

# Адаптивная система активного гашения (АСАГ) шума в акустических волноводах

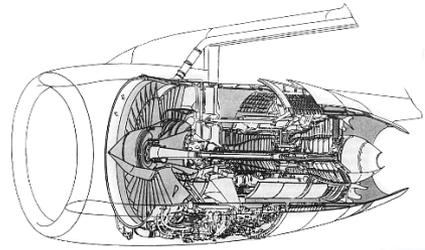
Быков К.В.

**Цель работы:** Исследование и проектирование адаптивных систем гашения акустических полей.

- Задачи:**
- Провести анализ различных источников акустических шумов и их воздействия;
  - Проанализировать существующие адаптивные средства гашения шума объектов ЭА;
  - Исследовать математические модели и алгоритмов управления АСАГ;
  - Исследовать объекты управления и принципы построения имитационных моделей методом электроакустических аналогий;
  - Провести математическое моделирование объектов сенсорного блока;
  - Разработать структуру адаптивной системы активного гашения шума;
  - На математической и физической моделях акустического длинного волновода провести сравнительное исследование эффективности компенсации адаптивной системы;

# Анализ источников шума

акустический шум турбин двигателей



Вибрация и акустический шум от мощных энергоустановок и промышленных источников.

*Источники акустических воздействий*

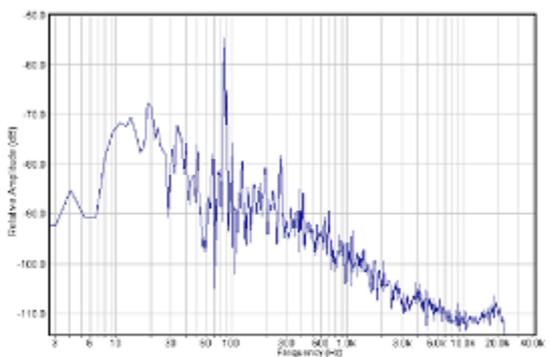
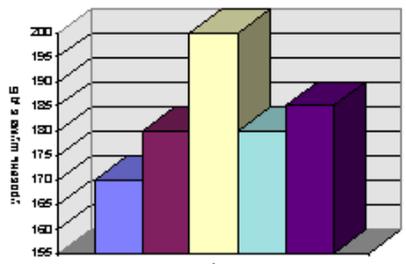
Офисная оргтехника является источником акустических шумов



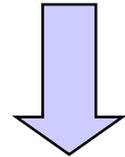
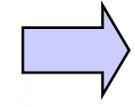
Шум возникающий при движении автотранспорта а также при работе ДВС



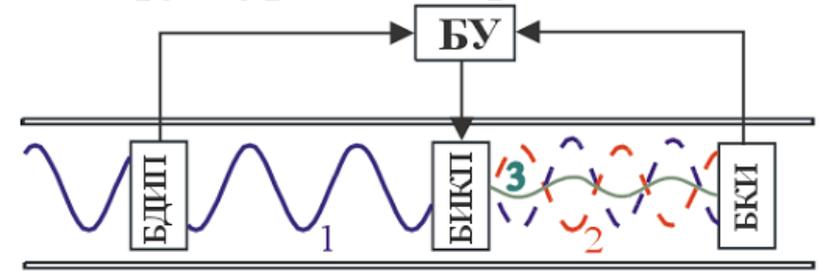
ударные акустические воздействия возникающие при работе двигателей морских судов



Спектр шума излучаемого ЭА



## Структура одномерной АСАГ



Условные обозначения:

- БДИП - блок датчиков исходного поля
- БИКП - блок излучателей гасящего поля
- БКИ - блок контрольных измерителей
- БУ - блок управления

# Структурная схема одномерной САГ

## Условные обозначения

$P_{и}$  - звуковое давление исходной звуковой волны;

$P_{к}$  - результирующее звуковое давление;

$V_a, V_b$  - сигналы на выходах блоков излучения и управления;

### Передаточные функции:

$W_1, W_2$  - передаточные функции участков волновода;

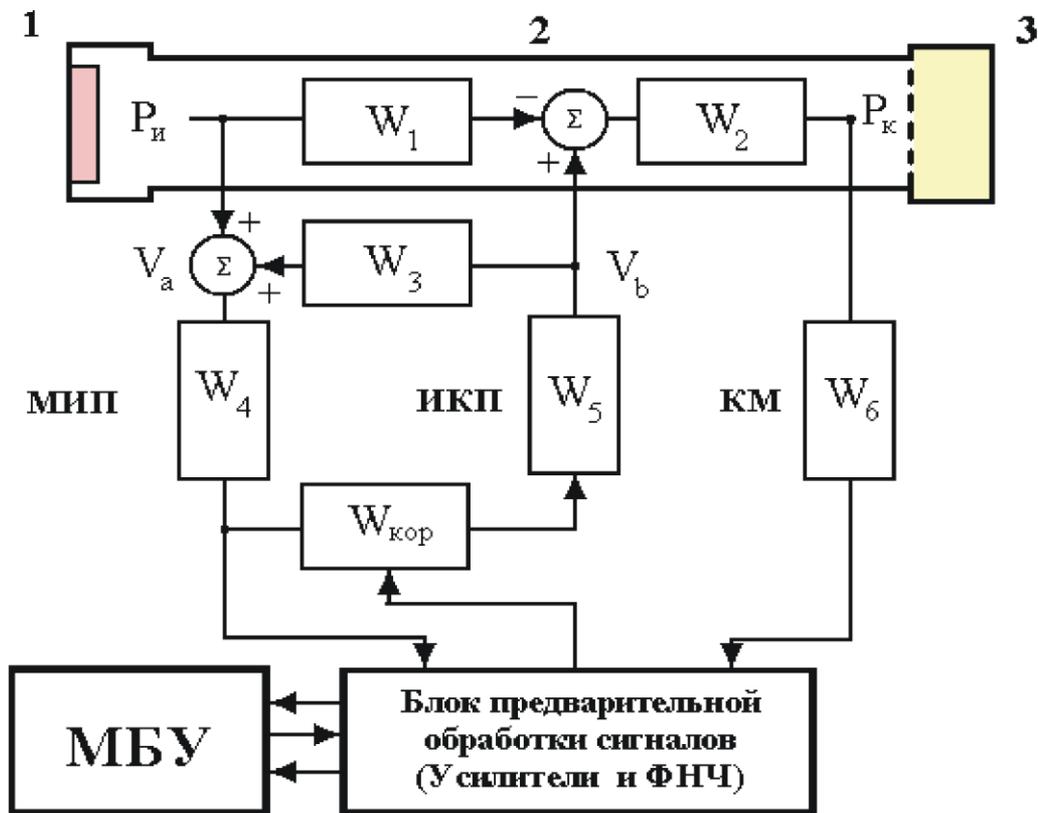
$W_3$  - передаточная функция акустической обратной связи

