

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского  
Кафедра электротехники и мехатроники

# Разработка методики определения разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров

Выполнил студент 369м группы Ништа Е.Н.  
Руководитель к.т.н., доцент Благодарный Н.П.  
Нормоконтролер ассистент Косыченко О.Н.

«ХАИ» 2016

				ХАИ.3.05.369м.8.0502.0202.01		
	И.Иванов	П.Иванов	В.Иванов	Разработка методики определения разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров	Лист	1
Рядов.	Ништа Е.Н.				у	1:1
Проф.	Благодарный Н.П.				Лист 1	Листов 23
Н.Иванов	Благодарный Н.П.			ГОСТ 2.743-91	ХАИ гр. 369м	

**Объект исследования:** достоверность информации состояния в мехатронных системах.

**Предмет исследования:** фильтрация сигналов информации состояния МС рекурсивных цифровых фильтров.

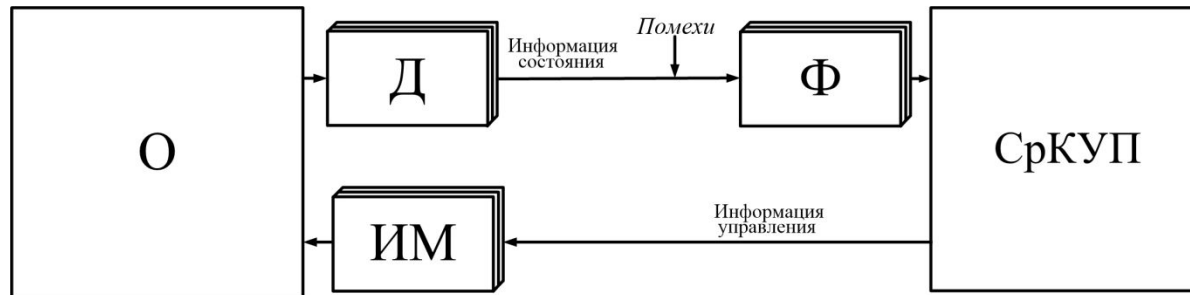
**Цель:** разработка методики определения минимально допустимой разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров.

- Задачи:**
- анализ влияния разрядности спецвычислителей на погрешность вычислений;
  - разработка методики для выбора минимально допустимой разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров на этапах проектирования и модернизации мехатронных систем;
  - разработка программы расчета минимально допустимой разрядности спецвычислителей;
  - исследование влияния разрядности спецвычислителя на импульсную и амплитудно-частотную характеристики РЦФ;
  - разработка рекомендаций по усовершенствованию этапов проектирования и модернизации мехатронных систем.

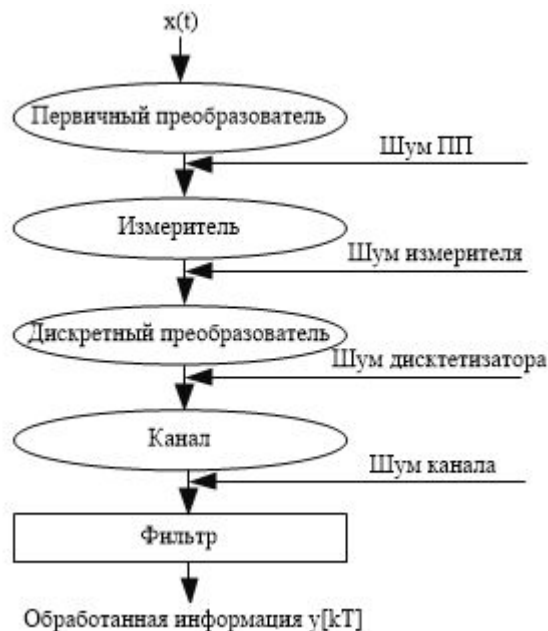
				ХАИ.3.05.369м.8.0502.0202.02			
				Лист		Из всего	
				у		1:1	
				Лист 2		Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м	

# Цифровая фильтрация в мехатронных системах

Обобщенная схема структуры мехатронной системы:



## Этапы обработки информации состояния



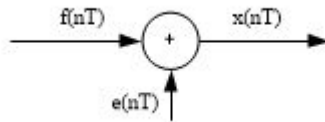
СрКУП – средства контроля, управления и представления информации;  
 Ф – фильтры (аналоговые, нерекурсивные, рекурсивные цифровые фильтры);  
 Д – датчики;  
 О – объект управления;  
 ИМ – исполнительные механизмы (пневмоприводы, электроприводы, гидроприводы и др.).

