейна, а в более общем случае – модели Вольтерра. Нестабильность времени запаздывания моделируется в классе функционально-дифференциальных систем с переменными или случайными параметрами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen, I. Speech processing in modern communication / I. Cohen, J. Benesty, S. Gannot. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – 342 p.
2. Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancelation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. – 642 p.
3. Кропотов, Ю.А. Алгоритм вычисления сигнала управления каналом режекции многоканальной системы передачи акустических сигналов / Ю.А. Кропотов // Вопросы радиоэлектроники. - 2010. - Т. 1. - № 1. - С. 57-60.
4. Беллман, Р. Дифференциально-разностные уравнения / Р. Беллман, К. Кук. – М.: Мир, 1967. – 548 с.
5. Kropotov, Y.A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis / Y.A. Kropotov, V.A. Ermolaev // International Siberian Conference

- on Control and Communications, SIBCON 2015: Proceedings. - 2015.
6. Кропотов, Ю.А. Методы проектирования телекоммуникационных информационно-управляющих систем аудиообмена в сложной помеховой обстановке / Ю.А. Кропотов, А.А. Белов, А.Ю. Проскураков, А.А. Колпаков // Системы управления, связи и безопасности. - 2015. - № 2. - С. 165-183.
  7. Хейл, Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений / Дж. Хейл. - М.: Мир, 1984. - 421 с.
  1. Cohen, I. Speech processing in modern communication / I. Cohen, J. Benesty, S. Gannot. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. - 342 p.
  2. Hansler, E. Topics in acoustic echo and noise control: Selected methods for the cancelation of acoustic echoes, the reduction of background noise, and speech processing / E. Hansler, G. Schmidt. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. - 642 p.
  3. Kropotov, Yu.A. Algorithm for control signal computation of rejection channel multichannel system for acoustic signal transmission / Yu.A. Kropotov // *Problems of Radio-electronics*. - 2010. - Vol.1. - No.1. - pp. 57-60.
  4. Bellman, R. *Differential-Difference Equations* / R. Bellman, K. Cook. - M.: World, 1967. - pp. 548.
  5. Kropotov, Y.A. Algorithms for processing acoustic signals in telecommunication systems by local parametric methods of analysis / Y.A. Kropotov, V.A. Ermolaev // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015: Proceedings. - 2015.
  8. Agarwal, R.P. Nonoscillation theory of functional differential equations / R.P. Agarwal, L. Berezansky, E. Braverman, G. Domoshitsky. - New York: Springer, 2012. - 520 p.
  9. Kolmanovskii, V. Introduction to the theory and applications of functional differential equations / V. Kolmanovskii, A. Myshkis. - Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999. - 648 p.
  10. Kolmanovskii, V.B. Stability of functional differential equations / V.B. Kolmanovskii, V.R. Nosov. - London, New York: Academic Press, 1986. - 217 p.
  6. Kropotov, Yu.A. Methods for designing telecommunication information-control systems of radio-exchange in complex noise situation / Yu.A. Kropotov, A.A. Belov, A.Yu. Proskuruakov, A.A. Kolpakov // *Systems of Control, Communication and Safety*. -2015. - No.2. - pp. 165-183.
  7. Hail, J. *Theory of Functional-Differential Equations* / J. Hail. - M.: World, 1984. - pp. 421.
  8. Agarwal, R.P. Nonoscillation theory of functional differential equations / R.P. Agarwal, L. Berezansky, E. Braverman, G. Domoshitsky. - New York: Springer, 2012. - 520 p.
  9. Kolmanovskii, V. Introduction to the theory and applications of functional differential equations / V. Kolmanovskii, A. Myshkis. - Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999. - 648 p.
  10. Kolmanovskii, V.B. Stability of functional differential equations / V.B. Kolmanovskii, V.R. Nosov. - London, New York: Academic Press, 1986. - 217 p.

*Статья поступила в редакцию 7.03.19*

*Рецензент: д.т.н., профессор Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Жизняков А.Л.*

*Статья принята к публикации 22. 03. 19.*

#### Сведения об авторах:

**Ермолаев Валерий Андреевич**, к.т.н., доцент кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

**Кропотов Юрий Анатольевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электроника и вычислительная техника»

**Yermolaev Valery Andreevich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Electronics and Computer Equipment", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Kropotov Yuri Anatolievich**, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. "Electronics and Computer

Equipment", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Холкина Наталья Евгеньевна**, ст. преподаватель кафедры «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, e-mail: kaf-eivt@yandex.ru.

Equipment", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).

**Kholkina Natalia Eevgenievna**, Senior Lecturer of the Dep. "Electronics and Computer Equipment", Murom Institute (Branch) of Stoletovs State University of Vladimir, e-mail: [kaf-eivt@yandex.ru](mailto:kaf-eivt@yandex.ru).