$W_4, W_6$  - передаточная функция микрофона исходного поля и контрольного микрофона;

$W_5$  - передаточная функция источника контрольного поля;

$W_{кор}$  - корректирующий блок;

## Структура АСАГ с учетом волновой обратной связи $W_3$



$$V_A = P_{и} W_4 + V_B W_5 G_1 W_4;$$

$$V_B = V_A W_{кор};$$

$P_d = (P_{и} (W_1 + W_2) + V_B W_5 W_2) W_6$ ,  
 Оптимальная передаточная функция блока управления, обеспечивающая полное гашения шум:

$$W_{opt} = \frac{-(W_1 + W_2)}{(W_4 W_5 W_2 - W_5 W_3 W_4 (W_1 + W_2))}$$

МИП - микрофон исходного поля  
 ИКП - источник корректирующего поля  
 КМ - контрольный микрофон  
 МБУ - модуль блока управления

# Исследование математической модели акустического волновода методом электроакустических аналогий

$m = \rho \cdot h \cdot S$  - масса воздуха;  
 $C = \frac{V}{\gamma \cdot \rho_0 \cdot S^2}$  - гибкость воздуха;

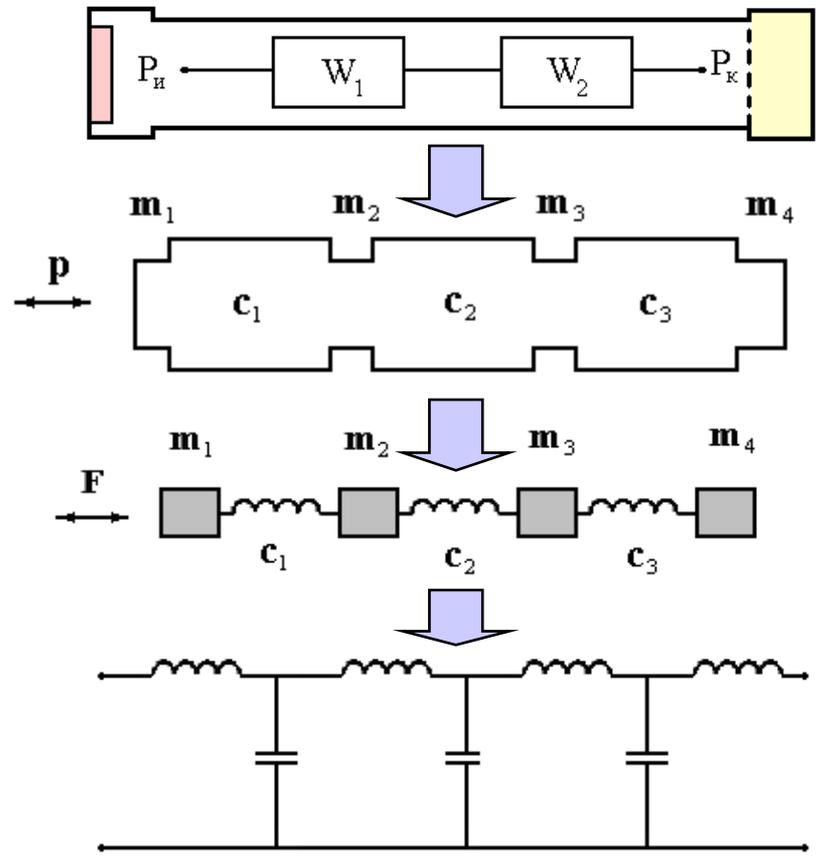
$f_0 = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{h \cdot V}}$

где  $\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  - длина трубки, м;  $S$  - сечение трубки, м<sup>3</sup>,  $V$  - объем воздуха в полости, м<sup>3</sup>;  $\gamma = 1,41$  (для воздуха);  $\rho_0$  - нормальное атмосферное давление, Па;  $S$  - сечение горла полости, м<sup>3</sup>

$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$      $\Phi_v(x,t) = A_v \cos(k_v x + \varphi_{vx}) \cos(k_v ct + \varphi_{vt})$

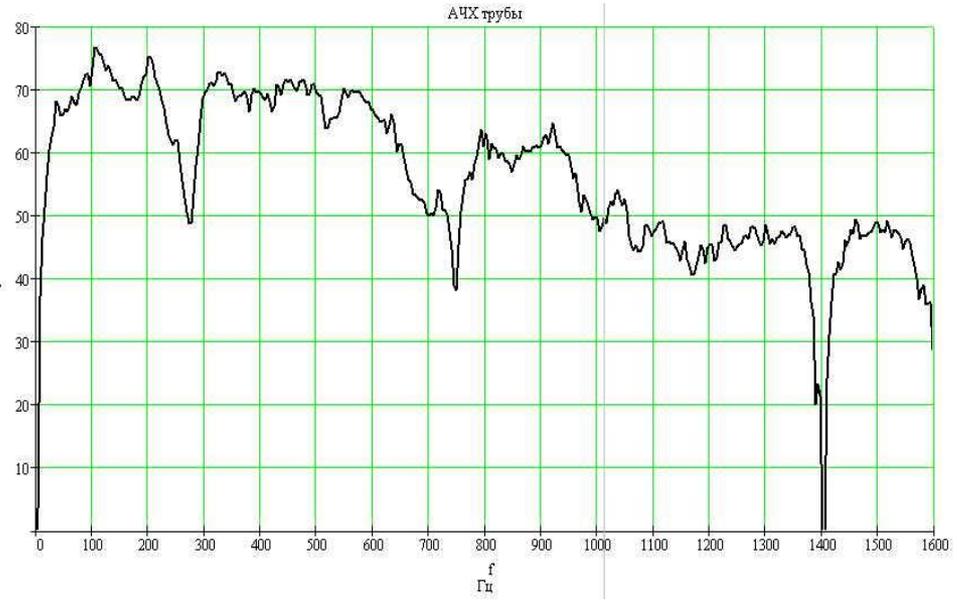
$A_v \cos(\varphi_{vx}) \cos(\omega_v \cdot t + \varphi_{vt}) = A_v \cos(k_v l + \varphi_{vx}) \cos(\omega_v \cdot t + \varphi_{vt}) = 0$

$\Phi_v(x,t) = \Phi_v(x) \cos(\omega_v \cdot t + \varphi_{vt})$      $\Phi_v(x) = A_v \sin \frac{v\pi x}{l}$      $\omega_v = k_v c = v\pi c/l$