				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.03		
Исполн.	М.И.С.	П.И.С.	Л.И.С.	Лист	Масштаб	Масштаб
Исполн.	М.И.С.	П.И.С.	Л.И.С.	у		1:1
Исполн.	М.И.С.	П.И.С.	Л.И.С.	Лист 3	Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м

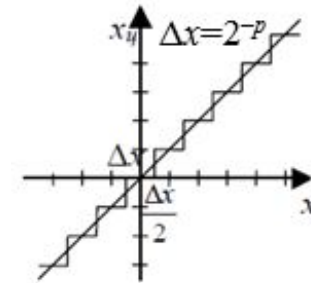
# Характеристики искажений сигналов информации состояния

При цифровой фильтрации ошибки квантования рассматриваются как стационарный шумоподобный процесс с равномерным распределением вероятности по диапазону распределения ошибок квантования.

Линейная модель квантования сигналов:



$f(nT)$  – дискретный или  $m$ -разрядный цифровой сигнал ( $m > p$ );  
 $x(nT) = f(nT) + e(nT)$  – квантованный  $p$ -разрядный сигнал;  
 $e(nT)$  – ошибка квантования.



Величина шага квантования:  $\Delta x = 2^{-p}$ ,  
 Максимальная ошибка квантования при округлении:

$$e_{max} = \max |e_k| = \frac{\Delta x}{2} = \frac{2^{-p}}{2} = 2^{-p-1}$$

Дисперсия ошибок округления:  $\sigma^2 = 2^{-2p}/12$ .

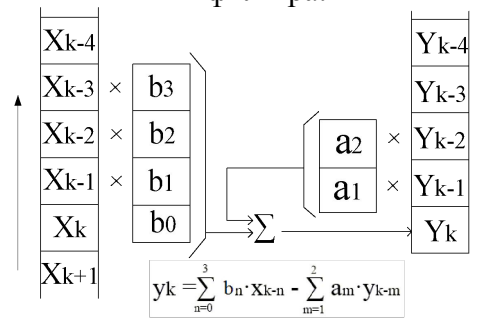
Пример влияния количества уровней квантования на точность представления числа 0,967

Кол-во разрядов	Представление числа с фиксированной точкой	Приближенное значение	Абсолютная погрешность $\Delta$
1	0.1	0.5	0.467
2	0.11	0.75	0.217
3	0.111	0.875	0.092
4	0.1111	0.9375	0.0295

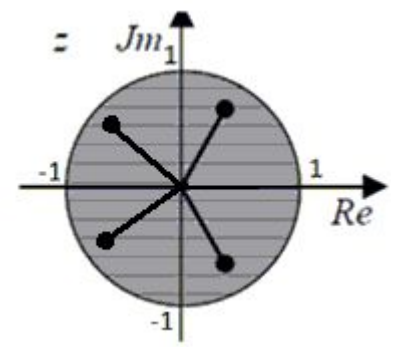
				ХАИ.3.05.369м.8.05.02.0202.04		
Исполн.	М.И.Савин	Получил	Завед.	Характеристики помеховой сигналы цифровых устройств	Лист	Из всего
Проверил	Савинский И.И.				4	23
				ГОСТ 2.743-91	ХАИ зр. 369м	

# Критерии устойчивости рекурсивных цифровых фильтров

Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра:



Расположение полюсов устойчивого цифрового фильтра:



Абсолютная сходимость ряда отсчетов импульсной характеристики:

$$\sum_{k=0}^{\infty} |h(kT)| < \infty.$$

Корневой критерий устойчивости:

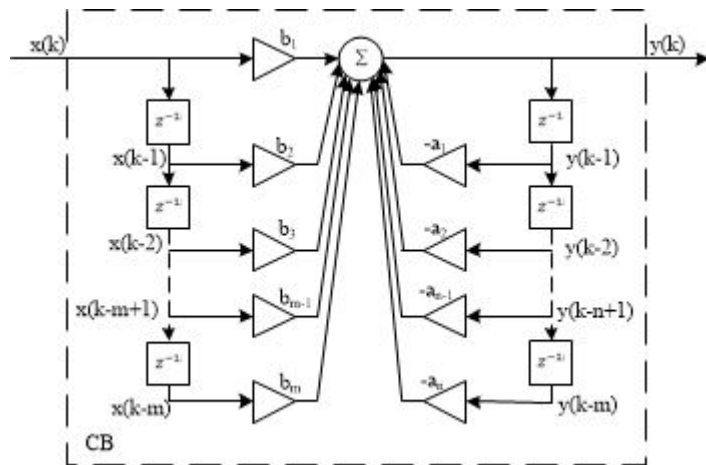
Дискретная система устойчива, если все полюса передаточной функции по модулю меньше единицы (находятся внутри единичного круга z-области).

