

# Методы оптимизации и исследование операций

Дисциплина ОПД.Ф.10

**Бугров Владимир Николаевич**

Доцент радиофизического факультета

ННГУ им.Н.И. Лобачевского



**Компьютерные технологии  
принятия решений в формализованных и неформализованных задачах**

**Бугров Владимир Николаевич**

Доцент радиофизического факультета  
ННГУ им.Н.И. Лобачевского



# Общая структура курса



Оптимизация    Исследование операций (ИО)    Принятие решений (ПР)

Экстремальная мат.задача (ЭМЗ)    Математическое программирование (МП)

Анализ    Синтез    Управление

## Список литературы

1. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. – М: Машиностроен, 1988
2. Моисеев Н.Н., Иванюков Ю.П. и др. Методы оптимизации М.: Наука, 1978.
3. Мину М. Матем. программирование. Теория и алгоритмы. М., Наука, 1990.
4. Воинов Б.С., Бугров В.Н., Воинов Б.Б. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рац. решений. М., Наука, 2007.
5. Бугров В.Н. Проектирование ЦФ методами ЦНП. //Вестник ННГУ, 2009, № 6.
6. Одрин В.М. Морфологические методы поиска. Киев: Наукова думка, 1986.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций, М.: Наука, 1988, 207 с.
8. Вагнер Г. Основы исследования операций, М.: Мир, 1976 (в трёх томах) .
9. Чуев Ю.В. и др. Основы иссл. опер в военной технике, М.: Сов.радио, 1965.
10. Богатырев Ю.К., Бугров В.Н., Воронков Ю.В. Компьютерный анализ и синтез радиотехнических устройств. // Учебное пособие. , изд. НГТУ, 1996

## Базовые определения

**Решение** - всякий определённый выбор параметров задачи (объекта)

$$\mathbf{X} (x_1, x_2, x_3 \dots x_v) \quad x_i \in E^v \quad (1)$$

**Оптимизация** - методология повышения качества объекта или процесса по заданному критерию (критериям)

**Математическое программирование** – изучение постановки и методологии решения экстремальных математических задач: 
$$\underset{X \in D}{ext} F(\mathbf{X}) \quad (2)$$

**Операция** - всякое мероприятие (система действий), объединённое единым замыслом и направленное на достижение определённой цели

**Исследование операций** - применение математических, количественных методов для обоснования решений во всех областях целенаправленной человеческой деятельности

**Принятие решений** - процедура определения (и выбора) ОПТИМАЛЬНОГО по заданному критерию(-ям) решения в допустимой области  $D$

$$\overset{\circ}{\mathbf{X}} (\overset{\circ}{x}_1, \overset{\circ}{x}_2, \overset{\circ}{x}_3 \dots \overset{\circ}{x}_v) \quad x_i \in D$$

**Управление** - процедура принятия решений во времени  $\overset{\circ}{\mathbf{X}}(t)$

# Формализованные задачи принятия решений

## 1. Математические задачи:

- б) решение систем трансцендентных уравнений
- в) решение систем неравенств
- г) решение нелинейных диффер. уравнений

## 2. Физические задачи:

- а) модельная аппроксимация интерферометрического сигнала
- б) многокритериальный синтез дискретных сигналов

## 3. Задачи проектирования (компьютерные САПР РЭУ)

## 4. Экономические и финансовые задачи:

- а) реинжиниринг бизнес-процессов
- б) оптимизация продаж в рамках эластичности спроса
- в) организация производства под заданный рынок сбыта
- г) экспертиза и оптимизации структуры землепользования

## 5. Типовые задачи исследования операций:

- а) организация производства и транспорта
- б) организация медицинского обслуживания
- в) организация поставок и сбыта товаров
- г) управление продажами в рамках заданного спроса
- д) организация противолодочного рейда

# Задачи системной психологии

**Системная психология** - изучение вопросов поведения (принятия решений, управления деятельностью) в адаптивных **биологических** системах

Системный анализ - Теория систем - Теория управления



Есть ли ум у кошки?

**80 - 20**

## Психологическая компетенция

1. Определение психики, индивида
2. Основной вопрос психологии
3. Системный базис психологии
4. Сознание, его определение и значимость
5. Механизмы психического управления деятельностью
6. Классификация личности по уровню сознания

# Два уровня логического познания

**Сознание (ум)** - это способность психики к опосредованной логической обработке информации на понятийном уровне

**Математическая логика**

**НАУКА**

**Наука - логическое познание заданной предметной области на количественном уровне**

**Качественная логика**

**ИСКУССТВО      КУЛЬТУРА**

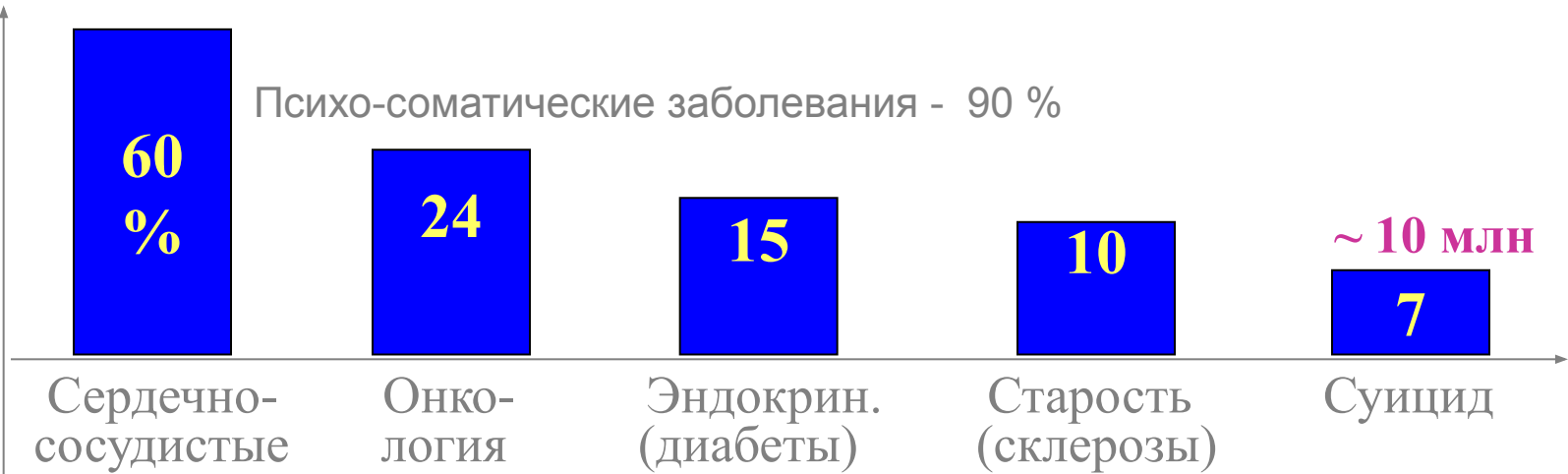
**Искусство – важнейший способ эстетического освоения мира (?)**

**Чувственный образ ➡ Логическое понятие ➡ Матем.формула**

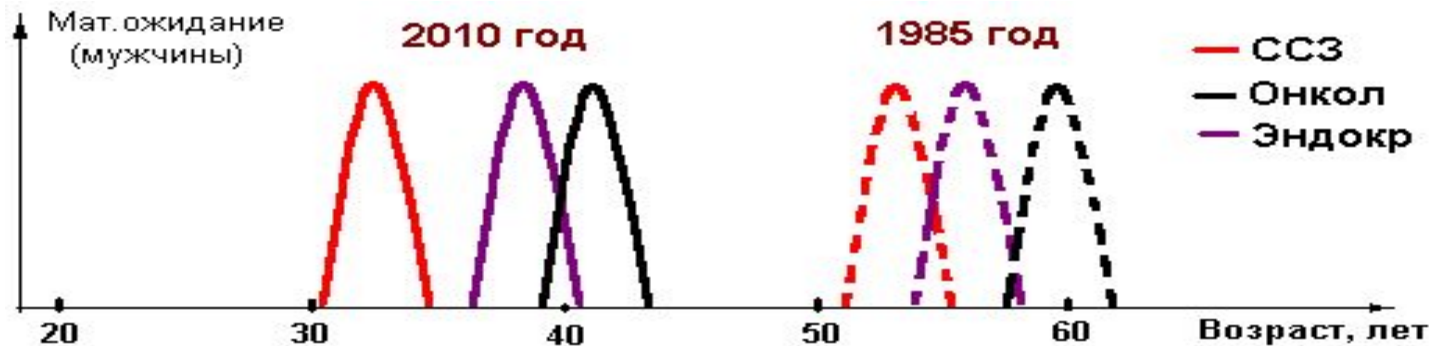
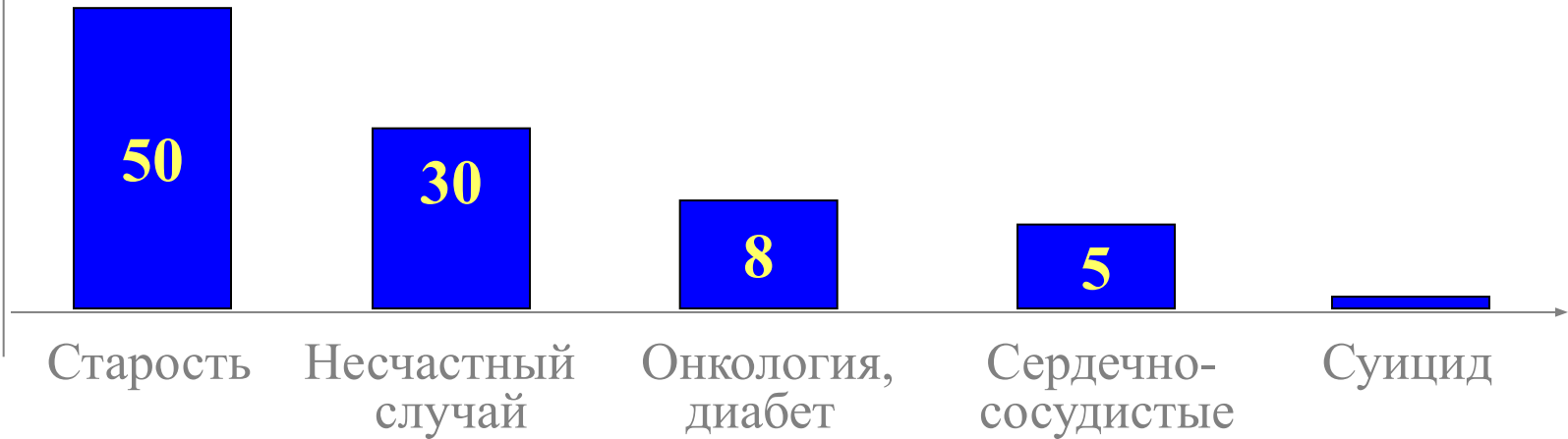
# Статистика смертности

Человек

Психо-соматические заболевания - 90 %

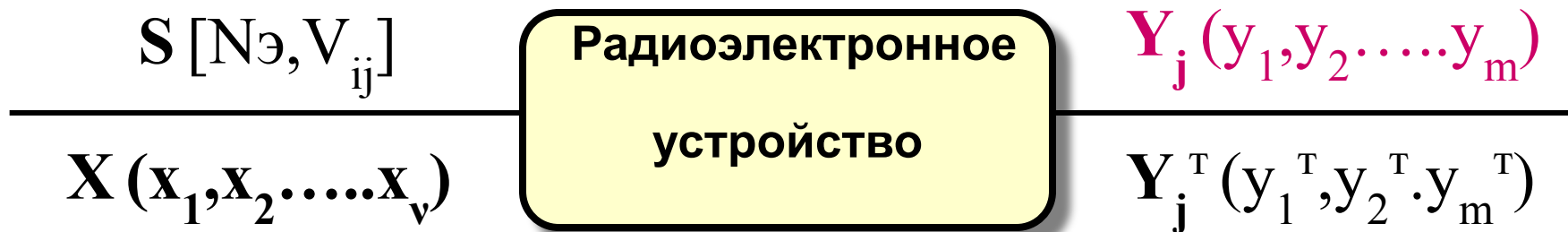


Рефлекторная психика





# Структурно-функциональное описание



$$(1) Y = MM(S, X)$$

$$Y = \boxed{\text{ЭО}}(S) \quad (2)$$

## 1. Задача анализа

$$S, X \Rightarrow Y \quad (3)$$

## 2. Задача синтеза ТР

$$Y^T \Rightarrow S^0, X^0 \quad (4)$$

### Неформализованные задачи

1. Интуитивный перебор
2. Мозговой штурм (МА)
3. Эвристические методы
4. Морфологические методы
5. Применение экспертных систем