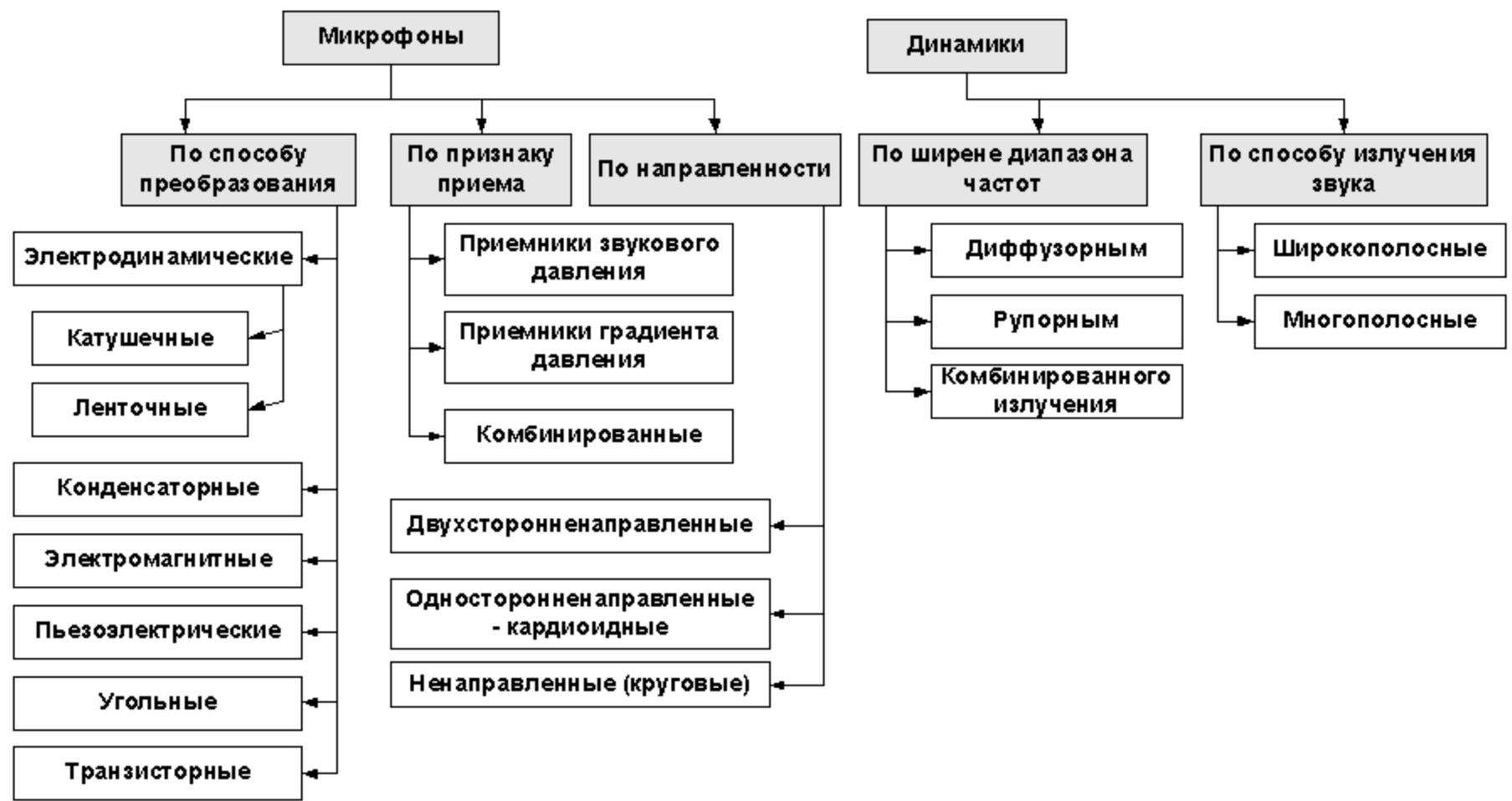


$W(s) = \frac{k_1}{a_1 s^2 + b_1 s + 1} \cdot \frac{k_2}{a_2 s^2 + b_2 s + 1} \dots$

$\Phi(x,t) = \sum_v \Phi_v(x) \cos(\omega_v t + \varphi_v) = \sum_v A_v \sin \frac{v\pi x}{l} \cos(\omega_v \cdot t + \varphi_v)$



# Исследование вариантов реализации измерительных и компенсирующих блоков



# Исследование математической модели микрофона



## Микрофон как электромеханический преобразователь

$$\begin{cases} U = A \cdot V + B \cdot F \\ I = C \cdot V + D \cdot F \end{cases} \quad K = \frac{F_0}{I} = \frac{E_0}{V} = B \cdot l$$

$$\begin{cases} V = D \cdot U + B \cdot I \\ F = C \cdot U + A \cdot I \end{cases} \quad E = \frac{U_0 \cdot V}{j \cdot \omega \cdot d} \quad F = \frac{U_0 \cdot I}{j \cdot \omega \cdot d}$$

$$\frac{F_0}{I} = \frac{U_0}{V} = \frac{1}{D} = K \quad K = \frac{F}{I} = \frac{E}{V} = \frac{U_0}{j \cdot \omega \cdot d}$$

Собственное механическое сопротивление

$$\xi_0 = r_1 + j\omega \cdot m_1 + \frac{1}{j\omega \cdot c_\Sigma}$$

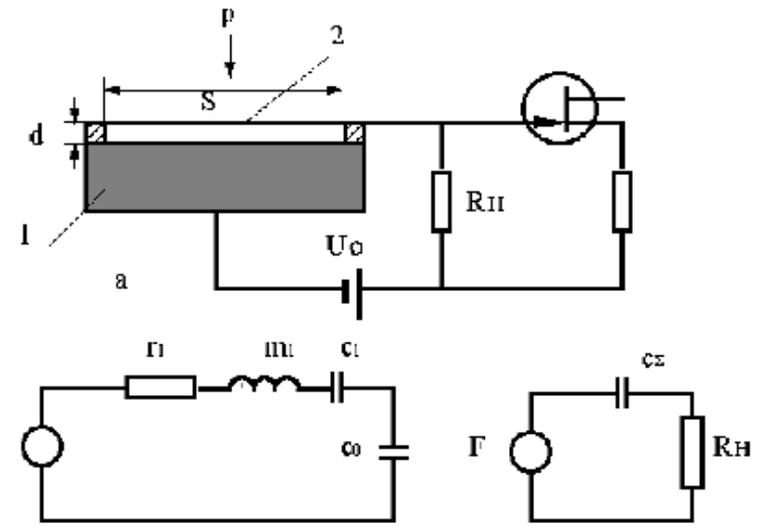
$$c_\Sigma = \frac{c_1 \cdot c_0}{c_1 + c_0} \quad \text{- гибкость подвижной системы микрофонного капсуля}$$