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

				ХАИ.3.05.369м.8.05.02.02.05		
				Лист	Масштаб	Объем/номер
Исполн.	Провер.	Дата	Критерии устойчивости рекурсивных цифровых фильтров	1		1:1
Исполн.	Провер.	Дата		Лист 5	Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91 ХАИ зр. 369м		

# Обобщенная структура спецвычислителя цифрового фильтра

Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра:



$x(k)$  – входной сигнал;

$y(k)$  – выходной сигнал;

$b_i$  – коэффициенты числителя передаточной функции ( $i = 1..m$ );

$a_j$  – коэффициенты знаменателя передаточной функции ( $j = 1..n$ ).

Преимущества РЦФ:

- для реализации требуемой ЧХ на основе БИХ-фильтров требуется меньшее число элементов;
- синтез БИХ-фильтров осуществляется более простыми способами чем КИХ-фильтров.

Недостатки РЦФ:

- фазовая характеристика БИХ-фильтров нелинейная, особенно на краях полос;
- гарантировать устойчивость БИХ-фильтров удается не всегда.

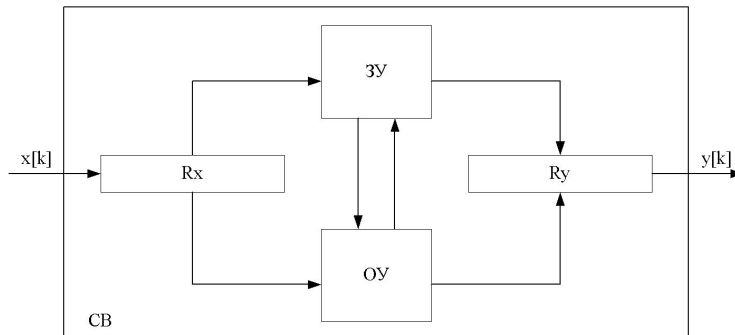
$R_x$  и  $R_y$  – входной и выходной регистры соответственно,

ЗУ – запоминающее устройство,

ОУ – операционное устройство,

$x[n]$ ,  $y[n]$  – входной и выходной сигналы.

Структурная схема спецвычислителя:



ХАИ.305.369м.8.05020202.06				Лист	Измен.	Индекс
Исполн.	Иванов Е.И.	Получил	Иванов	У		1:1
Провер.	Благодарный И.И.					
И.Иванов	И.Иванов			Лист 8	Листов 23	
ГОСТ 2.743-91				ХАИ зр. 369м		











# Программная реализация методики определения разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров

Исходные данные на проектирование фильтра:

- частота дискретизации  $f_0=13$  кГц;
- граничная частота полосы пропускания  $f_1=3$  кГц;
- граничная частота полосы задерживания  $f_2=4$  кГц;
- крутизна характеристики затухания в полосе задерживания – 20Дб;
- неравномерность характеристики затухания в полосе пропускания – 0, 86 Дб;
- тип аппроксимации – Чебышева 2 рода.

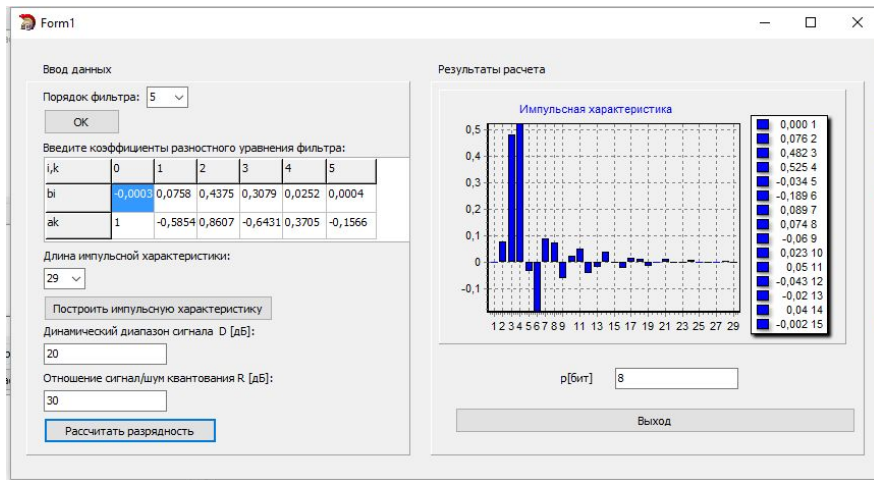
Данные для расчета разрядности спецвычислителя:

