

*Канд. техн. наук Паэранд Ю. Э.  
аспирант Калашиников А. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ**

*Наведені результати моделювання амплітудно-частотних характеристик електромеханічних фільтрів з використанням метода електромеханічних аналогій. Показано вплив зміни добротності різних елементів коливальної системи на амплітудно-частотну характеристику електромеханічного фільтру.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Одним из устройств, осуществляющих фильтрацию сигналов в аппаратуре систем связи, являются электромеханические фильтры (ЭМФ), принцип работы которых основан на использовании явления механического резонанса. Данные фильтры характеризуются высокой избирательностью и стабильностью, которые возможно достичь, используя информацию о влиянии точности настройки элементов на характеристики путем моделирования амплитудно-частотных характеристик ЭМФ.

### **Анализ исследований и публикаций.**

Анализ публикаций показал, что, несмотря на наличие известных математических моделей ЭМФ [1], отсутствуют исследования, позволяющие произвести оценку влияния производственных погрешностей на параметры ЭМФ,

### **Постановка задачи.**

В настоящей работе авторами поставлена задача исследования влияния величины добротности элементов ЭМФ на получаемые амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).

### **Изложение материала и его результаты.**

Для оценки влияния элементов ЭМФ, а именно резонаторов, преобразователей, согласующего электрического контура, авторами проведено моделирование АЧХ для ЭМФ на верхнюю боковую полосу с несущей частотой 128 кГц с расчетной полосой пропускания 3,3 кГц и

максимально допустимой неравномерностью 0,11 дБ. Объектом моделирования является ЭМФ, который состоит из десяти резонаторов цилиндрической формы, работающих на крутильных колебаниях основной частоты, и двух преобразователей, работающих на изгибных колебаниях первой гармоники (рис. 1). Резонаторы механической фильтрующей системы изготавливались из элинварного сплава марки 44НХМТ. Преобразователи являются составными и представляют собой жестко соединенные друг с другом металлический резонатор из сплава 44НХМТ и пьезокерамические элементы из пьезоматериала ЦТС-35.

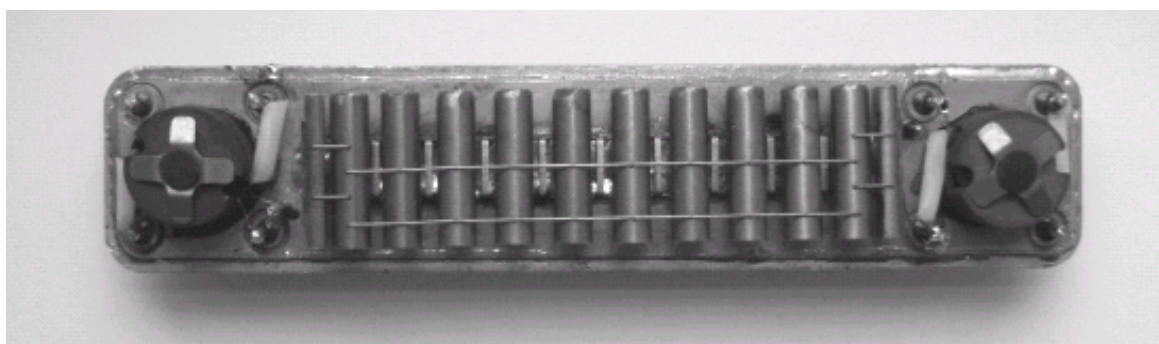


Рисунок 1 – Конструкция ЭМФ

Для проведения расчета предложена модель, построенная с использованием теории электромеханических аналогий, в основе которой лежит подобие дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в области механики и электротехники. Согласно данной модели электромеханический фильтр представлен в виде эквивалентной электрической схемы, позволяющей применить для его анализа теорию электрических цепей.

Электрические модели механических элементов ЭМФ могут быть построены в виде цепей из пассивных элементов по одной из двух известных систем электромеханических аналогий. По первой системе кинетическая энергия соответствует энергии магнитного поля, потенциальная – энергии электрического поля. Согласно второй системе аналогий, называемой еще аналогией по подвижности, наоборот, кинетическая энергия соответствует энергии электрического поля, а потенциальная энергия соответствует энергии магнитного поля. Таким образом, реальная механическая конструкция при замене ее эквивалентной электрической схемой представляется в виде динамической системы, состоящей из идеализированных упругих, инерционных и фрикционных элементов и действующих на систему внешних сил.