$c_0$  - гибкость объема воздуха под мембраной

$c_1$  - гибкость мембраны

$$\xi_0 = j\omega \cdot m + \frac{1}{j\omega \cdot c_\Sigma} = \frac{1}{j\omega \cdot c_\Sigma} (1 - \omega^2 \cdot m_1 \cdot c_\Sigma) = \frac{1}{j\omega \cdot c_\Sigma} (1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m_1 \cdot c_\Sigma}} \quad Z_0 = \frac{1}{j\omega \cdot c_\Sigma}$$



## Чувствительность микрофона как электромеханического преобразователя

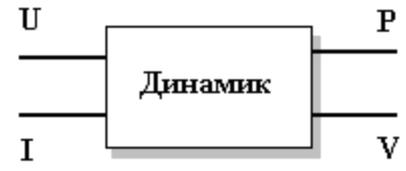
$$E = \frac{U}{P} \quad a_{ak} = \frac{F}{P} \quad \text{- акустическая характеристика}$$

$$a_{mex} = \frac{K}{\xi_0 + \xi_{en}} \quad \text{- механическая характеристика}$$

$$a_{эл} = \frac{Z_n}{Z_0 + Z_{en}} \quad \text{- электрическая характеристика}$$

$$E = a_{ak} \cdot a_{mex} \cdot a_{эл} = a_{ak} \cdot \frac{K}{\xi + \frac{K^2}{Z_0 + Z_{en}}} \cdot \frac{Z_n}{Z_n + Z_0}$$

# Исследование математической модели динамика



## Динамик как электромеханический преобразователь

$$\begin{cases} U = A \cdot V + B \cdot F \\ I = C \cdot V + D \cdot F \end{cases} \quad \begin{cases} B = D \cdot Z_0 = \frac{Z_0}{K} \\ C = D \cdot \xi_0 = \frac{\xi_0}{K} \end{cases}$$

$$F = B_0 \cdot L_k \cdot I \cdot n \quad A = \frac{1 + B \cdot C}{D} = K \cdot \left(1 + \frac{\xi_0 \cdot Z_0}{K^2}\right)$$

$$K = B_0 \cdot L_k \cdot n \quad \begin{cases} U = K \cdot \left(1 + \frac{\xi_0 \cdot Z_0}{K}\right) \cdot V + \frac{Z_0}{K} \cdot F \\ I = \frac{\xi_0}{K} \cdot V + \frac{1}{K} \cdot F \end{cases}$$

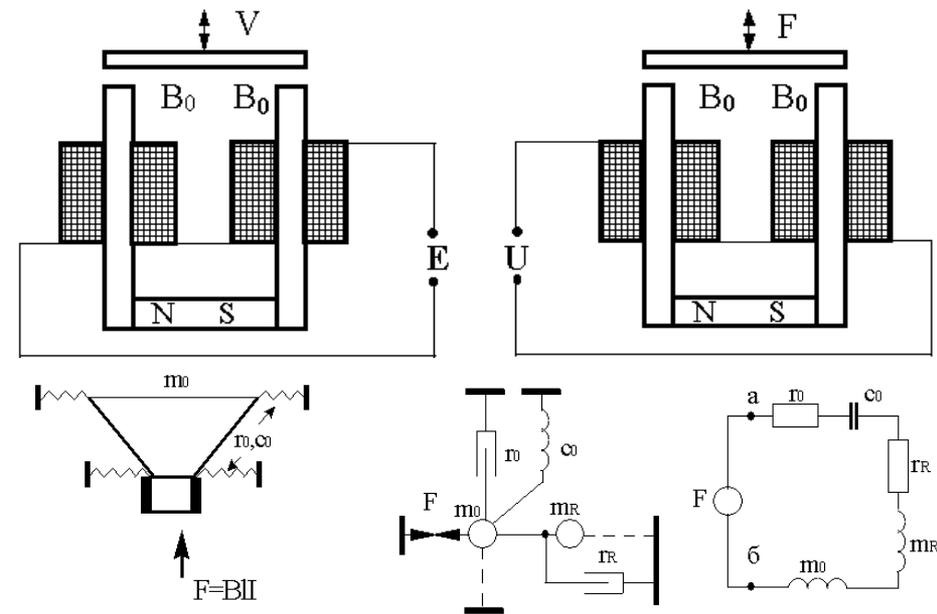
$$\frac{U}{I} = \frac{B}{D} = Z_0$$

$B_0$  - индукция магнитной цепи в отсутствие колебаний;  
 $L_k$  - индуктивность катушки;  $N$  - число витков катушки;  
 $Z_0$  - собственное электрическое сопротивление;  
 - собственное механическое сопротивление подвижной части преобразователя;

### Сопротивление динамика

$$Z = \frac{K \cdot \left(1 + \frac{\xi_0 \cdot Z_0}{K^2}\right) + \xi \cdot \frac{Z_0}{K}}{\frac{\xi_0}{K} + \frac{\xi}{K}} = Z_0 + \frac{K^2}{\xi_0 + \xi} = Z_0 + Z_{\text{вн}}$$

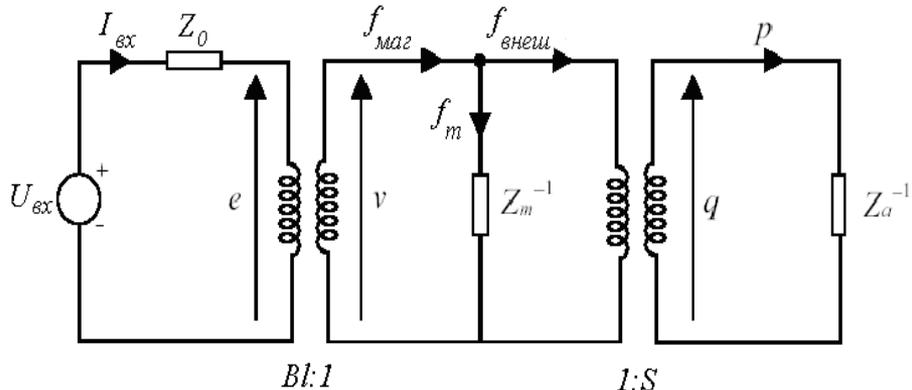
$$Z_{\text{вн}} = \frac{K^2}{\xi_0 + \xi}$$