- Динамический диапазон  $D=30$  [дБ];
- Отношения сигнал/шум  $R=20$  [дБ];
- Каноническая структура рекурсивного фильтра;

Передаточная функция фильтра:

$$H(z) = \frac{-0.0003 + 0.0758 z^{-1} + 0.4376 z^{-2} + 0.3079 z^{-3} + 0.0251 z^{-4} + 0.0004 z^{-5}}{1 - 0.5854 z^{-1} + 0.8607 z^{-2} - 0.6430 z^{-3} + 0.3704 z^{-4} - 0.1566 z^{-5}}$$

Внешний вид программной реализации методики



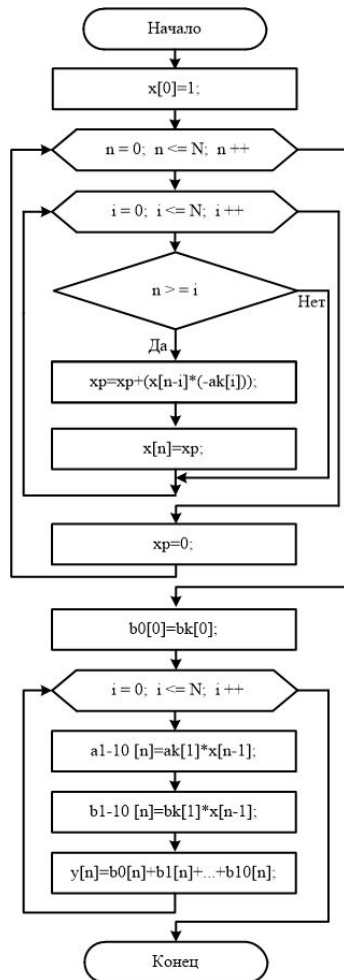
Системные требования:

- ОС: Windows XP или более поздние версии;
- Процессор: 1,6 ГГц;
- ОЗУ: 1.00 ГБ;
- 3 ГБ свободного места на диске.

				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.11		
				Программная реализация методики определения разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров	Лист	Масштаб
Исполн.	Исполн. Е.И.	Получа.	Дата		у	
Проф.	Специалист ИИ				Лист 11	Листов 23
И.И.	И.И.			ГОСТ 2.743-91	ХАИ зр. 369м	

# Блок-схемы и фрагмент программы расчета импульсной характеристики РЦФ

Блок-схема функции



Фрагмент программы

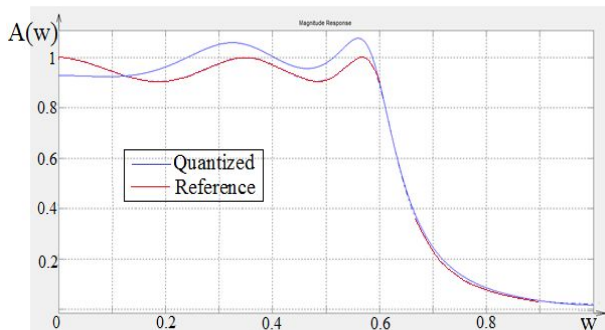
```

x[0]=1;
for (n=1; n<=N; n++)
{for (i=1; i<=N; i++)
{if (n>=i) {
xp=xp+(x[n-i]*(-ak[i]));
x[n]=xp;
}}
xp=0;}
b0[0]=bk[0];
for (n=1; n<=N; n++)
{a1[n]=ak[1]*x[n-1];
...
a10[n]=ak[10]*x[n-10];
b0[n]=bk[0]*x[n];
...
b10[n]=bk[10]*x[n-10];}
for (n=0; n<=N; n++)
{y[n]=b0[n]+b1[n]+b2[n]+b3[n]+b4[n]+b5[n]+b6[n]+b7[n]+
b8[n]+b9[n]+b10[n];}
    
```