При моделировании использовалась эквивалентная электрическая схема ЭМФ для четного количества резонаторов (рис. 2), составленная в соответствии с первой системой электромеханических аналогий, представляющая собой последовательно-параллельное соединение резисторов, конденсаторов и индуктивностей, значения параметров которых рассчитаны по специальной методике [3].

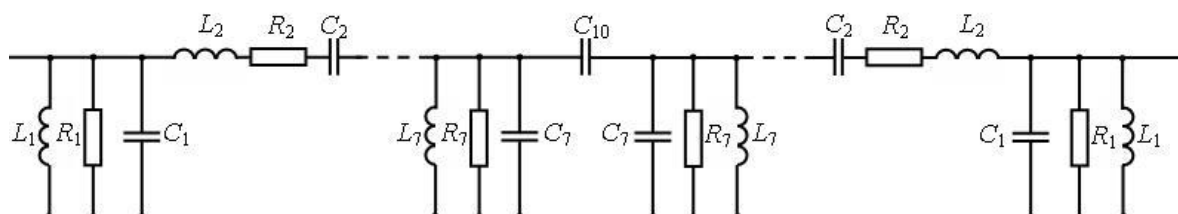


Рисунок 2 – Схема замещения ЭМФ

Расчет параметров элементов схемы замещения производился для следующих исходных данных (табл. 1).

При этом были использованы следующие расчетные формулы (табл. 2) [4,5].

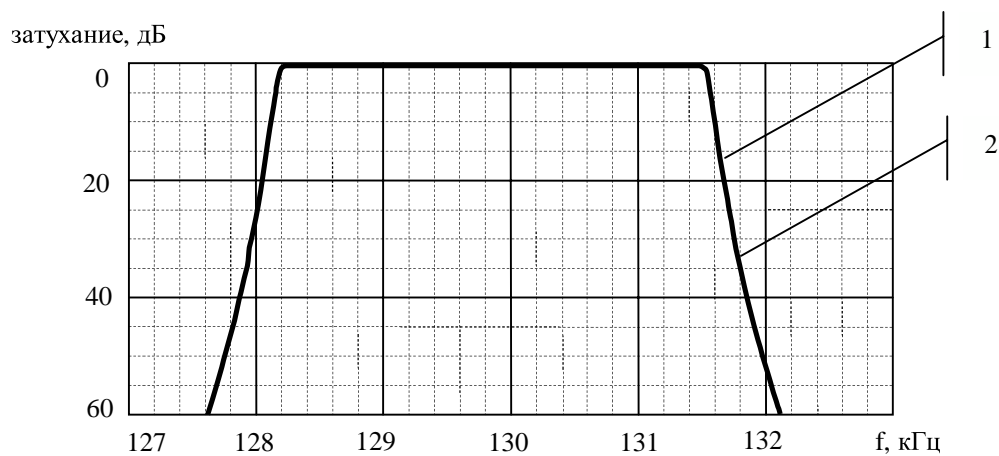
На рисунке 3 представлены результаты расчета АЧХ фильтра (кривая 1) для параметров соответствующих данным, приведенным на таблице 1, а также типовая АЧХ (кривая 2), полученная по результатам измерения изготовленных образцов ЭМФ. Как видно из рисунка, расчетная и типовая характеристики практически совпадают, что позволяет сделать вывод о высокой точности используемого метода моделирования.