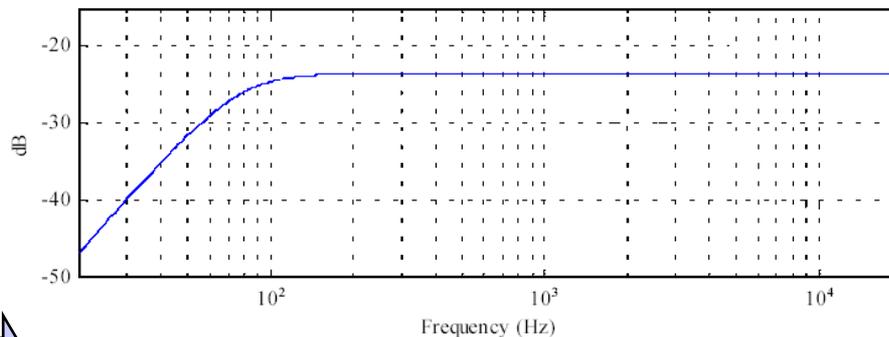
- $R_m$  - механическое сопротивление динамика;
- $C_m$  - упругость диффузора;
- $M_m$  - масса диафрагмы и контура;
- $C_{me} = M_m / (B \cdot l)^2$  - эл. емкость обусл. механической массой;
- $L_{me} = C_m \cdot (B \cdot l)^2$  - индуктивность обусл. упругостью диффузора;
- $R_{me} = (B \cdot l)^2 / R_m$  - сопротивление обусл. мех. потерями на диффузоре;
- $1/\omega_0^2 = C_{me} \cdot L_{me} \quad Q_m = \omega_0 \cdot R_{me} \cdot C_{me} \quad Q_e = \omega_0 R_e \cdot C_{me}$
- $Q_1 = Q_e \cdot Q_m / (Q_e + Q_m)$  - общая добротность на частоте  $\omega_0$
- $W_5(\omega) = (j\omega/\omega_0)^2 / (1 + (j\omega/\omega_0)^2 + (j\omega/\omega_0) \cdot Q_1^{-1})$

# Результаты моделирования

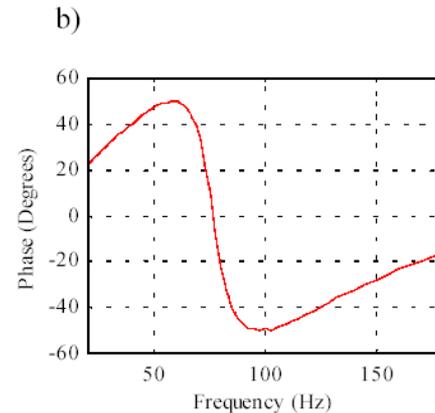
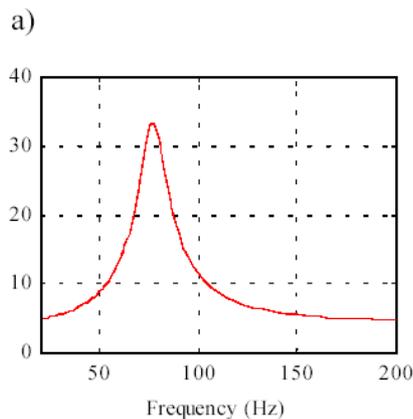
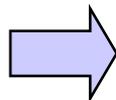
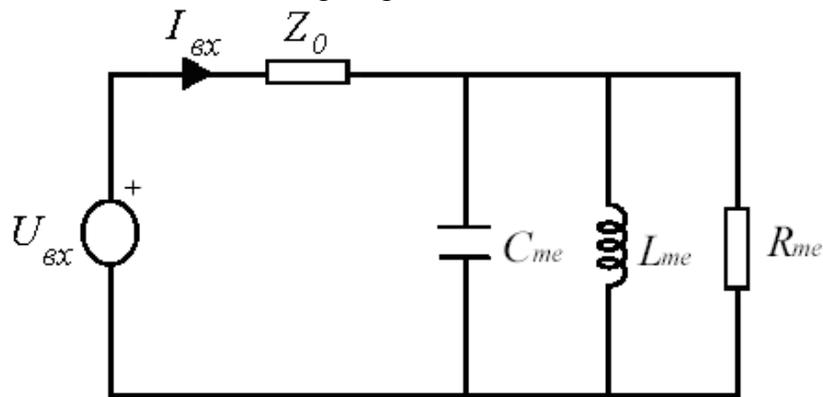
Эквивалентные схемы преобразователя



Частотные характеристики преобразователя



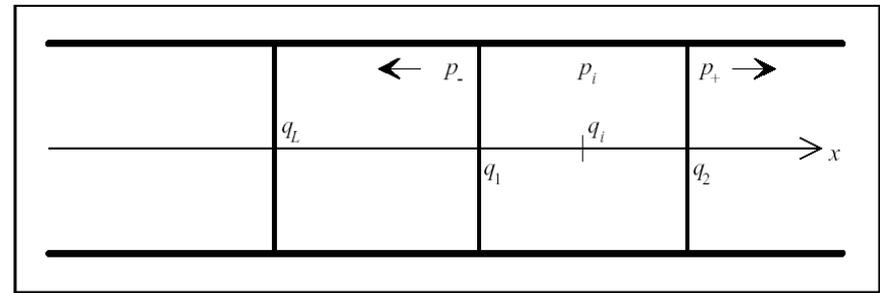
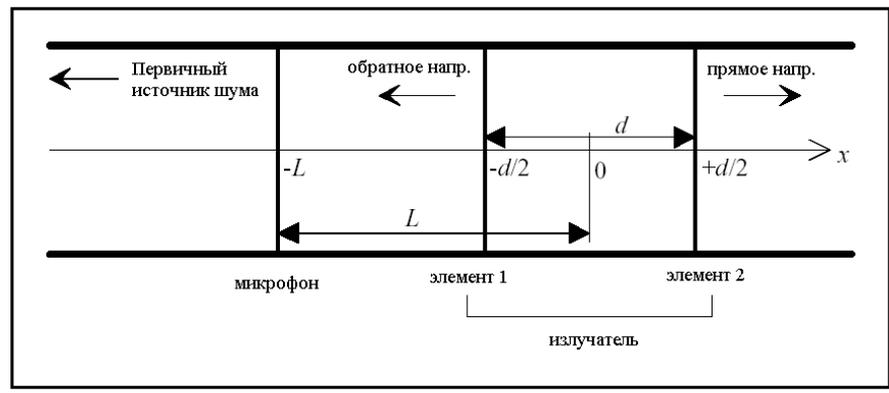
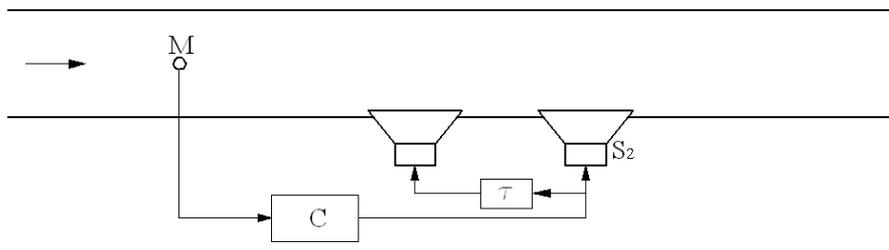
Эквивалентная электроакустическая схема преобразователя