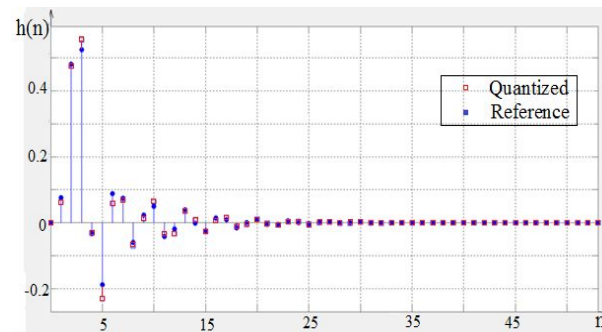
				ХАИ.305.369м.8.05020202.12		
№ докум.	Полн.т.	Дата	Лист	Место	Изменен	
Изд.	Актуальн. в.п.		1		1:1	
Изд.	Актуальн. в.п.		Лист 12	Листов 23		
ГОСТ 2.743-91				ХАИ зр. 369м		

# Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью спецвычислителя 4 бит

АЧХ с разрядностью спецвычислителя фильтра 4 бит



Импульсная характеристика с разрядностью спецвычислителя фильтра 4 бит



Коэффициенты передаточной функции до и после квантования

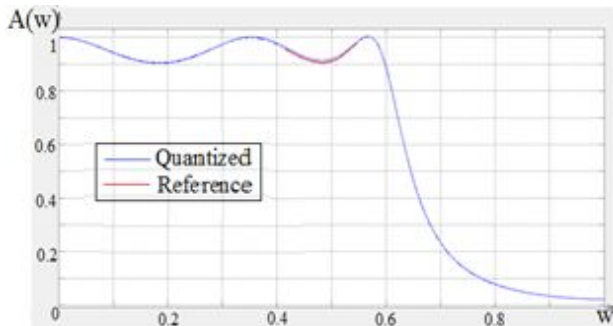
i	0	1	2	3	4	5
$b_i$	-0,0003	0,0758	0,4376	0,3079	0,0251	0,0004
$\Delta b_i$	0	0	0,5	0,25	0	0
$a_i$	1	-0,5854	0,8607	-0,643	0,3704	-0,1566
$\Delta a_i$	0	-0,0854	0,1107	0,107	0,1204	0,0934

Максимальная абсолютная погрешность:  
 $\Delta_{max} = 1,204 * 10^{-1}$

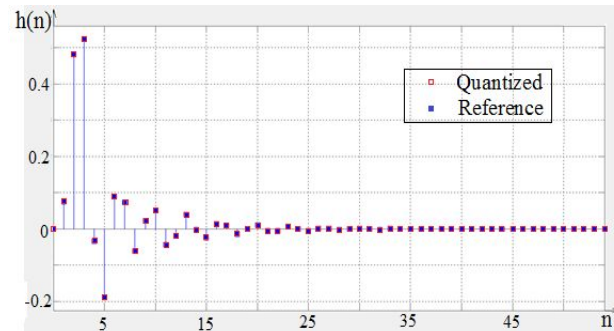
				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.13			
				Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью спецвычислителя 4 бит			
				Лист 18		Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м	

# Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью специфического вычислителя 8 бит

АЧХ с разрядностью специфического вычислителя фильтра 8 бит



Импульсная характеристика с разрядностью специфического вычислителя фильтра 8 бит



Коэффициенты передаточной функции до и после квантования

$i$	0	1	2	3	4	5
$b_i$	-0.0003	0.0758	0.4376	0.3079	0.0251	0.0004
	0	0,125	0,5	0,25	0	0
$\Delta b_i$	<b>0,0003</b>	<b>0,0492</b>	<b>0,0624</b>	<b>0,0579</b>	<b>0,0251</b>	<b>0,0004</b>
$a_i$	1	-0.5854	0.8607	-0.6430	0.3704	-0.1566
	1	-0,625	0,875	-0,625	0,375	-0,125
$\Delta a_i$	<b>0</b>	<b>0,0396</b>	<b>0,0143</b>	<b>0,018</b>	<b>0,0046</b>	<b>0,0316</b>