Таблица 1

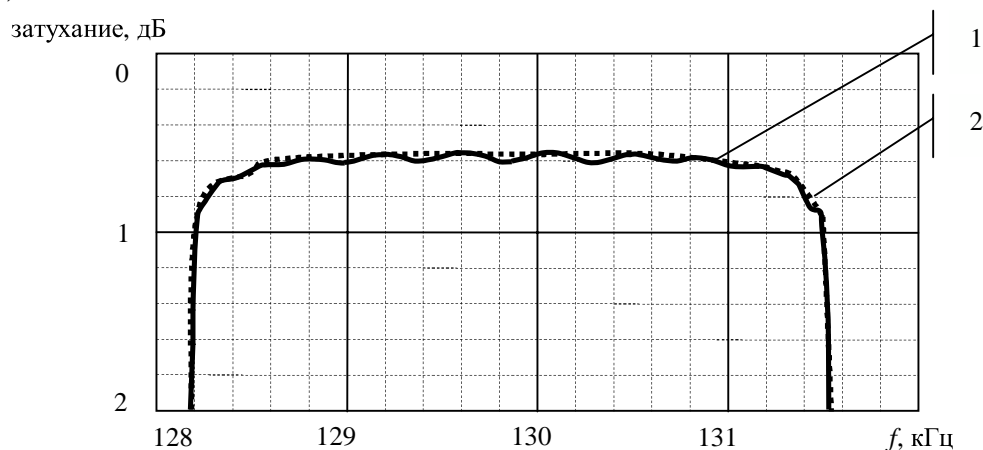
Данные для расчета фильтра	
1	2
Динамическая емкость ( $C_d$ ), пФ	$4,325 \cdot 10^{-12}$
Коэффициент электромеханической связи $K_{св}$	0,1048
Ширина полосы пропускания $\Delta f$ , Гц	3300
Добротность катушки $Q_\alpha$	120
Добротность преобразователя $Q_{пр}$	1500
Добротность резонатора $Q_p$	20000

Продолжение таблицы 1

1	2
Средняя частота $f_0$ , Гц	129840
Круговая частота $\omega_0$	815808,780
<i>Нормированные коэффициенты фильтра [4]:</i>	
$\alpha_1$	0,937356493
$\beta_2$	1,633627876
$\alpha_3$	1,819567223
$\beta_4$	1,884162812
$\alpha_5$	1,912804715
$\beta_6$	1,922180682
$\rho$	0,904762



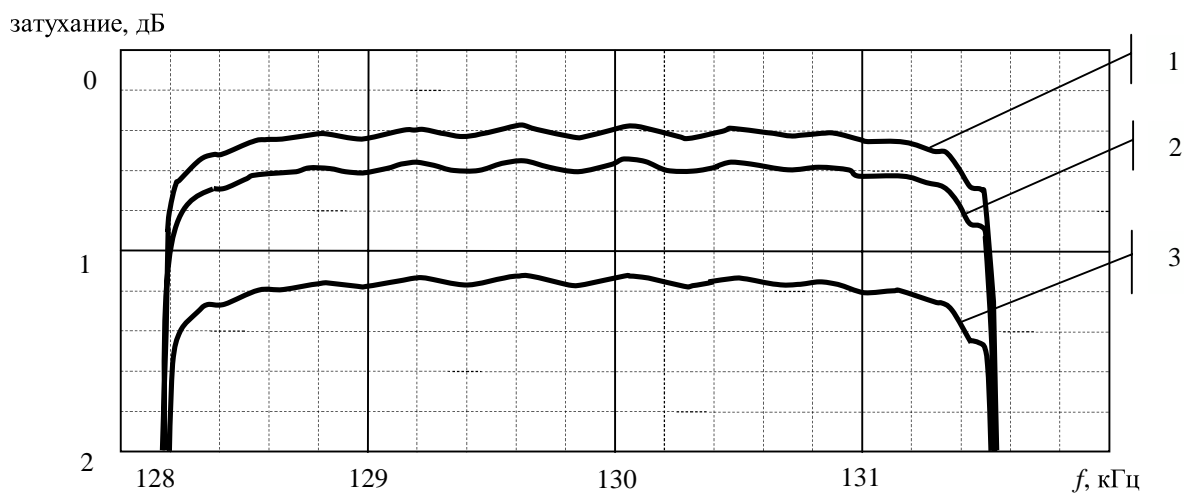
а)