Эквивалентная электрическая схема преобразователя на низких частотах

Комплексное электрическое сопротивление а –амплитуда, б –фаза;

# Исследование методов компенсации волновой обратной связи W3 с помощью двух элементного ИКП



Характеристики поля в центре акустической трубы

$$q_i = \frac{p_i \cdot S}{\rho_0 \cdot c_0}$$

$$p_i = p_L \cdot e^{-jkL}$$

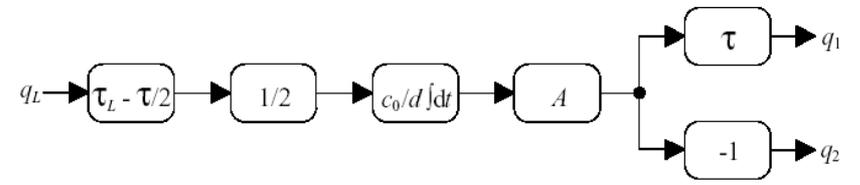
$$q_i = q_L \cdot e^{-jkL}$$

$$q_1 = + \frac{q_i \cdot e^{-jkd/2}}{2 \cdot j \sin(kd)}, x = -\frac{d}{2}$$

$$q_2 = - \frac{q_i \cdot e^{+jkd/2}}{2 j \sin(kd)}, x = +\frac{d}{2}$$

$$\frac{1}{2 \cdot j \sin(kd)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0/d}{j\omega} \cdot \frac{kd}{\sin(kd)}$$

$$A = \frac{k \cdot d}{\sin(k \cdot d)}$$

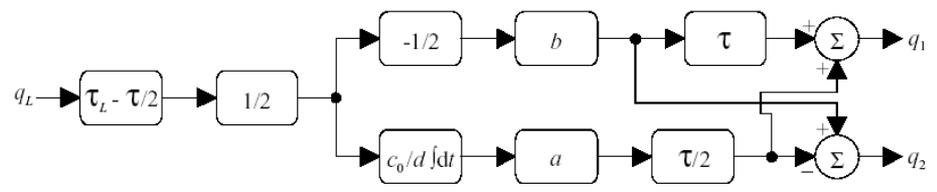


$$q_1 = + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a}{jkd} - \frac{b}{2} \cdot e^{-jkd/2} \right) \cdot q_i, x = -\frac{d}{2}$$

$$q_2 = - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{a}{jkd} + \frac{b}{2} \cdot e^{+jkd/2} \right) \cdot q_i, x = +\frac{d}{2}$$

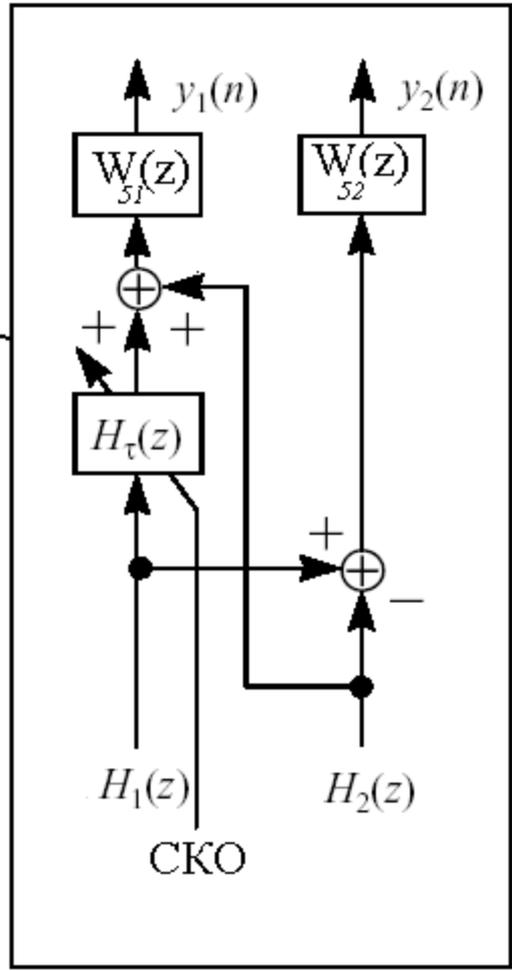
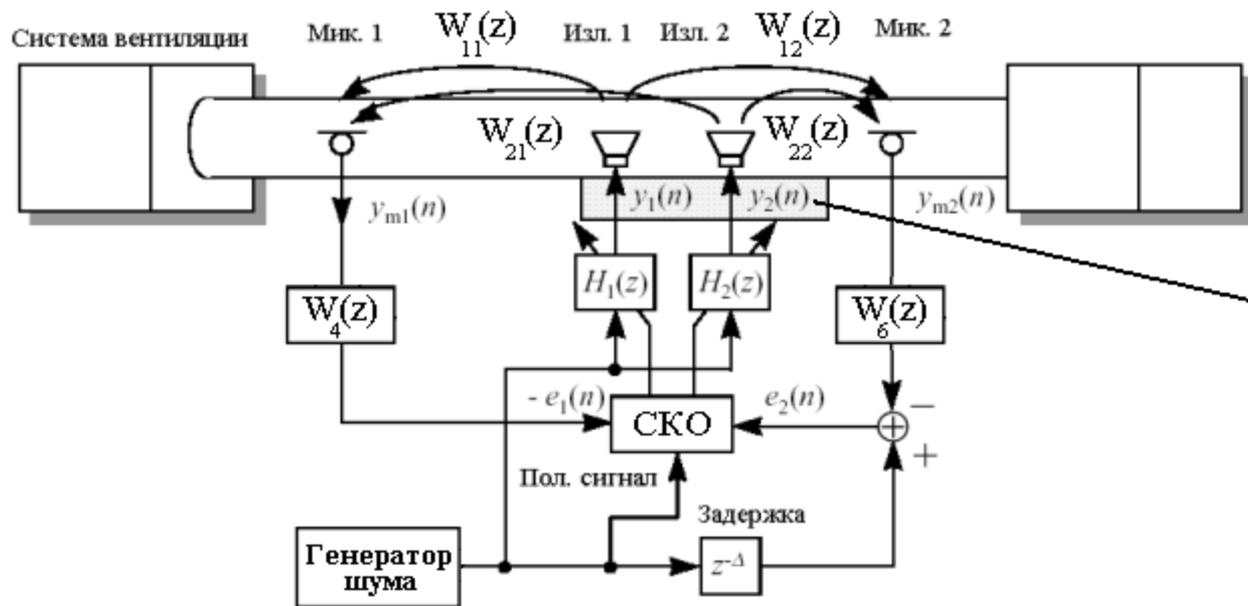
$$a = \frac{1}{\cos^2(kd/2)} \cdot \frac{kd/2}{\sin(kd/2)}$$