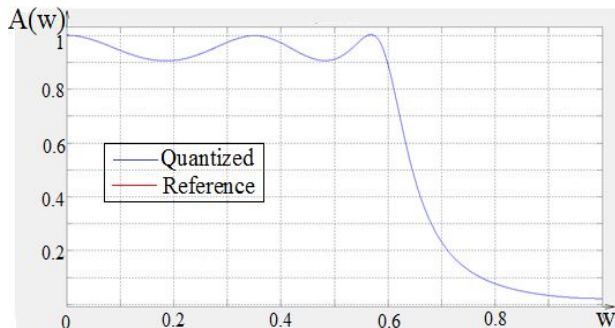
Максимальная абсолютная погрешность:

$$\Delta_{max} = 6,24 \cdot 10^{-2}$$

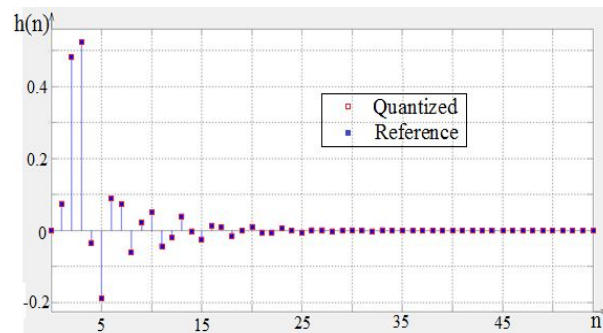
				ХАИ.305.369M.8.05020202.14			
				Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью специфического вычислителя 8 бит			
Исполн.	М.М.М.	Получ.	Л.Л.Л.	Лист	Масштаб	Масштаб	1:1
Провер.	С.С.С.	Согласован.	С.С.С.	Лист №	Листов	23	
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369M	

# Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью специфического вычислителя 16 бит

АЧХ с разрядностью специфического вычислителя фильтра 16 бит



Импульсная характеристика с разрядностью специфического вычислителя фильтра 16 бит



Коэффициенты передаточной функции до и после квантования

$i$	0	1	2	3	4	5
$b_i$	-0,0003	0,0758	0,4376	0,3079	0,0251	0,0004
	0	0,0625	0,4375	0,3125	0	0
$\Delta b_i$	<b>-0,0003</b>	<b>0,0133</b>	<b>0,0001</b>	<b>-0,0046</b>	<b>0,0251</b>	<b>0,0004</b>
$a_i$	1	0,5854	0,8607	0,643	0,3704	0,1566
	1	-0,5625	0,875	-0,625	0,375	0,1875
$\Delta a_i$	<b>0</b>	<b>0,0229</b>	<b>0,0143</b>	<b>0,018</b>	<b>0,0046</b>	<b>0,0309</b>

Максимальная абсолютная погрешность:

$$\Delta_{max} = 3,09 \cdot 10^{-2}$$

				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.15			
				Частотные и временные характеристики рекурсивного цифрового фильтра с разрядностью специфического вычислителя 16 бит			
				Лист 16		Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м	







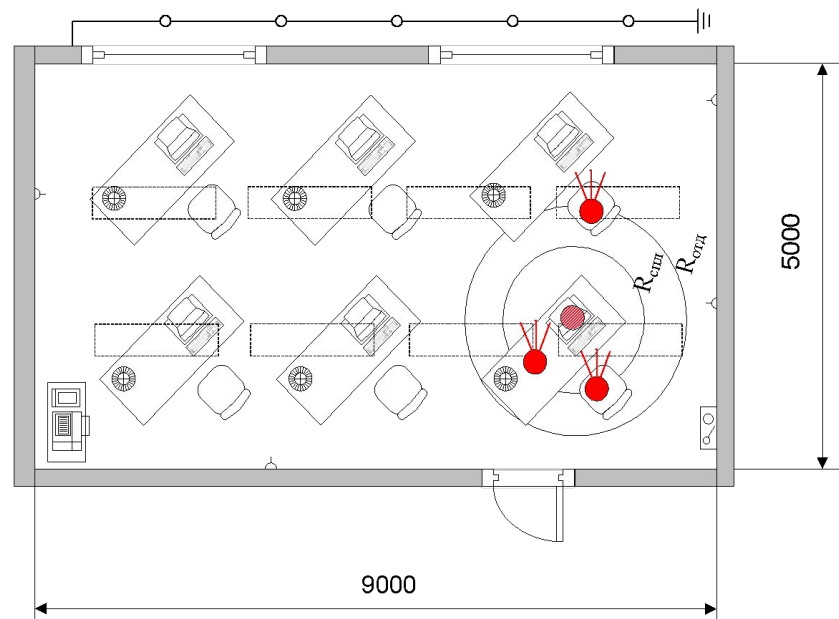
# Охрана труда и безопасность в чрезвычайных ситуациях

Потери ОФ ≤ 4.1 МЗП,  
 Мобщ = 2 чел.,  
 Мсан ≤ 2 чел.,  
 Убытки = 40.605 тыс. грн,  
 Уровень ЧС - объектный.