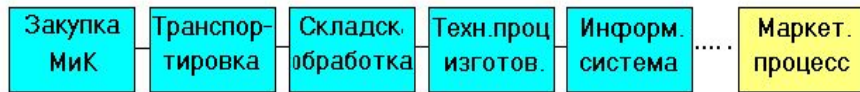
### Формализованные задачи

1. Классические методы синтеза
2. Методы нелинейного математического программирования

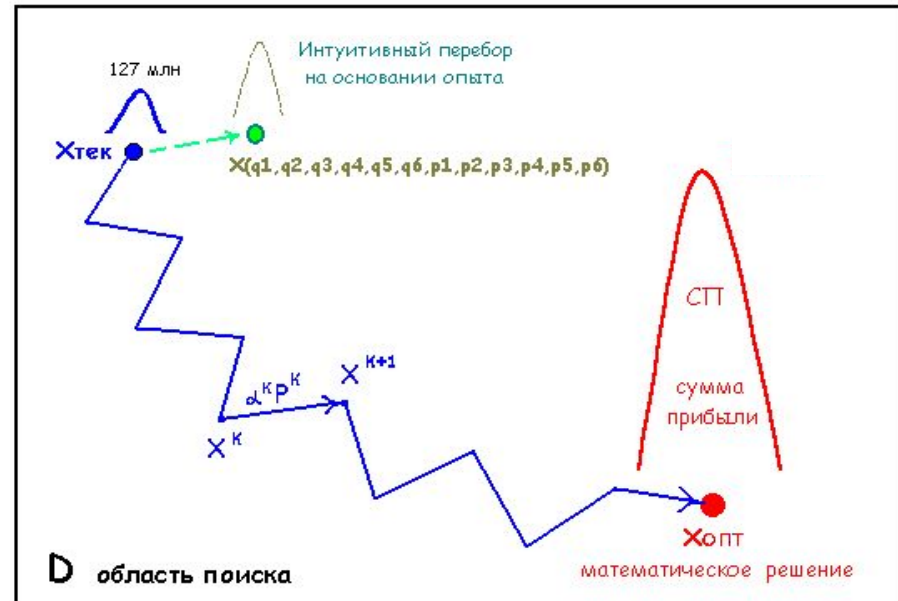
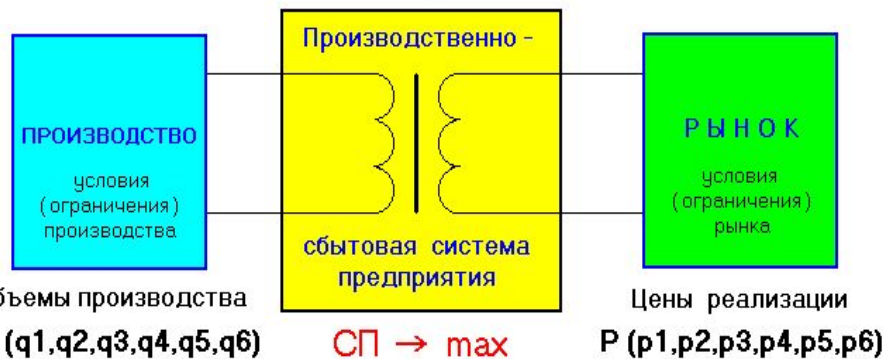


# Организация производства легковых автомобилей ОАО «ГАЗ», 2001 год

## СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВА



$$ПМ = \sum_i ПП_i$$

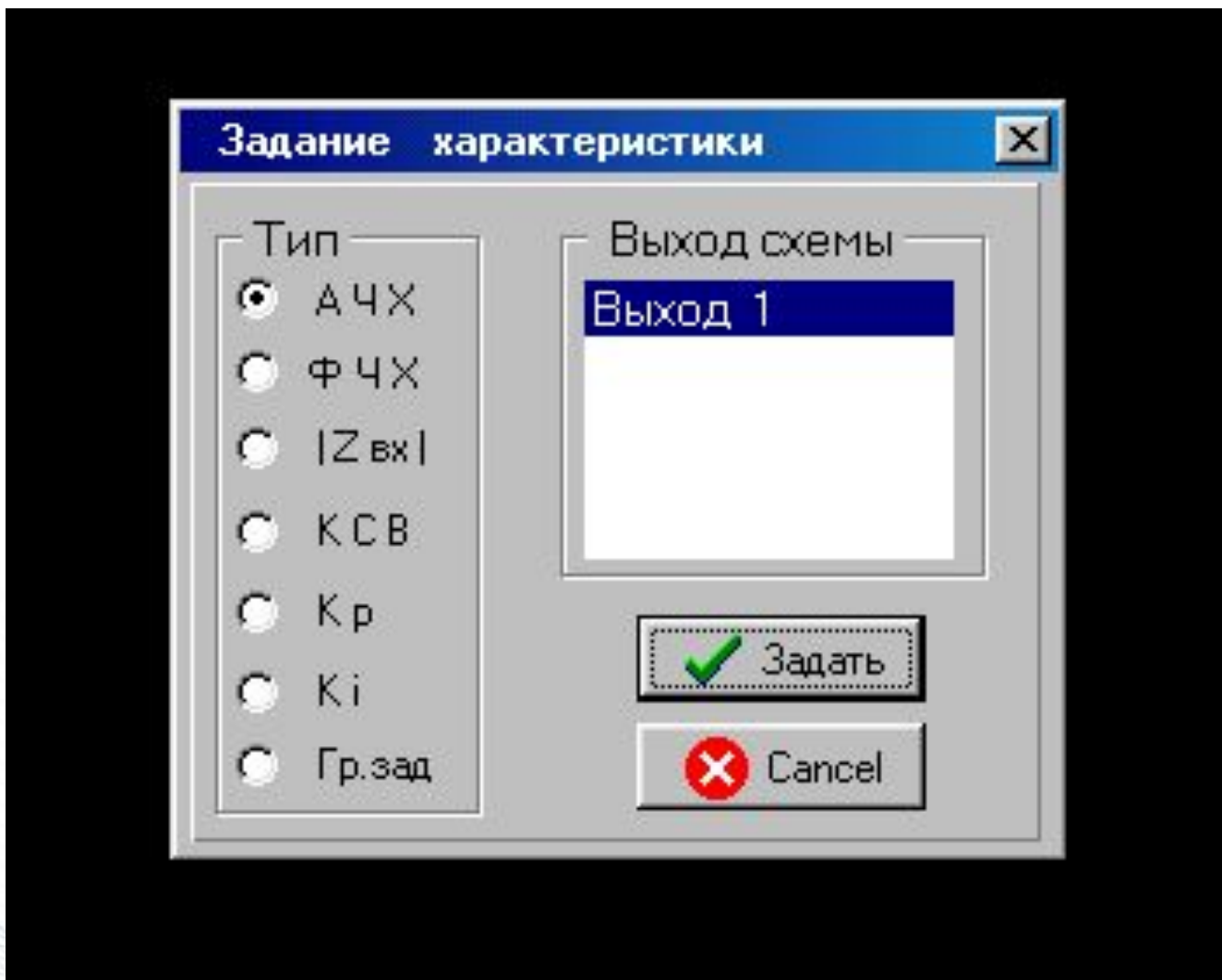


$$X^{k+1} = X^k + \alpha^k P^k$$

Модель	ГАЗ-3110	ГАЗ-3110	ГАЗ-3110	ГАЗ-3102	ГАЗ-3102	ГАЗ-3111
Двигатель	ЗМЗ-402	ЗМЗ-406	"Штайер"	ЗМЗ-402	ЗМЗ-406	ЗМЗ-405
Производство, шт	<b>q1</b>	<b>q2</b>	<b>q3</b>	<b>q4</b>	<b>q5</b>	<b>q6</b>
Реализация, т.р.	<b>p1</b>	<b>p2</b>	<b>p3</b>	<b>p4</b>	<b>p5</b>	<b>p6</b>



## Постановка задачи многофункционального синтеза РЭУ в пакете ЛиПС 4.0

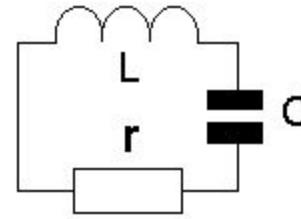


# Классификация радиотехнических цепей

## 1. Линейные стационарные цепи

$$T(\alpha U_{Bx1} + \beta U_{Bx2}) = \alpha T U_{Bx1} + \beta T U_{Bx2}$$

$$U_{Вых}(t \pm t_0) = T \cdot U_{Вх}(t \pm t_0) \text{ - условие стационарности}$$



$$u_c = q/c$$

$$L \frac{di}{dt} + ri + u_c = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{q} + \frac{r}{L} \dot{q} + \omega^2 q = 0$$

линейные ДУ

## 2. Линейные нестационарные (параметрические) цепи

$$T(\alpha U_{Bx1} + \beta U_{Bx2}) = \alpha T U_{Bx1} + \beta T U_{Bx2}$$

$$C(t) = C_0 / (1 + \sin \omega_H t)$$

$$L \frac{di}{dt} + ri + \frac{q}{C(t)} = 0$$

$$\ddot{q} + \frac{r}{L} \dot{q} + \frac{1 + \sin \omega_H t}{LC_0} q = 0 \quad (2)$$

## 3. Нелинейные цепи

$$\ddot{y} + \varphi(y) + y = 0 \text{ - нелинейные ДУ} \quad (3)$$

По критерию соотношения характерных размеров  $\boxtimes_i$  с длиной волны  $\lambda$  цепи делятся на:

а) Сосредоточенные  $\boxtimes_i \ll \lambda$  (RLC-цепи)

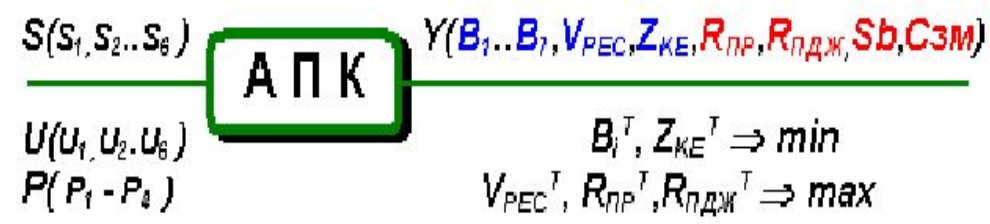
б) Распределённые  $\boxtimes_i > \lambda$  (длинные линии)

## ОСНОВНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ

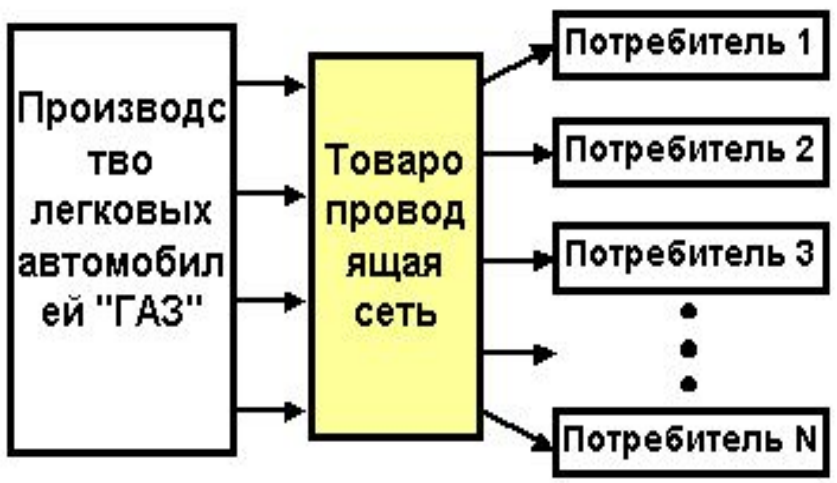
Свойства модели	Электродинамич. (ПОЛЕВАЯ)	Квазистационарная (ВОЛНОВАЯ)	Стационарная модель
Базовая Физика	Уравн.Максвелла с заданными ГУ $\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ $\operatorname{rot} \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$	Волновое уравнен. Гельмгольца $\nabla^2 L + k^2 L = 0$ телеграфн.уравн, S – параметры	Законы Кирхгофа $\sum_k I_k = 0$
Уравнение состояния, метод	<b>МЧО</b> <b>МКР</b>	$W \cdot a = c$	$Y \cdot U = I$ метод УПТ
Условие	$l_i \gg \lambda$	$l_{\perp} \ll \lambda \quad l_{\parallel} \approx \lambda$	$l_i \ll \lambda$
Диапазон	> 10 ГГц	0,2 – 10 ГГц	до 200 МГц
Погрешность	0,1 – 0,5 %	5 - 7 %	1 - 2 %
Эффективн.	10 000х	100х	1х
Применение	распределенные системы	длинные линии	сосредоточенные цепи
Компьютерн. программы	MicroWave, Serenada	MicroWave, МИКРОПОЛ	MicroCAP, ЛиПС



# Примеры структурно-функционального описания



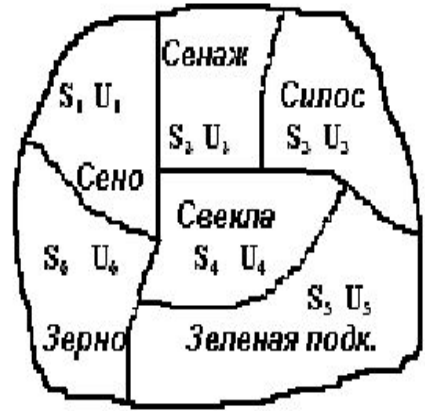
$СП = MM(Q_i, P_j)$



Модельный ряд легковых автомобилей

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. ГАЗ-3110 (ЗМЗ-402) | 4. ГАЗ-3102 (ЗМЗ-402) |
| 2. ГАЗ-3110 (ЗМЗ-406) | 5. ГАЗ-3102 (ЗМЗ-406) |
| 3. ГАЗ-3110 ("Штайр") | 6. ГАЗ-3111 (ЗМЗ-405) |

## Растениеводство



## Животноводство



- $B_i$  – балансы питания
- $V_{рес}$  – выработка ресурсов
- $Z_{ке}$  – затраты корм. единиц
- $R_{пр}$  – рентабельность произв.
- $R_{пдж}$  – рентабельн. продаж
- $S_b$  – себестоимость произв.
- $C_{зм}$  – стоимость земли



# Примеры структурно-функционального описания

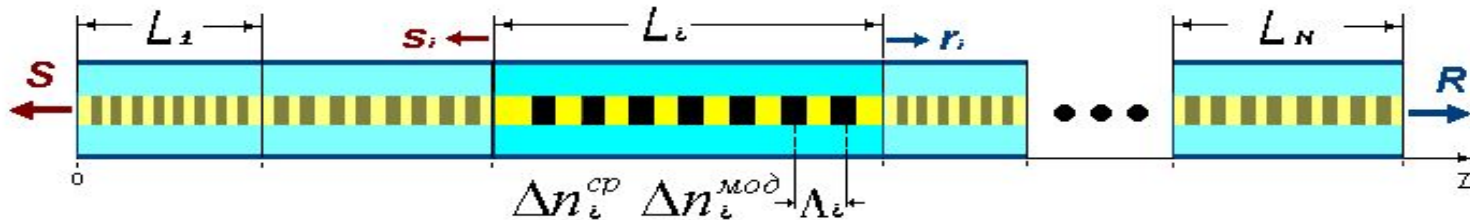
$$S [Nэ, V_{ij}]$$

**Оптоволоконный  
фильтр на БВР**

$$Y_j (y_1, y_2 \dots y_m)$$

$$X (x_1, x_2 \dots x_v)$$

$$Y_j^T (y_1^T, y_2^T \dots y_m^T)$$



$$X (\Lambda_1, \Delta n_1^{cp}, \Delta n_1^{mod}, L_1 \dots \Lambda_i, \Delta n_i^{cp}, \Delta n_i^{mod}, L_i \dots \Lambda_N, \Delta n_N^{cp}, \Delta n_N^{mod}, L_N)$$

## 1. Коэффициент отражения (АЧХ)

$$S_u(\lambda) = |S_u(\lambda)| \cdot e^{j\varphi(\lambda)} \quad (4)$$

## 2. Фазо-частотная характеристика

$$\varphi(\lambda) = \arg S_u(\lambda) \quad (5)$$

## 3. Групповая задержка (ГВЗ)

$$\tau(\lambda) = -\frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi(\lambda)}{d\lambda} [\text{пс}] \quad (6)$$

## 4. Хроматическая дисперсия

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \left[ \frac{\text{пс}}{\text{нм}} \right] \quad (7)$$

# Примеры структурно-функционального описания

**структура**

$S(Nэ)$

**результаты  
действий**

$Y[y_1(t)...y_m(t)]$

**ИНДИВИД  
(АбиоС)**

$X[x_1(t)...x_v(t)]$

**действия  
(поведение)**



$Y^T[y_1^T(t)...y_m^T(t)]$

**мотивации  
(потребности)**





# Классификация задач синтеза

**Синтез** – определение оптимального внутреннего состояния объекта (идеального технического решения -  $S^o$  и  $X^o$ ) по требуемому функционированию  $Y^T$  (техническому заданию).

I. **Структурный синтез** – определение оптимальной структуры  $S^o$  по требуемому функционированию  $Y^T$  объекта:

$$Y^T \rightarrow S^o$$

II. **Параметрический синтез** – определение оптимальных параметров  $X^o$  объекта:

$$Y^T \rightarrow X^o \mid S = const$$

III. **Структурно-параметрический синтез** – определение оптимальной структуры  $S^o$  и параметров  $X^o$  объекта:

$$Y^T \rightarrow S^o, X^o$$



## Современные тенденции синтеза

1. **Многофункциональность** – синтез по совокупности функциональных характеристик объекта (АЧХ, ФЧХ, КСВ ..):

$$F(X) = \sum_i \alpha_i \cdot f_i(X)$$

2. **Многопараметрический синтез** – размерность пространства параметров до нескольких сотен и даже тысяч.

3. **Дискретизация** пространства параметров (дискретные . ряды E6, E12, E24 - E192, целочисленная дискретизация и др.).

4. Синтез с учетом внешних условий решения задачи - **функциональных ограничений  $G_i(X)$** .

5. Основная методология - **методы математического программирования**, максимально ориентированные на современные вычислительные системы.

# ЭКСПЕРТНАЯ ОБОЛОЧКА MORFEX

оптимизации и экспертизы структуры  
неформализованных объектов, систем  
и процессов любой природы

Основные отличия и достоинства морфологической экспертизы:

1. Осуществление структурной декомпозиции исследуемого объекта или процесса на базе структурно-функционального подхода. Простая и наглядная форма отображения структуры объекта в виде морфологической таблицы
2. Возможность многокритериальной экспертизы и синтеза структуры объекта с указанием требуемой значимости экспертных критериев
3. Выявление структурно-функциональной связи (удовлетворения экспертных критериев) методом экспертных оценок. Единственный субъективный этап метода
4. Результатом как экспертизы, так и синтеза оптимальной структуры является численная оценка, пропорциональная совокупному качеству объекта экспертизы
5. Относительно недорогая компьютерная реализация морфологического метода за счет отсутствия базы знаний и эвристик (системы искусственного интеллекта)



## Основные задачи, решаемые ЭС «MORFEX»



Многокритериальная оценка качества объектов



Расчет групповых рейтингов или общего рейтинга структурированного множества объектов или процессов по различным основаниям (условиям)



Экспертиза заданной структуры объекта



Сравнительная экспертиза нескольких структур объектов или процессов по совокупности критериев



Синтез оптимальной структуры объекта



Синтез наихудшей структуры объекта



Хранение текстовой и графической информации по каждому объекту в базе данных системы



# Системы морфологической экспертизы



## Основные недостатки классических методов синтеза (ПР)

- 1) **Неинвариантность** методики решения относительно объекта синтеза, т. е. для различных РЭУ должна разрабатываться своя методика синтеза и собственное программное обеспечение;
- 2) С возрастанием **сложности задачи** (сложности математической модели, с увеличением числа показателей и числа переменных ) аналитическое решение задачи становится затруднительным, а затем и невозможным;
- 3) Полная непригодность классических методов для синтеза по совокупности требуемых, зачастую противоречивых, характеристик. То есть **много-функциональный синтез** невозможен классическими методами теории цепей.
- 4) Не позволяют осуществить синтез для **произвольной, наперед заданной структуры** РЭУ.
- 5) Классические методы непригодны и при наложении ограничений на значения параметров цепи. Так режим **дискретного синтеза** параметров здесь невозможен.
- 6) Методы классического синтеза не позволяют определять значения токов и напряжений в ветвях синтезируемой цепи, необходимых для энергетического расчета устройства.
- 7) Функциональные «ресурсы» синтезированной классическими методами структуры устройства выбираются далеко не всегда.

# Целевая функция экстремальной задачи синтеза



-3.58

$\overset{\circ}{X}$

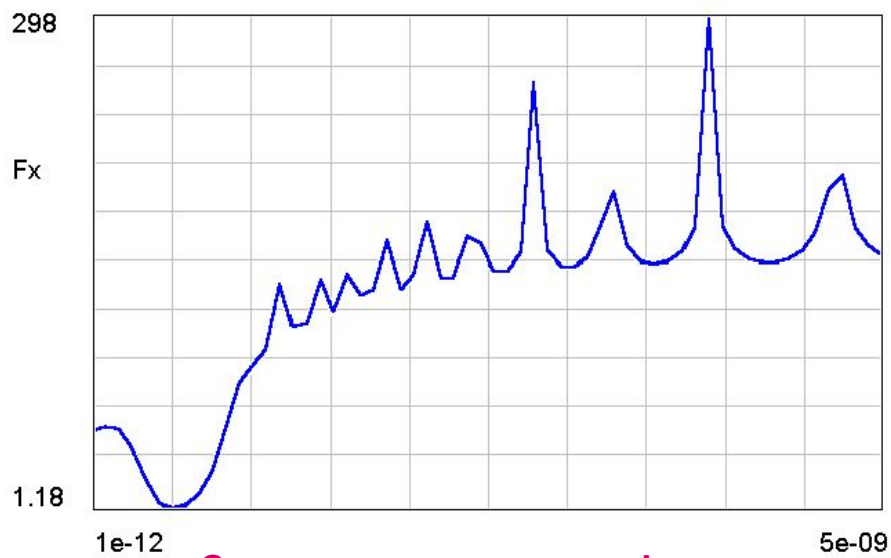
5.72



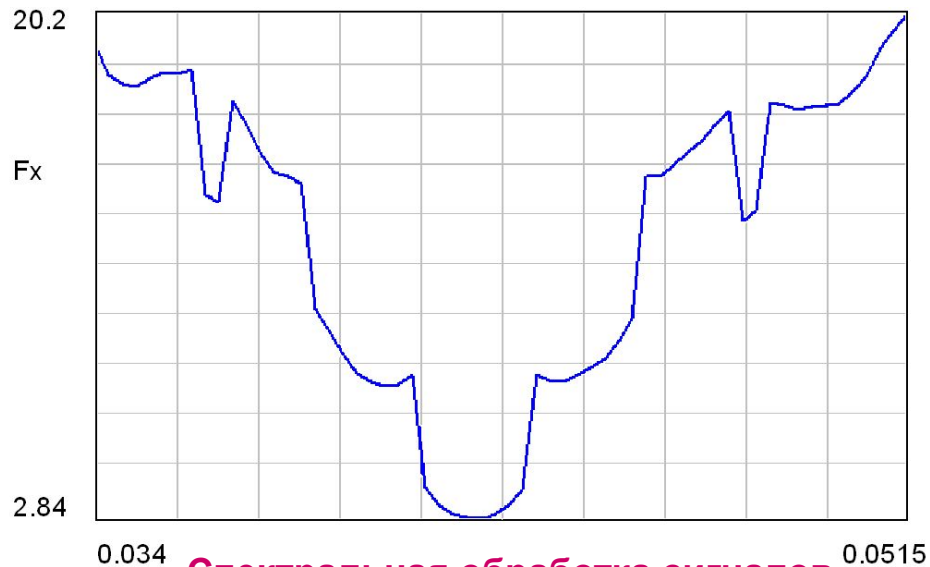
$$\overset{\circ}{F}(\overset{\circ}{X}) = \min F(X)$$