$$b = \frac{1}{\cos^2(kd/2)}$$

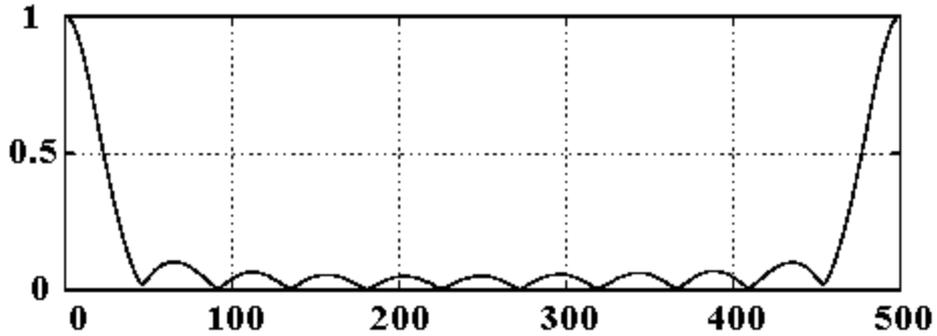


$W_3 \rightarrow \min$

# Вариант реализации АСАГ



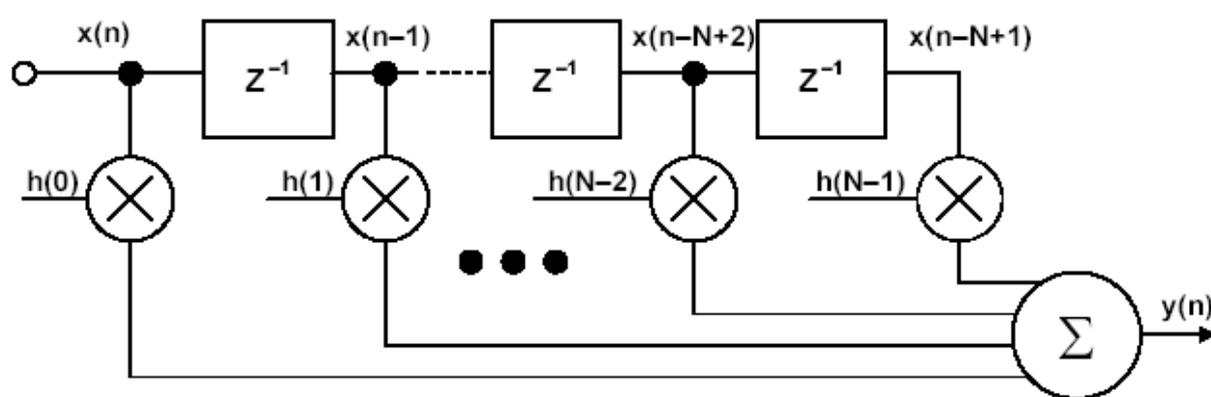
Отношение выхода  
к входу



Частота (Гц)

Характеристика направленности источника:  $0 < k < 1$ ;  
 0 - идеально направленный, 1 - ненаправленный

# Фильтр с конечной импульсной характеристикой порядка N



- $y(n) = h(n) * x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(n-k)$
- \* = символ свертки
- Требуется N операций умножения с накоплением для каждого выходного отсчета