Для предотвращения возникновения пожаров на территории рассматриваемого объекта необходимо предпринять следующие меры противопожарной защиты:

- в помещении должен находиться огнетушитель переносной ТУ У 13 485 476.003 96 ОУ-2. ,
- по возможности необходимо установить пожарную сигнализацию;
- необходимо разработать план эвакуации людей при пожаре;
- обучать производственный персонал противопожарным правилам;
- не совмещать системы кондиционирования лабораторий и других помещений;
- регулярно осуществлять контроль сопротивления изоляции.

Карта ожидаемой пожарной обстановки в учебной аудитории

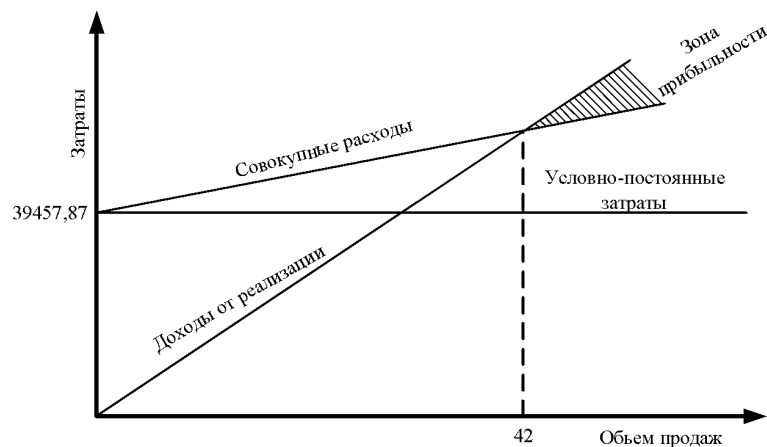


				ХАИ 305.369м.8.05020202.18		
И.О.Ф.	М.И.О.	П.И.О.	З.И.О.	Лист	Масштаб	Объем работ
Р.И.О.	А.И.О.	Б.И.О.	В.И.О.	1	1:1	
Г.И.О.	Д.И.О.	Е.И.О.	Ж.И.О.	Лист №	Листов 23	
З.И.О.	И.И.О.	К.И.О.	Л.И.О.	ГОСТ 2.743-91 ХАИ пр. 369м		

## Экономическая часть

Сметная калькуляция на разработку ПП      График достижения безубыточности разработки программного продукта

№	Статьи	Сумма, грн.	Примечание
1	Основная заработная плата (ОЗП)	18613	
2	Дополнительная заработная плата (ДЗП)	2791,95	15 % от ОЗП
3	Единый социальный взнос	7919,83	37 % (ОЗП+ДЗП)
4	Материалы и покупные изделия	2290,00	
5	Амортизация	397,89	
6	Внепроизводственные расходы	7445,2	40 % от ОЗП
7	Себестоимость (С)	39457,87	ОЗП+ДЗП+ЕСВ+МПИ+А+ВР
8	Прибыль (П)	7891,57	20 % от С
9	Цена без НДС	47349,45	П+С
10	НДС	9469,89	20 % от цены без НДС
11	Цена с НДС	56819,33	п.10 +п.9



После реализации 42 копий программного продукта, проект станет рентабельным.

				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.19		
№ докум.	Платит	Дата		Лист	Масштаб	Исполнение
Рис. №	ХАИ.3.05.369м.8.05020202.19			1	1:1	
Проц.	Экономическая часть			Лист №	Листов 23	
И. Исполн.	ХАИ.3.05.369м.8.05020202.19			ГОСТ 2.743-91 ХАИ зр. 369м		

## Выводы

1. Для повышения эффективности функционирования мехатронных систем необходима фильтрация сигналов информации состояния от датчиков.
2. Проведен анализ влияния разрядности спецвычислителей на погрешность вычислений и устойчивость функционирования рекурсивных цифровых фильтров.
3. Разработана программа для расчета разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров.
4. Исследовано влияние разрядности спецвычислителей на частотные и временные характеристики рекурсивных цифровых фильтров.
5. Разработаны рекомендации по усовершенствованию проектирования и модернизации мехатронных систем.
6. Разработана методика выбора минимально допустимой разрядности спецвычислителей рекурсивных цифровых фильтров в процессе проектирования и модернизации мехатронных систем, позволяющая уменьшить стоимость и повысить эффективность функционирования узлов мехатронных систем.