$$X \in D$$

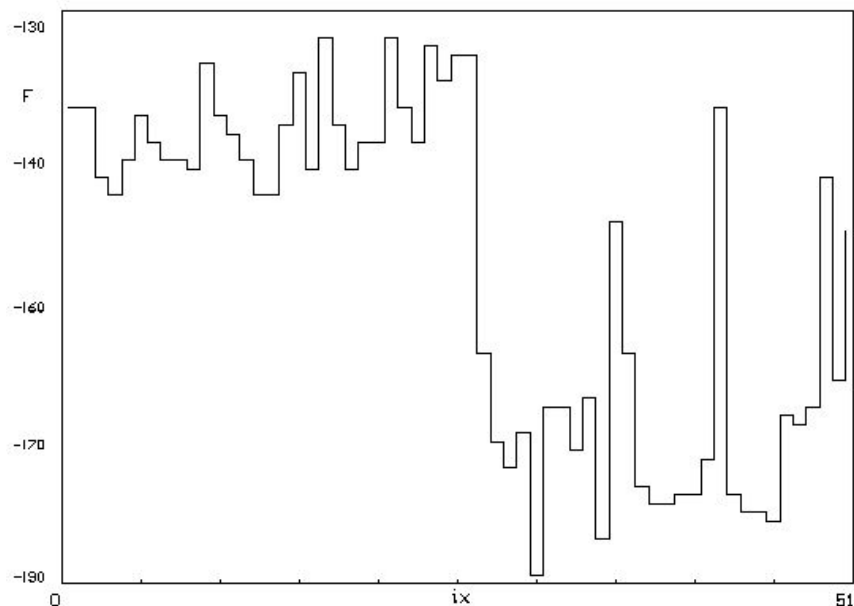
# Разрезы целевых функций экстремальных задач синтеза



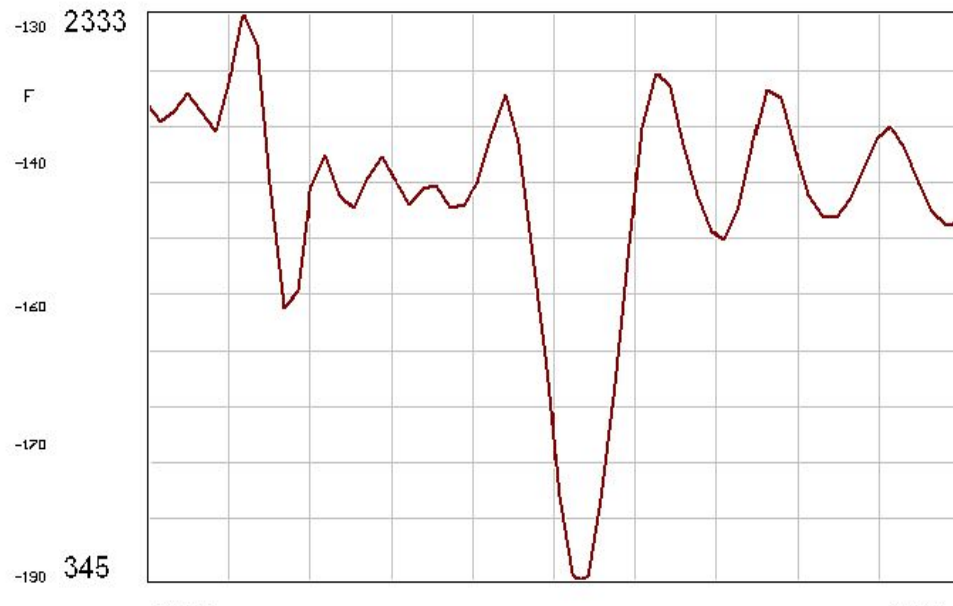
Синтез диплексорного фильтра



Спектральная обработка сигналов



Преодоление парольной защиты



Модельная аппроксимация сигнала



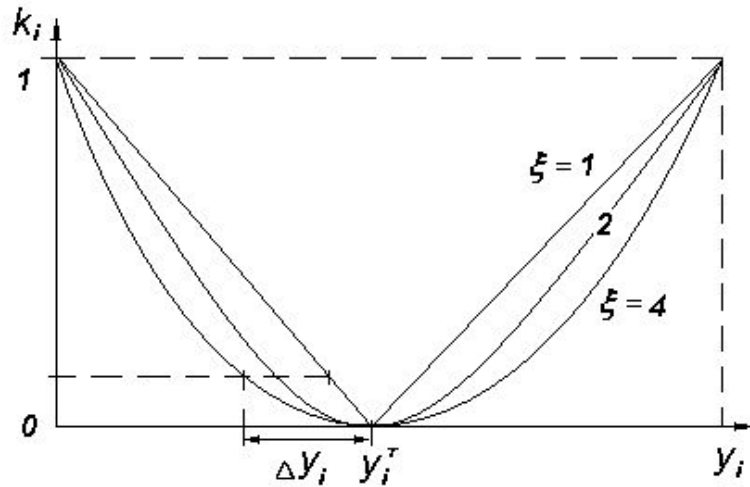
# Формирование относительных показателей функционирования (частных критериев синтеза)

$$k_i = \varphi_i(y_i)$$

1) обеспечение нормирования частных критериев, приведение их к безразмерному виду;

2) зависимость  $\varphi_i$  должна отражать правило предпочтения одного варианта другому, т.е. экстремум  $k_i(X)$  должен доставлять объекту требуемое качество (требуемые значения частных абсолютных показателей  $y_i^T$ ).

$$k_i(X) = \left| \frac{y_i(X) - y_i^T}{y_i^T} \right|^\xi \quad (1)$$



Формирование  $k_i$  в виде  $\xi$  - парабол

$$K[k_1(X), k_2(X) \dots k_m(X)]$$

Виды сходимостей

1. Ненормированный квадратичный критерий

$$k_i(X) = [y_i(X) - y_i^T]^2 \quad (2)$$

2. Критерий типа « не выше  $y_i^T$  »

$$k_i(X) = \begin{cases} \left| \frac{y_i(X) - y_i^T}{y_i^T} \right|^\xi & \text{при } y_i(X) > y_i^T \\ 0 & \text{при } y_i(X) \leq y_i^T \end{cases} \quad (3)$$

3. Критерий типа « не ниже  $y_i^T$  »

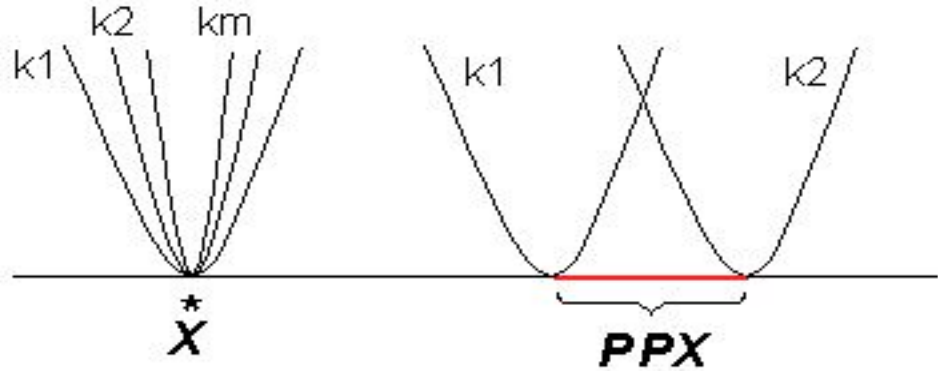
$$k_i(X) = \begin{cases} \left| \frac{y_i(X) - y_i^T}{y_i^T} \right|^\xi & \text{при } y_i(X) < y_i^T \\ 0 & \text{при } y_i(X) \geq y_i^T \end{cases} \quad (4)$$

4. Критерий на максимальное значение  $y_i^{\max}$

$$k_i(X) = \frac{1}{|y_i(X)|^\xi} \quad (5)$$

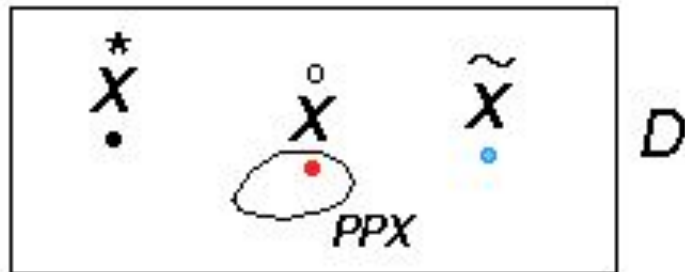
# Эффективное решение векторной экстремальной задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1^*(X^*) = \min_{X \in D} k_1(X), \\ k_2^*(X^*) = \min_{X \in D} k_2(X), \\ \dots \\ k_m^*(X^*) = \min_{X \in D} k_m(X) \end{array} \right. \quad X^* \left( \begin{array}{c} * \\ x_1, x_2, \dots, x_v \\ * \end{array} \right) \quad \min_{X \in D} K(X) \quad (1)$$



**Определение:** точка  $\overset{\circ}{X} \left( \begin{array}{c} \circ \\ x_1, x_2, \dots, x_v \\ \circ \end{array} \right)$  является эффективным или оптимальным по ПАРЕТО решением, если не существует ни одной другой точки  $\tilde{X} \in D$ , такой, что  $k_i(\tilde{X}) \leq k_i(\overset{\circ}{X})$  для всех  $i=1, m$  и хотя -бы для одной  $j$

из этого ряда это неравенство строгое:  $k_j(\tilde{X}) < k_j(\overset{\circ}{X})$ ;



Скаляризация векторной задачи

$$\overset{\circ}{F} \left( \overset{\circ}{X} \right) = \min_{X \in D} F(X) \quad (2)$$

# Парето-эффективное решение проектной задачи

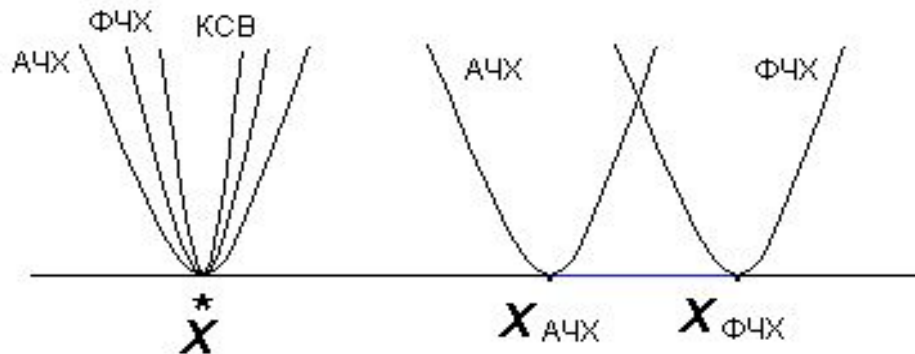
**АЧХ      ФЧХ      КСВ      ГВЗ      Дисперсия**

$$f_{АЧХ}(X)$$

$$f_{ФЧХ}(X)$$

$$f_{КСВ}(X)$$

$$f_i(X) = CKO = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [Y_n(X) - Y_n^T]^2}$$