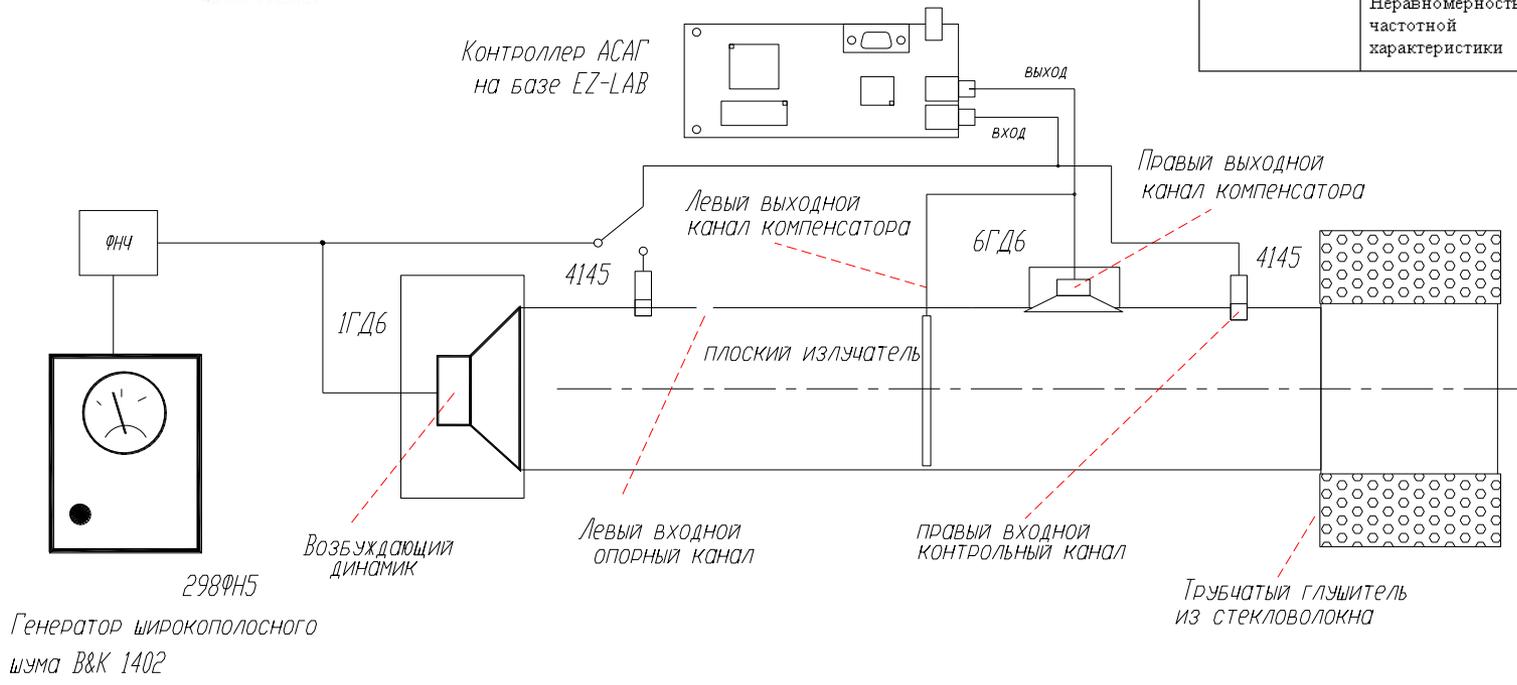
## Характеристики КИХ фильтров

- Импульсная характеристика имеет конечную длительность (N циклов)
- Линейная фаза, постоянная групповая задержка (N должно быть нечетным)
- Нет аналогового эквивалента
- Безусловная устойчивость
- Может быть адаптивным
- Вычислительные преимущества при децимации на выходе
- Легкое понимание принципов и проектирование
  - ◆ Синтез произвольной частотной характеристики и использование обратного БПФ

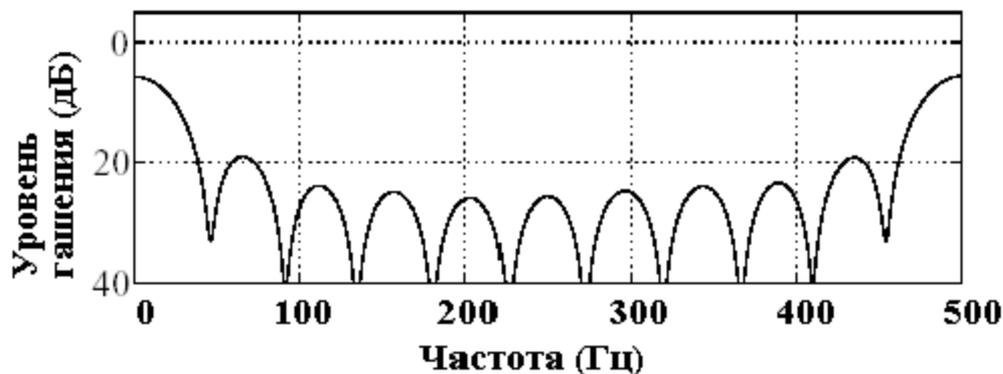
# Функциональная схема АСАГ



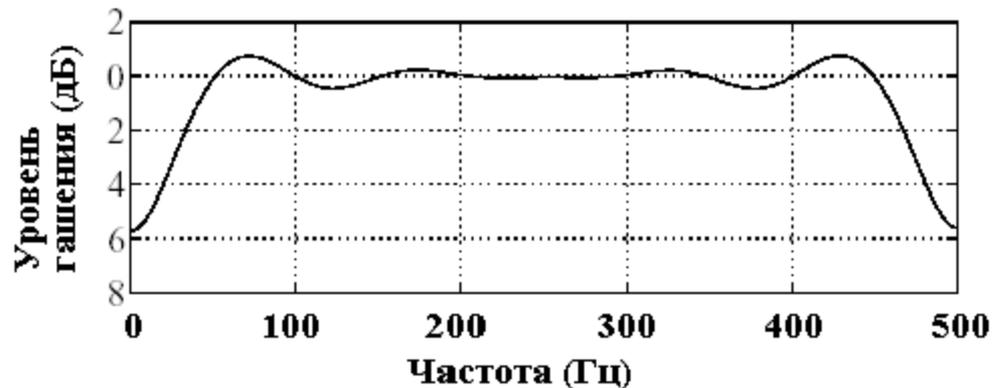
Название	Название параметра	Значение
Генератор шума	Диапазон частот	20Гц – 20 кГц
	Распределение	Нормальное
	Выходное сопротивление, $r_{вых}$	6-600 Ом
	Выходное напряжение, $U_{вых}$	4-40 В
Низкочастотный динамик 1 ГДб	Диапазон воспроизводимых частот на уровне 14 Дб	60 Гц – 5кГц
	Мощность	5 Вт
Низкочастотный динамик 6 ГДб	Диапазон воспроизводимых частот на уровне 14 Дб	60 Гц – 5кГц
	Мощность	5 Вт
Микрофон 4145	Диапазон частот	2.6 Гц-18.5 кГц
	Неравномерность частотной характеристики	$\pm 2$ Дб



# Зависимость уровня гашения шума АСАГ в прямом и обратном направлениях



Зависимость уровня гашения АСАГ в прямом направлении от частоты



Зависимость уровня гашения АСАГ в обратном направлении от частоты

На графике видно, что на средних частотах диапазона в прямом направлении (верхний график) достигается значительное гашения уровня шума. Однако на низких и верхних частотах диапазона уровень гашения сигнала составляет только 6 дБ.

Из нижнего графика видно, что гашение на средних частотах диапазона в обратном направлении практически нет т.е. излучатель является направленным, акустическая обратная связь обусловленная этим фактором исключена. На крайних границах диапазона гашение сигнала составляет 6 дБ .

## Выводы

### В результате работы были решены следующие задачи:

- Проведен анализ различных акустических шумов и их воздействия;
- Проанализированы существующие адаптивные алгоритмы и выбрана модель АСАГ с функциональной обратной связью реализующая адаптивный алгоритм идентификации объекта.
- Исследован метод электромеханических аналогий на основе которого были предложены математические модели объектов сенсорного блока.
- Предложен вариант реализации направленного излучателя минимизирующего акустическую обратную связь.
- Исследование работы АСАГ проведенные на математической модели акустического волновода показали снижения шума на 24дБ в диапазоне частот от 60 до 600 Гц.
- Предложенный метод адаптивной подстройки исключает необходимость в предварительной настройки системы. Отпадает необходимость в точном позиционировании динамиков друг относительно друга или выравнивании акустических параметров излучателей, т.к. в процессе работы системы эти параметры учитываются автоматически. Это в свою очередь повышает общую надежность системы.

### Апробация:

Работа "Разработка экспериментального стенда для исследования систем активного снижения акустических шумов в одномерных волноводах" была представлена на конкурсе отбора на лучшие научно-технические и инновационные работы творческой молодежи по техническим наукам.