				ХАИ.З.05.369м.8.05020202.20				
				Вид карт		Лист	Масштаб	Иллюстрации
				У		1	1:1	
				Лист 20		Листов 23		
				ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м		

## Апробация результатов исследований

1. Ништа Е.Н. Влияние разрядности спецпроцессоров на устойчивость функционирования цифровых рекурсивных фильтров//Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2015». 24 ноября 2015 г.
2. Ништа Е.Н. Макет для моделирования функционирования мехатронных систем// Всеукраинская научно-техническая конференция //Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2013». 24 ноября 2013 г.
3. Ништа Е.Н. Моделирование функционирования объектов управления мехатронных систем // Международный форум радиоэлектроника и молодежь. 14-16 апреля 2014г.
4. Ништа Е.Н. Лабораторный комплекс для исследования датчика угловых перемещений //Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2014». 24 ноября 2014 г.

				ХАИ 305.369м.8.0502.0202.21		
				Лист	Из всего	Иллюстраций
Исполн.	Ништа Е.Н.	Получ.	Завед.	у		1:1
Проф.	Инженер			Лист 21	Листов 23	
И.И.И.	Ништа Е.Н.			ГОСТ 2.743-91 ХАИ зр. 369м		

## Публикации результатов исследований

1. Ништа Е.Н. Влияние разрядности спецпроцессоров на устойчивость функционирования цифровых рекурсивных фильтров// Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2015» Тезисы докладов. – Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, ХАИ 2015г., – С125.
2. Ништа Е.Н. Макет для моделирования функционирования мехатронных систем// Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2013» Тезисы докладов. – Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, ХАИ 2013г., – С26.
3. Ништа Е.Н., Коновалов Д.И. Моделирование функционирования объектов управления мехатронных систем// Международный форум радиоэлектроника и молодежь. Тезисы докладов, 2014г., – С132.
4. Ништа Е.Н. Лабораторный комплекс для исследования датчика угловых перемещений// Всеукраинская научно-техническая конференция «Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2014» Тезисы докладов. – Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, ХАИ 2014г., – С26.

				ХАИ 305.369м.8.05020202.22		
				Лист	Масштаб	Иллюстрации
И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	у		1:1
И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	Лист 22	Листов 23	
				ГОСТ 2.743-91 ХАИ зр. 369м		

# Патентование

23



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **104130** (13) **U**  
 (51) МПК (2015.01)  
**G06F 13/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ  
 УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2015 07167**  
 (22) Дата подання заявки: **17.07.2015**  
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.01.2016**  
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.01.2016, Бюл.№ 1**

(72) Винахідник(и):  
**Благодарний Микола Петрович (UA),  
 Жуланов Олександр Дмитрович (UA),  
 Нішта Євген Миколайович (UA)**  
 (73) Власник(и):  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ  
 УНІВЕРСИТЕТ ІМ. М.Є.ЖУКОВСЬКОГО  
 "ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ",  
 вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070 (UA)**

## (54) НАВЧАЛЬНО-ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД

### (57) Реферат:

Навчально-лабораторний стенд містить мікроконтролер, блок візуалізації, блок керування, блок приводів, який має n-приводів, на кожному з яких встановлена група з m-датчиків, виходи яких з'єднані з першою групою входів мікроконтролера, перша група виходів якого з'єднана з керуючими виводами кожного з приводів; до складу блока керування входить панель керування. Виводи блока керування з'єднані з другою групою входів мікроконтролера, друга група виходів якого з'єднана з блоком візуалізації.

				ХАИ.3.05.369м.8.05020202.23			
				Патентове агентство	Лист	Масштаб	Масштаб
Рег. №	Адрес	Почта	Дата		У		1:1
Прізвище	Ім'я	П.І.О.			Лист 23	Листов 23	
Адрес	Адрес	Адрес			ГОСТ 2.743-91		ХАИ зр. 369м