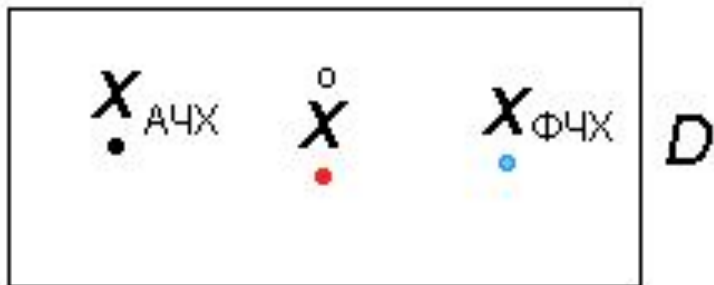
$$(1) \quad |K(j\omega)| = \mathbf{H} \varphi(\omega)$$

$$F(X) = \sum_i \beta_i \cdot f_i(X) \quad (2)$$

$$CKO \cdot \Delta\varphi(\omega) \approx const \approx \frac{k}{N}$$

$$\overset{0}{F}(\overset{0}{X}) = \min_D F(X) \quad (3)$$

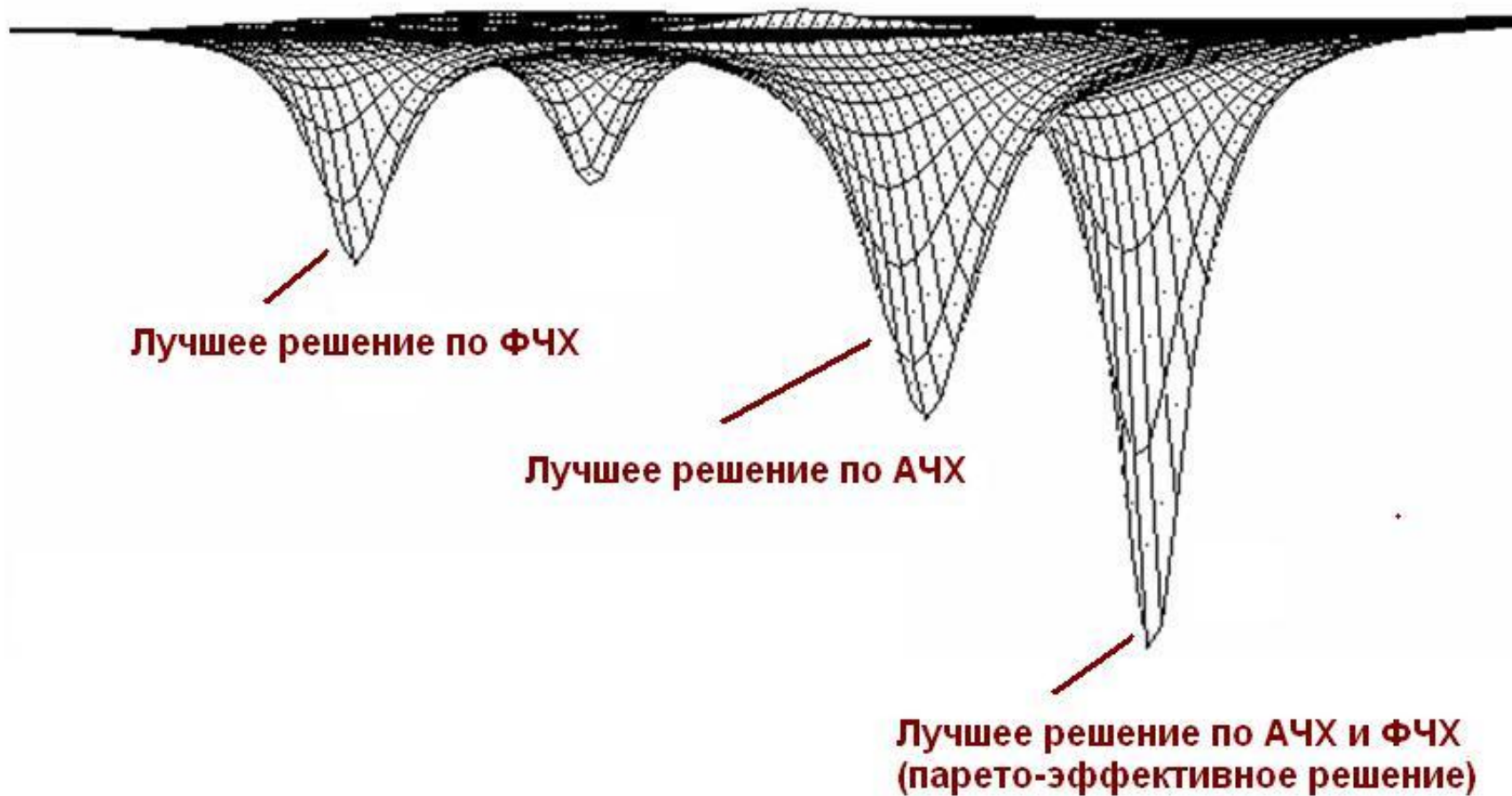
$$-2^{R-1} \leq a_i, b_i \leq 2^{R-1} - 1 \quad (4)$$



$$|Z_{pi}| < 1 \quad i = \overline{1, m} \quad (5)$$

$$K_i^{\min} \leq |K_i(e^{j\omega})| \leq K_i^{\max} \quad 27$$

# Противоречивые критерии



# Противоречивые критерии

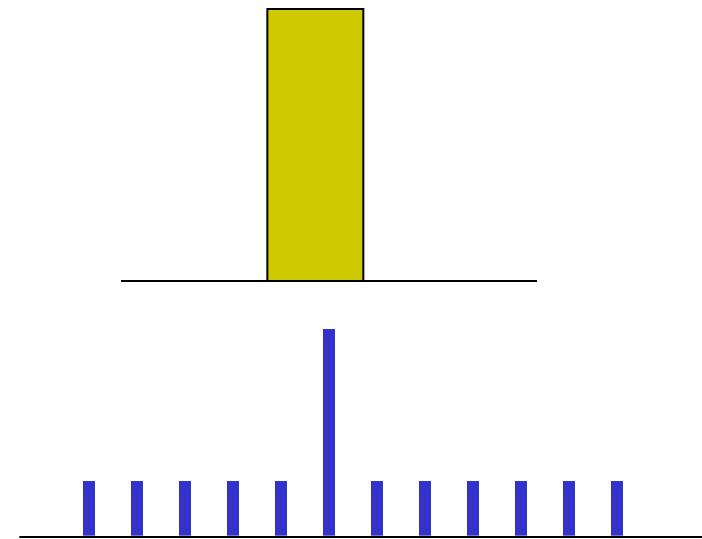
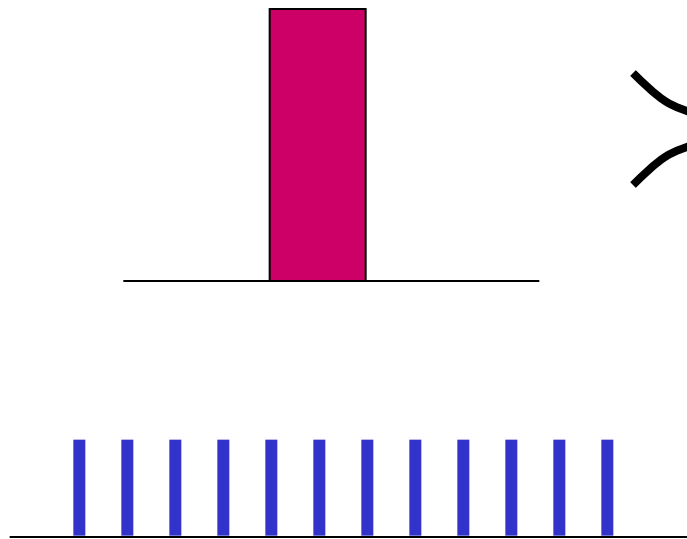
$$K[k_1(X), k_2(X) \dots k_m(X)]$$

Цена - Качество

Надёжность - Стоимость

Социальный критерий

Экономический критерий



Социальное равенство,  
честный труд, взаимная  
поддержка, участие, совесть,  
справедливость, доброта

Индивидуализм, социальное  
неравенство, конкуренция, бизнес,  
алчность, властолюбие, зависть,  
жадность, тщеславие, бездушие

Социализм

Капитализм

# Формирование целевых функций в задачах многокритериального синтеза

Целевая функция  $F(X)$  формируется в функциональном редакторе пакета из частных критериев  $k_i(X)$  одним из следующих методов:

## 1. Метод главного критерия

$$F(X) = k_\mu(X) \quad k_i \leq A_i, \quad i \neq \mu \quad (1)$$

## 2. Метод обобщенного критерия

$$F(X) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot k_i(X) \quad (2) \quad F(X) = \prod_{i=1}^m k_i^{\alpha_i}(X) \quad (3)$$

## 3. Метод минимаксного критерия

$$F(X) = \mathbf{max} \{k_1, k_2, \dots, k_\mu\} = \mathbf{max}_i \{k_i(X)\} \quad (4)$$

$$\bar{F}(X) = \mathbf{min}_{x \in D} f_i(x) = \mathbf{min}_{x \in D} \mathbf{max}_i \{k_i(X)\} \quad (5)$$

## 4. Метод последовательных уступок

$k_1(X) \boxtimes k_3(X) \boxtimes k_7(X) \boxtimes \dots \boxtimes k_\mu(X)$  - приоритетный ряд

$$F(X) = k_n(X) \quad k_n \leq A_n, \quad n = \overline{1, \mu} \quad (6)$$

# Задача нелинейного математического программирования в общей трактовке

$$F^0(X) = \min_{X \in PX} F^0(X) \quad (1)$$

$$PX = E^n \cup S^m \cup I^p \cup B^q \quad (2)$$

$$x_i^H \leq x_i \leq x_i^6 \quad i = \overline{1, \nu} \quad (3)$$

$$g_j(X) > 0 \quad j = \overline{1, \mu} \quad (4)$$

- Высокая размерность экстремальной задачи
- Нелинейность, полимодалность целевой функции (1)
- Неоднородность (2) пространства поиска
- Прямые ограничения в виде гиперкуба (3)
- Система нелинейных функциональных ограничений (4)

$E^n$  – непрерывное вещественное пространство размерностью  $n$

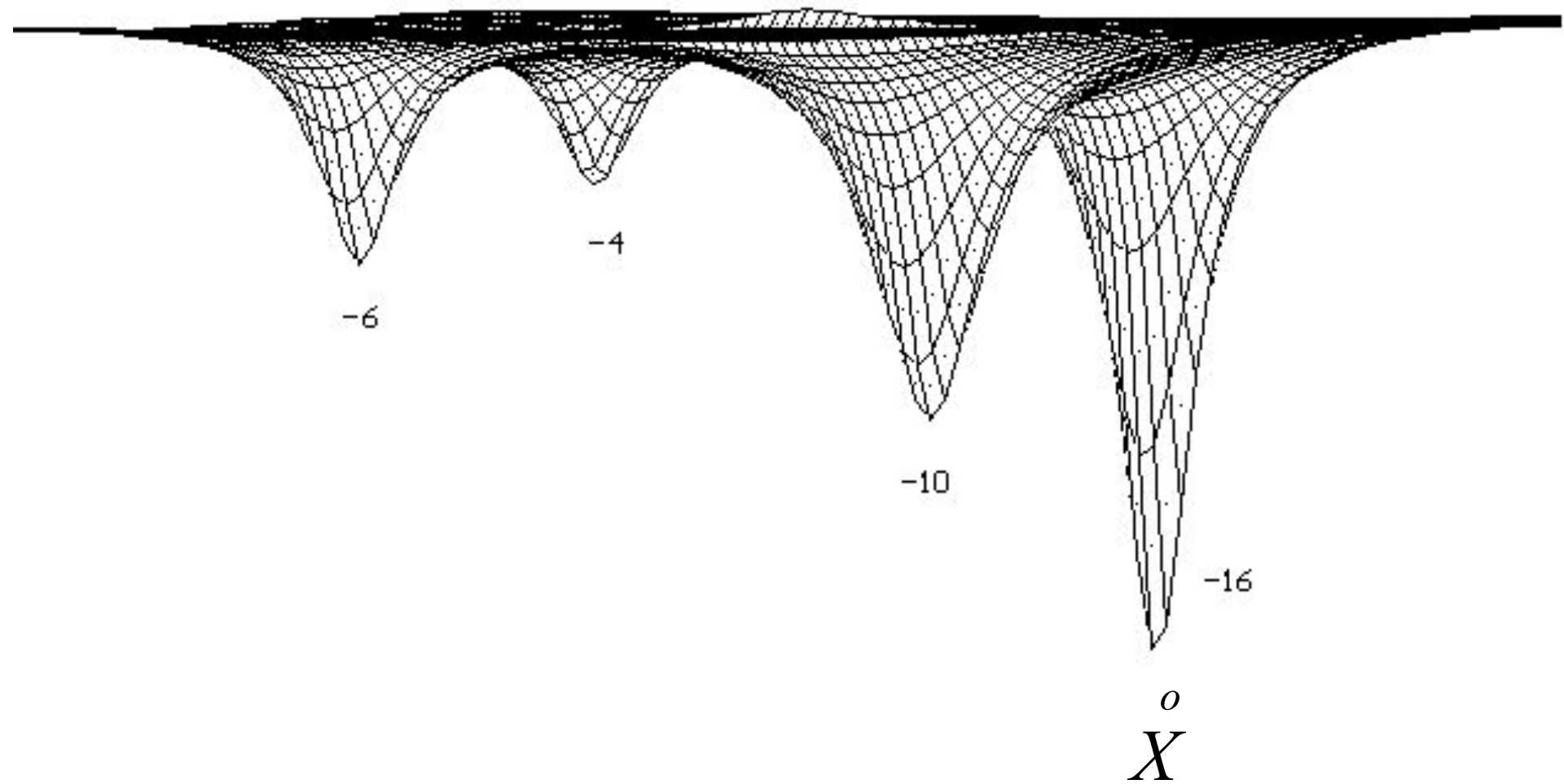
$S^m$  – дискретное вещественное пространство размерностью  $m$