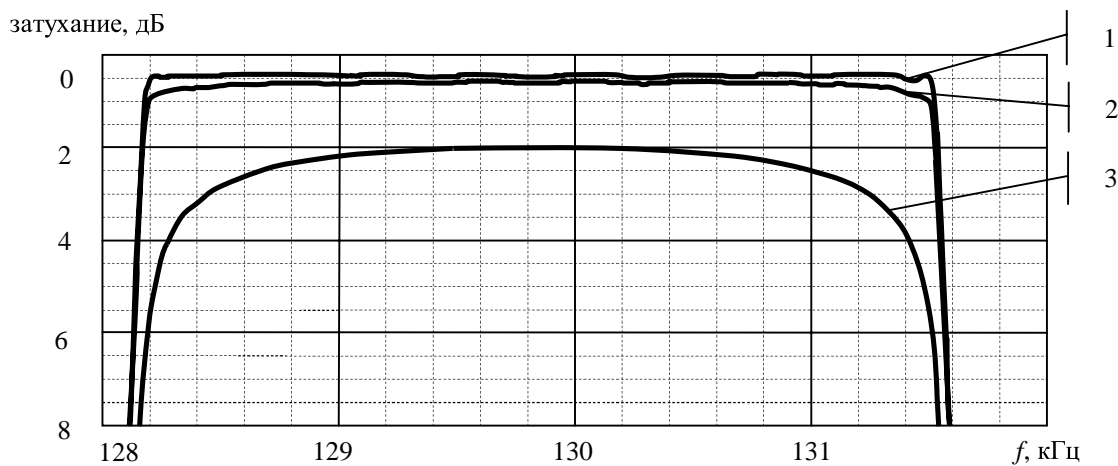
б)

Рисунок 3 – Расчетная и типовая АЧХ ЭМФ

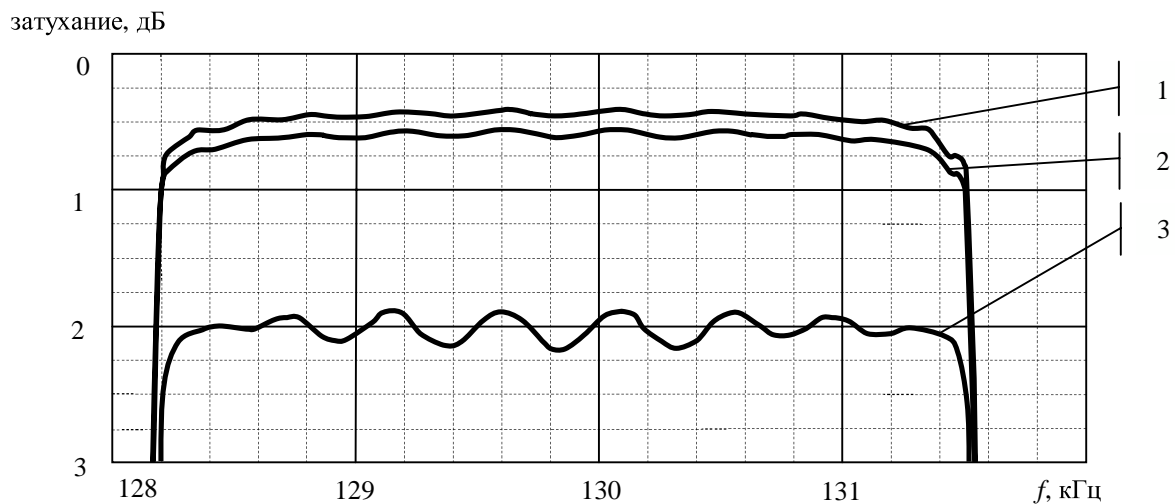
С использованием указанного выше метода моделирования авторами был проведен расчет АЧХ фильтров для различных добротностей резонаторов, преобразователей и согласующих индуктивностей. Результаты расчетов приведены на рисунках 4, 5.