$I^p$  – счетное целочисленное пространство размерностью  $p$

$B^q$  – пространство булевых переменных размерностью  $q$

$$\mathbf{v} = \mathbf{n} + \mathbf{m} + \mathbf{p} + \mathbf{q}$$

# Сталактитовая функция







## Общая структура численного решения

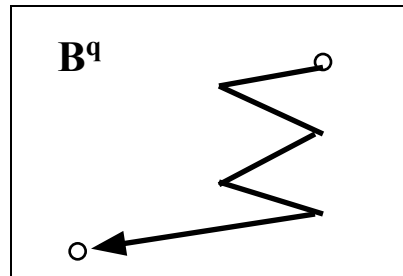
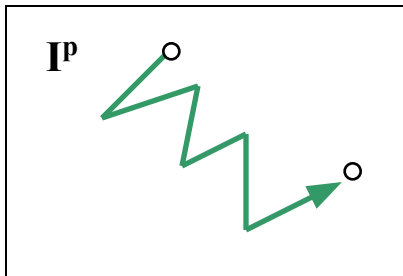
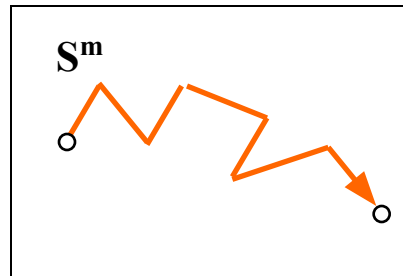
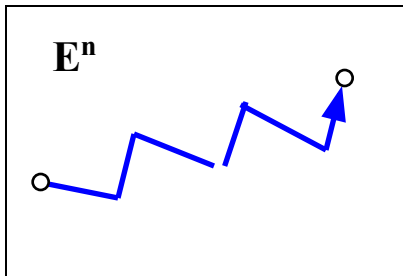
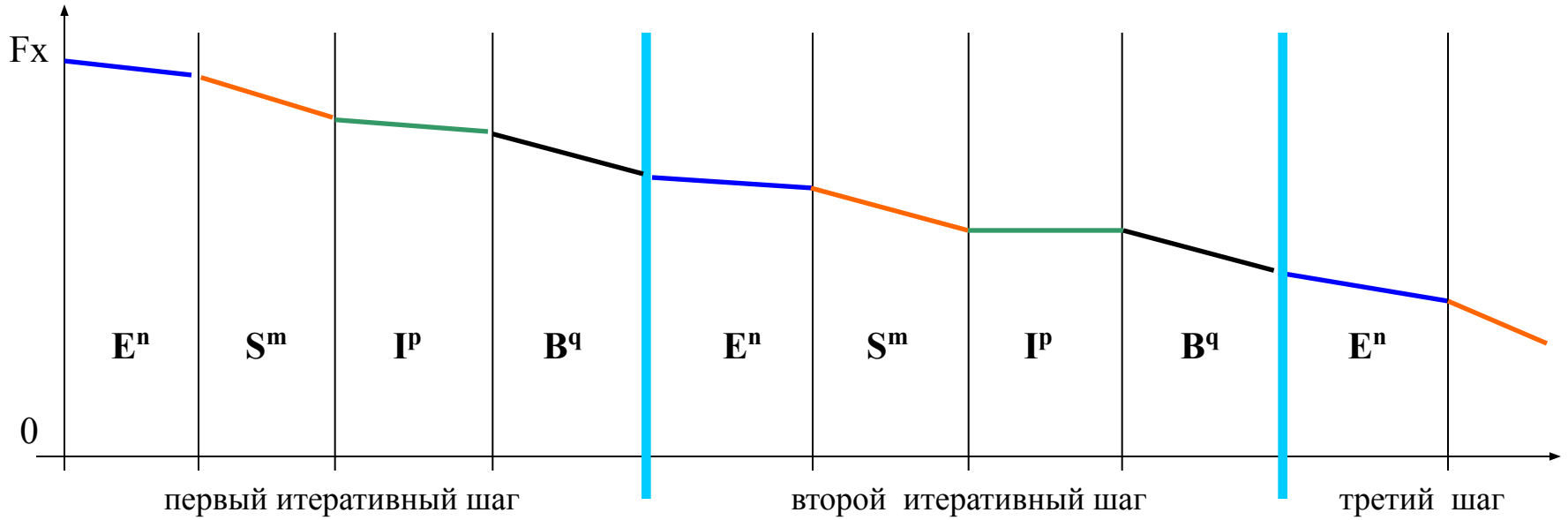
**I.** Методология разрешения заданной системы функциональных ограничений задачи  $g_i(X)$  на основе комбинированного штрафа.

**II.** Разработка базовых итеративных алгоритмов нулевого порядка для минимизации полимодальных ЦФ в пространствах  $E^n$ ,  $S^m$ ,  $I^p$  и  $B^q$

$$X^{k+1} = X^k + \alpha^k P^k$$

**III.** Идеология взаимодействия базовых алгоритмов при минимизации в неоднородном пространстве параметров  $PX$ . Предложена и реализована параллельная схема взаимодействия базовых алгоритмов.

# Параллельная схема взаимодействия базовых алгоритмов



# Алгоритмы поисковой минимизации

$$(1) \quad \{X_k\} \quad \{F(X_k)\} \Rightarrow \text{ext}F(X) \quad k = \overline{0, \infty} \quad x_i \in E^V$$

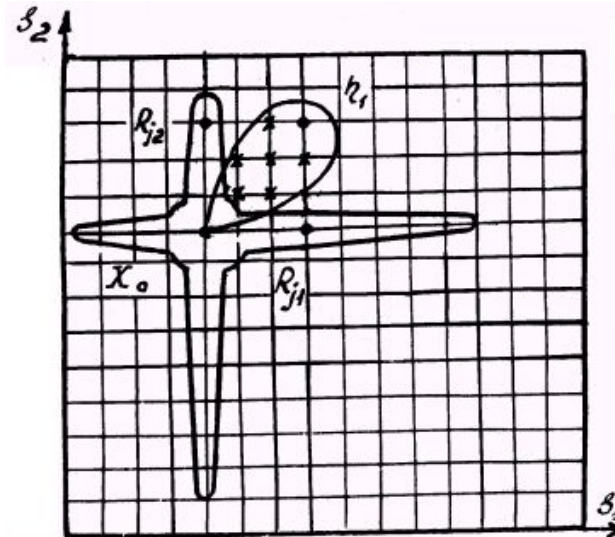
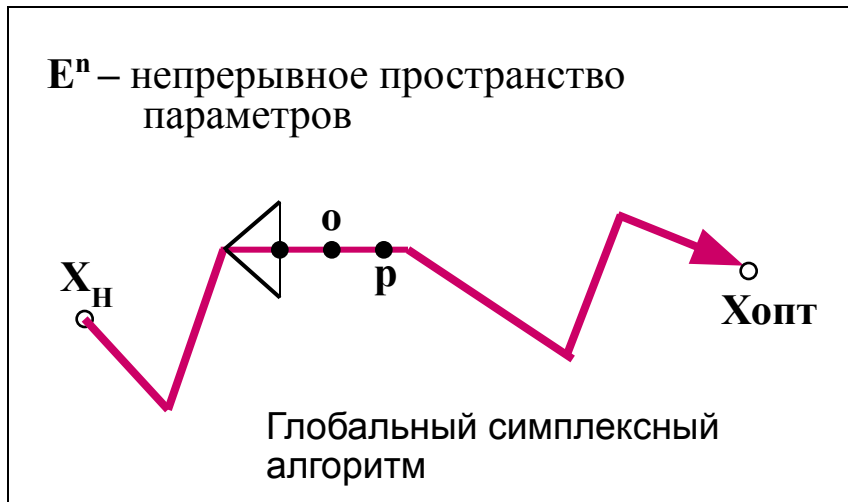
$$(2) \quad X^{k+1} = X^k + \alpha^k P^k \quad - \text{минимизирующая последоват.}$$

## Основные требования

1. Надёжность (глобальность) – способность минимизировать полимодальные функции
2. Эффективность
3. Точность определения экстремума
4. Минимум настраиваемых параметров
5. Алгоритмы нулевого порядка

## Этапы постановки задачи

- 1) Структурно-функц. описание:  $S, X - Y, Y^T$
- 2) Математическая модель  $Y = MM(S, X)$
- 3) Частные критерии:  $k_i = \Phi_i(y_i)$
- 4) Формирование целевой функции  $F(X)$
- 5) Постановка экстремальной задачи МП
- 6) Поисковое решение задачи МП

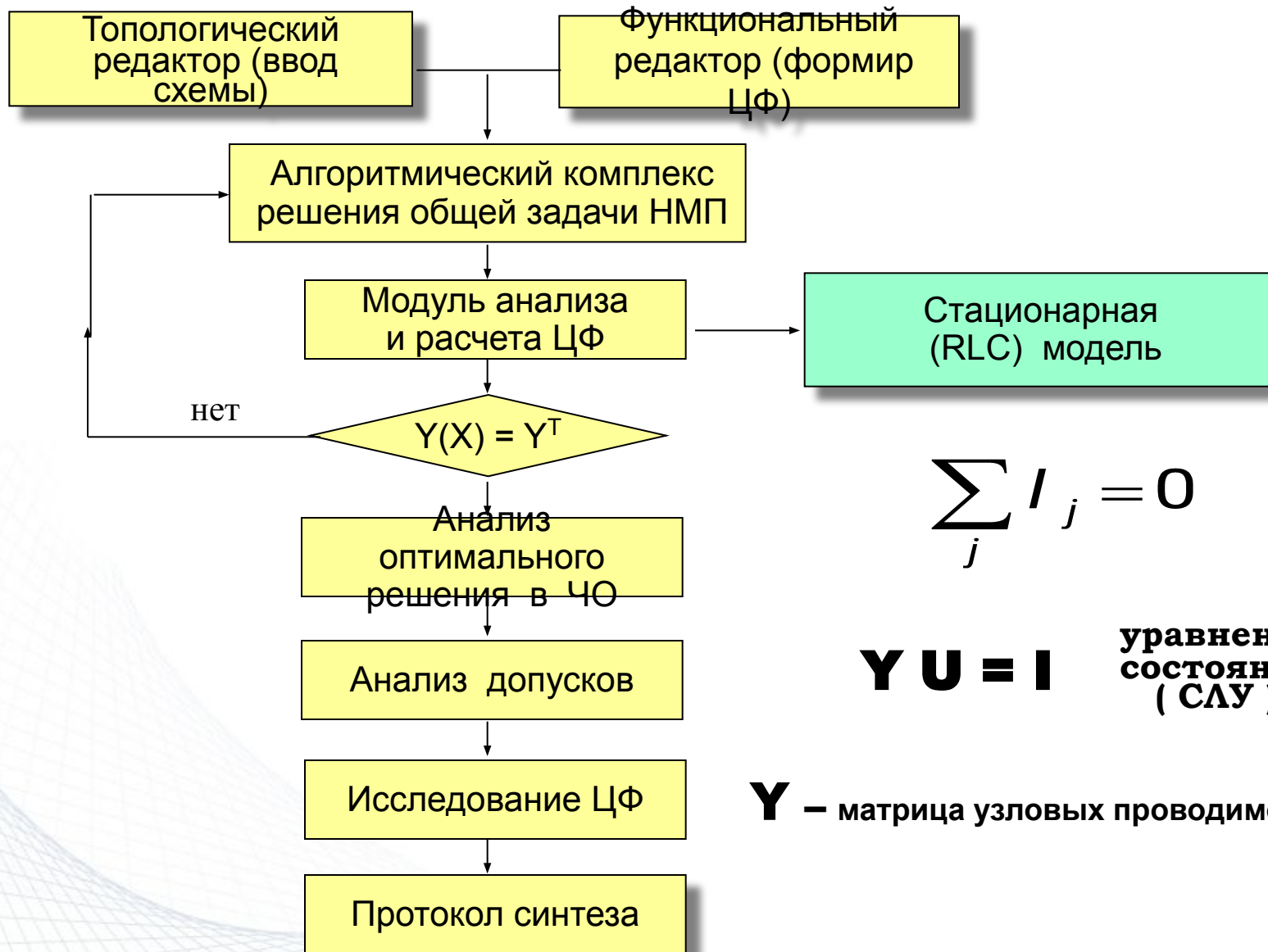


$D^n$  - дискретное пространство параметров

Алгоритм направленного сканирования на детерминированной сетке кода Грея

дискретные ряды  
E6, E12, E24... E192

# Типовая структура программы синтеза



$$\sum_j I_j = 0$$

$$\mathbf{Y U} = \mathbf{I} \quad \text{уравнение состояния (СЛУ)}$$

$\mathbf{Y}$  – матрица узловых проводимостей



# Аналоговые радиоэлектронные программные пакеты САПР

## УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПАКЕТЫ

### I. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ (сосредоточенные цепи)

	Метод	Стоимость
<b>Micro_CAP</b>	УПТ, BDF	<b>10000\$</b>



	Метод
<b>Joint_CAP</b> <b>Л и П С</b>	УПТ УПТ

### II. Пакеты СВЧ (микроразомкнутые линии, волноводы)

	Метод	Стоимость
<b>MicroWave Office</b>	S-параметры МКР	<b>60000\$</b>
<b>MicroWave Studio</b>	S-параметры МКР	<b>80000\$</b>

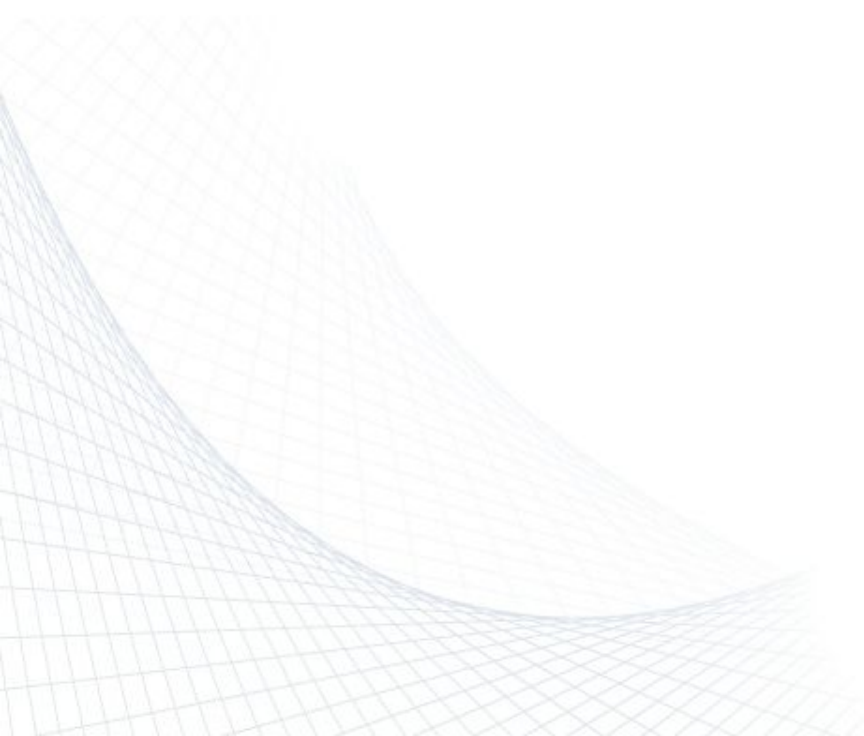


	Метод
<b>МИКРОПОЛ</b>	S-параметры

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПАКЕТЫ

Назначение	Название	Заказчик
1. Синтез устройств на ПАВ	DSW	НПО «ПОЛЁТ», СИНТЕЗПРОМ
2. Синтез активных фильтров ( ARC – схем )	BARC	З-д им. Г.И.Петровского
3. Целочисленный синтез цифровых фильтров	DDF	З-д им. Г.И.Петровского
4. Синтез оптических устройств на волоконных брэгговских решётках	DBF	ИРИТ
5. Синтез интегральных схем	LGTEX	LG Innotek
6. Многокритериальный синтез дискретных сигналов	Barker	«КВАЗАР-КОМЕТА»
7. Параметрический синтез активных селективных R-чипов	BAR	«КВАЗАР-КОМЕТА»
8. Синтез пассивной ЭКБ	СКиФ	НПО «ЭРКОН»

# **Решение математических задач методами оптимизации**



## Классические методы решения

### Линейные уравнения

$$ax + b = 0 \quad a \neq 0 \quad x = -b/a$$

### Нелинейные уравнения

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

### Системы уравнений

$$\begin{cases} a_1x_1 + b_1x_2 + \dots = c_1 \\ a_2x_1 + b_2x_2 + \dots = c_2 \\ \dots \dots \dots = c_m \end{cases}$$

### Системы неравенств

## Методы математического программирования

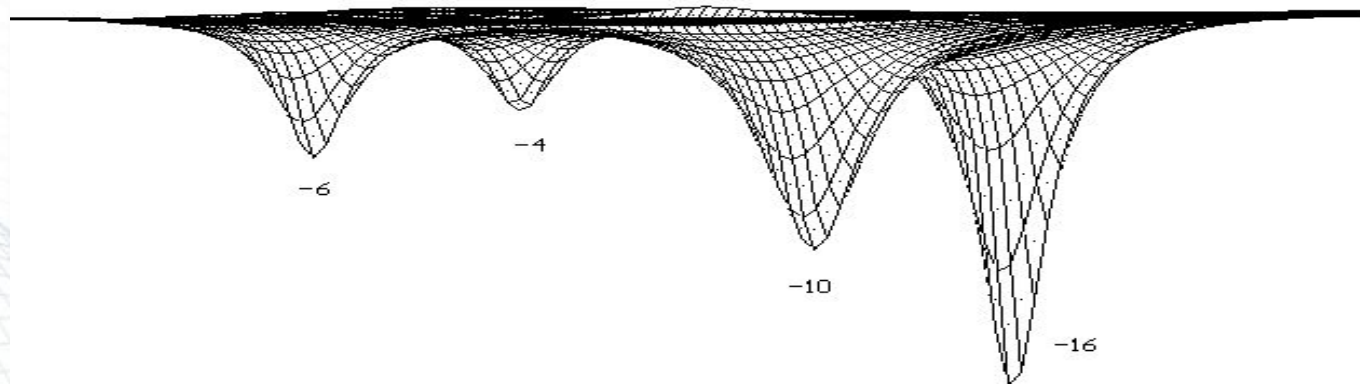
$$\overset{\circ}{F}(\overset{\circ}{X}) = \min F(X) \quad (1)$$

$$X \in D$$

$$x_i^H \leq x_i \leq x_i^B \quad (2)$$

$$X(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3)$$

Целевая функция





# Постановка задачи математического программирования

S

$Y (y_1, y_2, \dots, y_m)$

$X (x_1, x_2, \dots, x_m)$

Система  
уравнений  
 $f_i(X)=0$

$Y^T (y_1^T, y_2^T, \dots, y_m^T)$

1. Абсолютные показатели  $y_i(X) = f_i(X) \quad i = \overline{1, m} \quad y_i^T = 0 \quad (1)$

2. Формирование относительных показателей

$$(2) \quad k_i(X) = [y_i(X) - y_i^T]^2$$

3. Формирование целевой функции

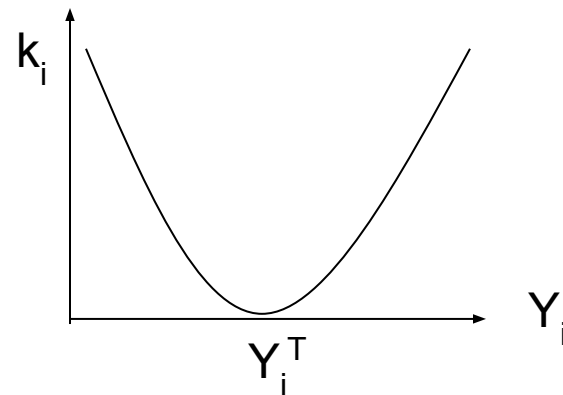
$$F(X) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot k_i(X) \quad (3)$$

4. Постановка экстремальной задачи МП

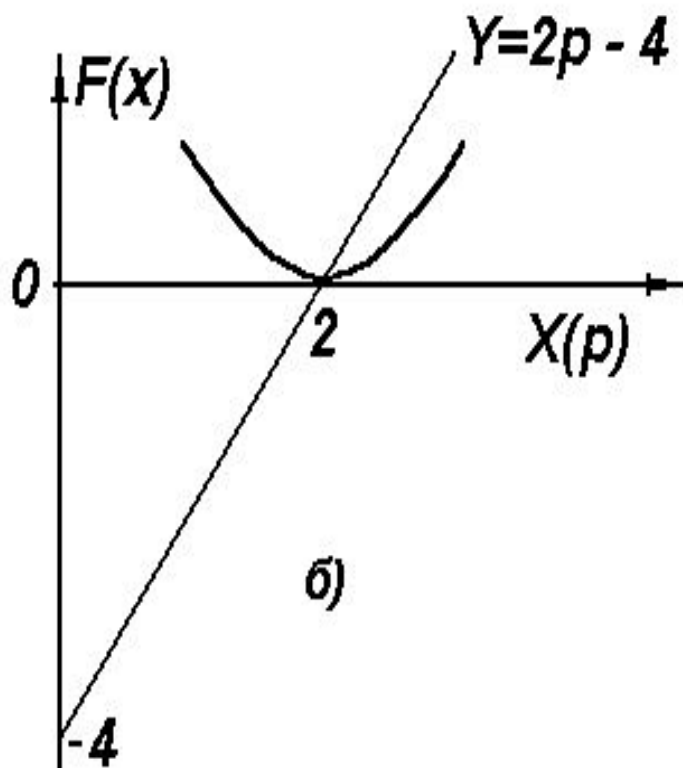
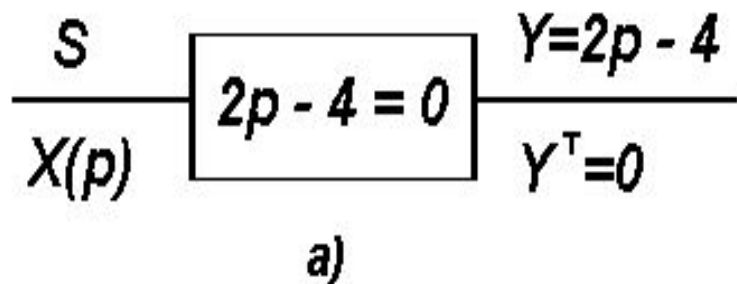
$$\overset{\circ}{F}(\overset{\circ}{X}) = \min F(X) \quad (4)$$

$$X \in D$$

5. Решение задачи МП численными поисковыми методами



## Решение линейного уравнения методами математического программирования



Параметр  $X$  и показатель  $Y$  данной задачи

$$X(p) \quad Y = 2p - 4 \quad Y^T = 0$$

Относительный показатель (частный критерий)

$$k(p) = (2p - 4)^2$$

Целевая функция в однокритериальной задаче:

$$F(p) = k(p)$$

Экстремальная задача МП выглядит так:

$$F^\circ(p^\circ) = \min F(p)$$

$$0 \leq p \leq 5$$



## Решение системы трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} |p - q|^{1,77} + (q - 3)^{0,13} - 2e^{0.1(2p - 3q + 2)} = 0 \\ 3\cos^2(p - q - 1) + e^{\sin(p - 5)} - 4 = 0 \end{cases}$$