а) характеристики при добротностях преобразователей  $Q=5000$  (кривая 1),  $Q=1500$  (кривая 2) и  $Q=450$  (кривая 3)

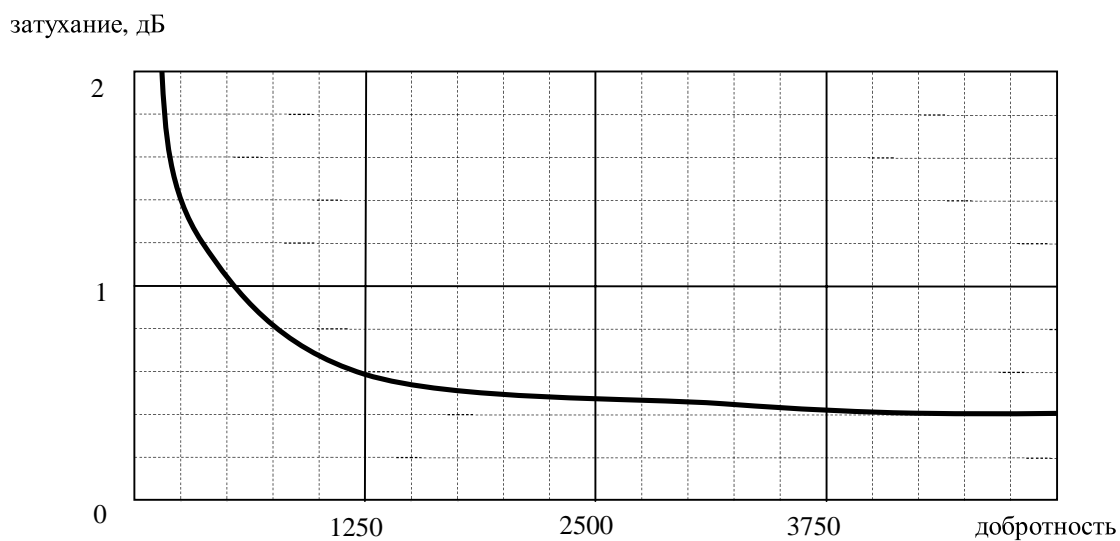


б) характеристики при добротностях резонаторов  $Q=200000$  (кривая 1),  $Q=20000$  (кривая 2),  $Q=2000$  (кривая 3)



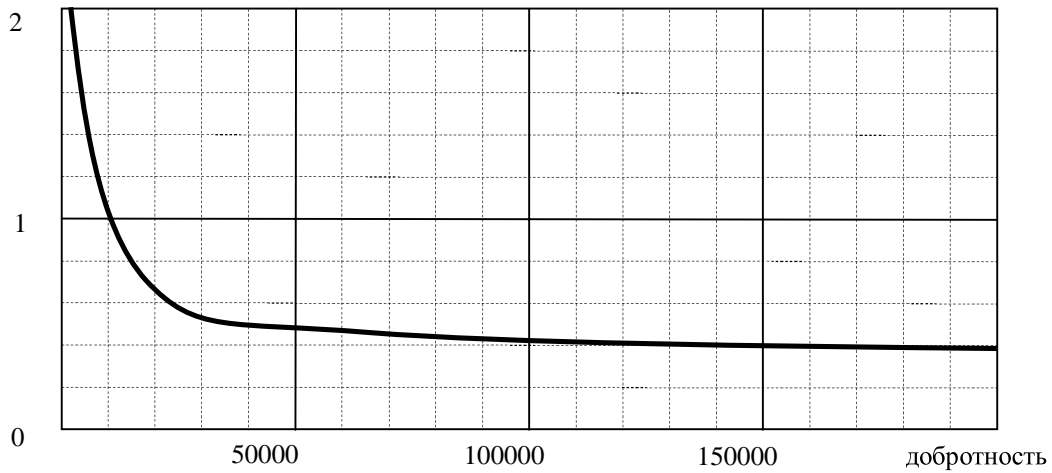
в) характеристики при добротностях согласующих индуктивностей  $Q=1200$  (кривая 1),  $Q=120$  (кривая 2),  $Q=12$  (кривая 3)

Рисунок 4 – АЧХ ЭМФ при различных значениях добротностей элементов



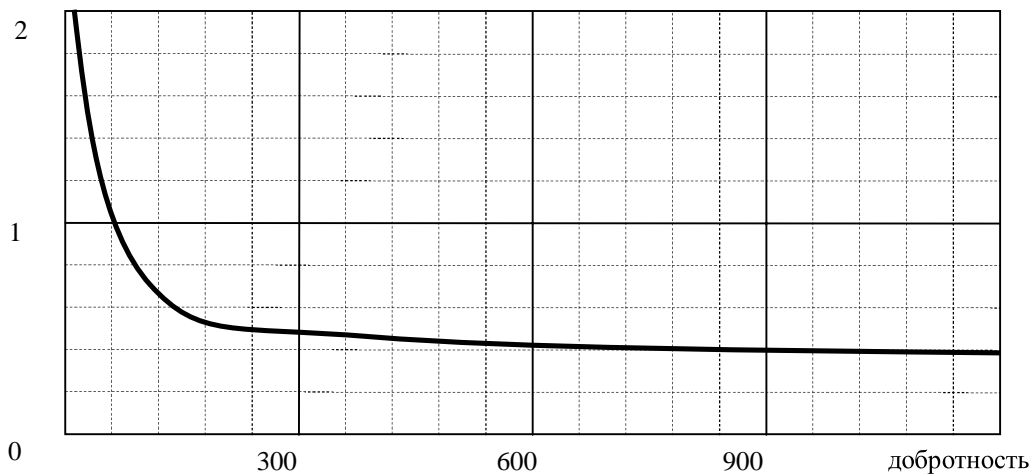
а) влияние изменения величины добротности преобразователей на величину затухания в полосе пропускания ЭМФ

затухание, дБ



б) влияние изменения величины добротности резонаторов на величину затухания в полосе пропускания ЭМФ

затухание, дБ



в) влияние изменения величины добротности согласующих индуктивностей на величину затухания в полосе пропускания ЭМФ

Рисунок 5 – Влияние изменения величины добротности элементов на величину затухания в полосе пропускания ЭМФ

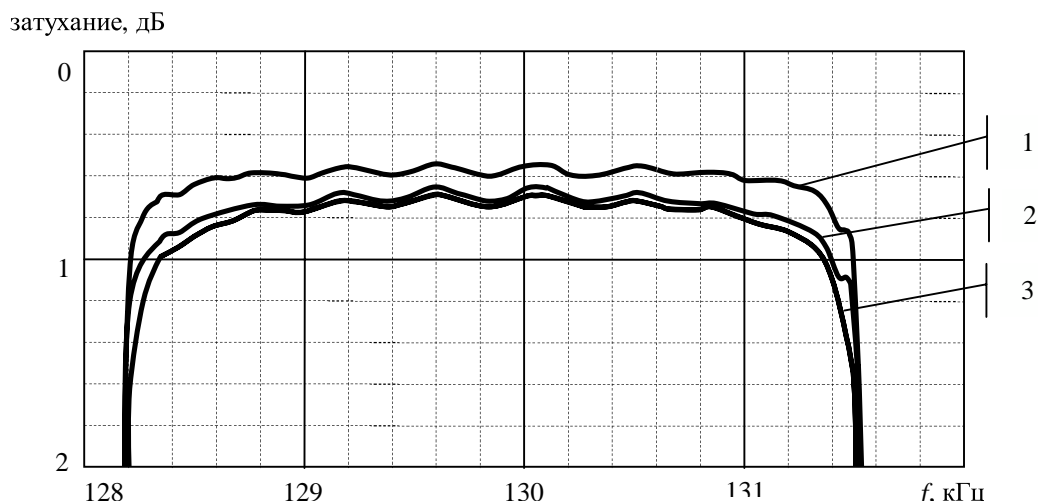


Рисунок 6 – Влияние изменения величины добротности отдельных резонаторов на величину затухания в полосе пропускания ЭМФ:

кривая 1 - характеристики при добротностях резонаторов  $Q=20000$  для всех элементов;

кривая 2 - при уменьшении добротности до  $Q=2000$  отдельно для 5-го резонатора;

кривая 3 - при уменьшении добротности до  $Q=2000$  отдельно 1-го резонатора

Таблица 2

Расчетные формулы элементов фильтра	
1	2
Величина, обратная относительной ширине полосы пропускания ( $n$ )	$n = \frac{f_0}{\Delta f}$
Расчетное сопротивление нагрузки $R_H^*$ , Ом	$R_H^* = \frac{\rho}{C_{ДНН} \cdot \alpha_1 \cdot n \cdot \omega_0}$
Нормированный коэффициент нагрузки $r_H$	$r_H = \frac{1}{\frac{1}{1 - \frac{\alpha_1 \cdot n}{\rho} \cdot \left( \frac{1}{Q_{np}} - \frac{1}{Q_p} \right)} - \frac{\alpha}{Q_\alpha}}$
Сопротивление нагрузки $R_H$ , Ом	$R_H = R_H^* \cdot r_H$



Продолжение таблицы 2

1	2	
Расчет индуктивностей, Гн	$L_1 = \frac{K_{св}^2}{C_1 \cdot \omega_0^2}; \quad L_2 = \frac{1}{C_{дин} \cdot \omega_0^2}$	
	При $i = 3,5,7$ $L_i = \frac{\rho}{\beta_{i-1} \cdot n} \cdot \frac{R_H^*}{\omega_0}$	При $i = 4,6$ $L_i = \frac{\alpha_{i-1} \cdot n}{\rho} \cdot \frac{R_H^*}{\omega_0}$
Расчет емкостей, Ф	$C_1 = \frac{C_{дин}}{K_{св}^2} \quad C_2 = C_{дин}$	
	При $i = 3,4,5,6,7$	$C_i = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_i}$
Емкость (-С8, С9, -С10), Ф	$\frac{\rho}{R_H^* \cdot \omega_0}$	
Расчет сопротивлений потерь, Ом	$R_1 = \omega_0 \cdot L_1 \cdot Q_\alpha \quad R_2 = \frac{\omega_0 \cdot L_2}{Q_{np}}$	
	При $i = 3,5,7$ $R_i = \omega_0 \cdot L_i \cdot Q_{рез}$	При $i = 4,6$ $R_i = \frac{\omega_0 \cdot L_i}{Q_{рез}}$

**Выводы и направление дальнейших исследований.**

Анализ влияния изменения добротности преобразователей и согласующих индуктивностей на АЧХ показал, что изменение добротности одного из преобразователей или одной из согласующих индуктивностей приводит к изменению вносимого затухания примерно равного половине эффекта, вызванного их совместным влиянием. В то же время влияние резонаторов различно и зависит от местоположения его в колебательной системе (рис. 6). Резонаторы, расположенные ближе к центру, в большей степени влияют на величину вносимого затухания, чем резонаторы, расположенные ближе к преобразователю. При этом следует отметить то, что снижение добротности центральных резонаторов заметно снижает избирательность фильтра, которое проявляется в закруглениях АЧХ на участках перехода от полосы пропускания в полосу задерживания, т.е. на частотах 128100 и 131600 Гц. В дальнейшем воз-

можно проведение исследование влияния изменения других параметров ЭМФ на получаемые амплитудно-частотные характеристики.

*Приведены результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик электромеханических фильтров с использованием метода электромеханических аналогий. Показано влияние изменения добротности различных элементов колебательной системы на получаемую амплитудно-частотную характеристику электромеханического фильтра.*

*Results of modelling of frequency characteristics of electromechanical filters with use of a method of electromechanical analogies are resulted. Influence of change of good quality of various elements of oscillatory system on the received frequency characteristic of the electromechanical filter is shown.*

#### **Библиографический список**

1. Джонсон Р. Механические фильтры в электронике. – М.: Мир, 1986

2. Моделирование амплитудно-частотных характеристик электромеханических фильтров с использованием метода электромеханических аналогий - Труды шестой научно-практической конференции «Современные информационные технологии - 2005». – Одесса, ДП «Нептун-Технология», 2005, с. 206.

3. Коган С.С "Параметры электромеханических полиномиальных фильтров" Сборник Вопросы радиоэлектроники, сер. XI, Техника проводной связи, вып.3, 1962г.

4. Н.В.Моховиков А.С.Степанов, Т.В.Ярицына "Согласование канальных электромеханических фильтров с учетом потерь в элементах преобразователей" ТСС, сер. ТПС, Вып.9, 1985 г.

5. <http://www.rockwellcollins.com/otherbusinesses/collins-filters>