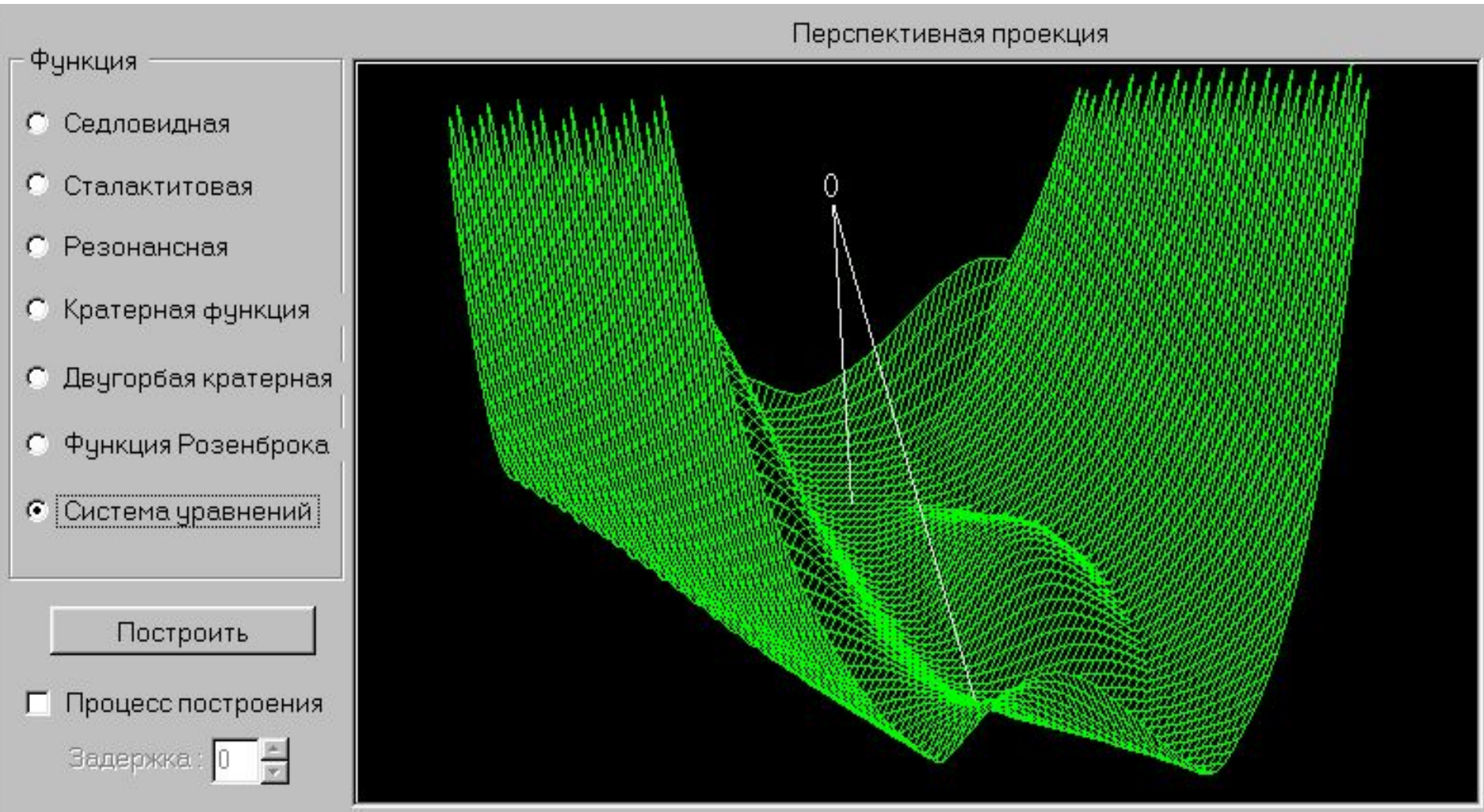
$$y_1 = |p - q|^{1,77} + (q - 3)^{0,13} - 2e^{0.1(2p - 3q + 2)} \quad y_1^T = 0$$

$$y_2 = 3\cos^2(p - q - 1) + e^{\sin(p - 5)} - 4 \quad y_2^T = 0$$

$$Y(y_1, y_2) \quad X(p, q) \quad k_1 = y_1^2 \quad k_2 = y_2^2$$

$$(1) \quad \mathbf{F(x)} = \min_{X \in D} \max\{k_1, k_2\} \quad D : \begin{cases} -10 \leq p \leq 10 \\ 3 \leq q \leq 10 \end{cases}$$

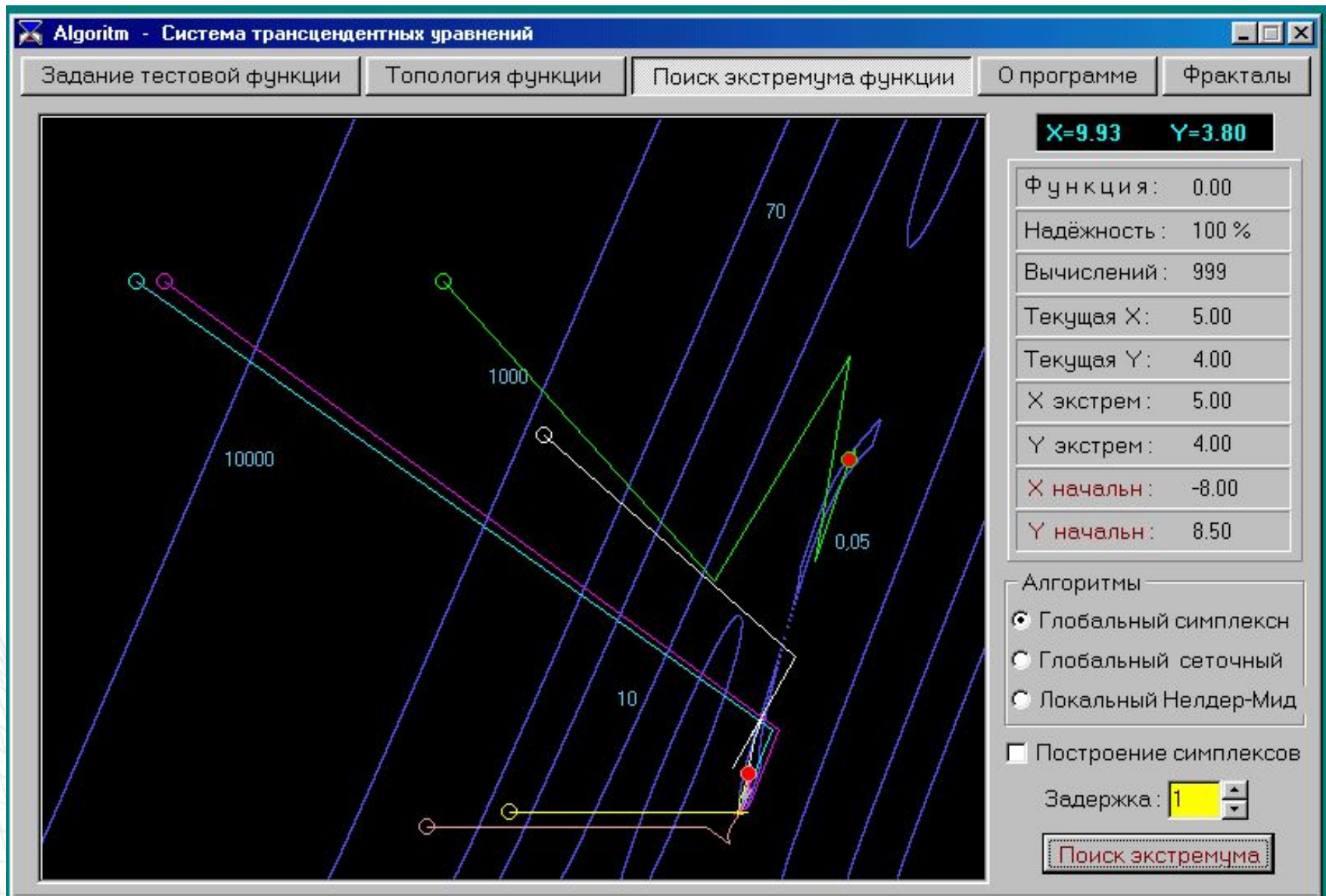
# Исследование целевой функции



$$\begin{cases} |p-q|^{1,77} + (q-3)^{0,13} - 2e^{0.1(2p-3q+2)} = 0 \\ 3\cos^2(p-q-1) + e^{\sin(p-5)} - 4 = 0 \end{cases}$$

$$F(x) = \max\{k_1, k_2\}$$

# Решение системы трансцендентных уравнений



$$p_1 = 5 \quad q_1 = 4$$

$$p_2 = 7,16 \quad q_3 = 6,88$$

Время решения 15 сек

## Вторая модель хозрасчёта предприятия

$k$  - эффективность производства;

$\alpha$  - налоги в бюджет;

$\beta$  - отчисление на развитие (расширенное воспроизводство);

$\gamma$  - ограничение на оплату труда;

$\eta$  - норматив отчисления от объема трудовых затрат;

$\rho$  - рентабельность производства (превыш.доходов над расходами).

Для обеспечения оптимальной организации хозяйства по 2-ой модели хозрасчета необходимо выполнение следующей системы неравенств:

$$\eta - (1 - \alpha) * (1 - k) > 0$$

$$0 < \alpha, \beta, \gamma, \eta, k < 1$$

$$\gamma / (1 - \beta) + \alpha - \eta / (1 + \rho_{\max}) > 1$$

$$0 < \rho < 0,2$$

$$(1 - \beta) * \{(1 - \alpha) * (1 + \rho) - \eta\} > 1$$

$$\rho_{\max} = 0,2$$

1. Приведем к каноническому виду:

$$\eta - (1 - \alpha) * (1 - k) > 0$$

$$Y(y_1, y_2, y_3)$$

$$\gamma / (1 - \beta) + \alpha - \eta / (1 + \rho_{\max}) - 1 > 0$$

$$y_{1,2,3}^T \geq 0$$

$$(1 - \beta) * \{(1 - \alpha) * (1 + \rho) - \eta\} - 1 > 0$$

$$X(\alpha, \beta, \gamma, \eta, k, \rho)$$

где

$$y_1 = \eta - (1 - \alpha) * (1 - k)$$

$$y_2 = \gamma / (1 - \beta) + \alpha - \eta / (1 + \rho_{\max}) - 1$$

$$y_3 = (1 - \beta) * \{(1 - \alpha) * (1 + \rho) - \eta\} - 1$$

## Вторая модель хозрасчёта предприятия

2. Частные критерии типа “не ниже  $y^T$ ”

$$k_i(X) = \begin{cases} y_i(X)^2 & \text{if } y_i(X) < 0 \\ 0 & y_i(X) \geq 0 \end{cases}$$

3. Целевая функция - аддитивный критерий  $F(X) = \sum k_i(X)$

```
float fkrit() // модуль анализа, формирования функции цели
```

```
{ float fk1, fk2, fk3, y1, y2, y3, romax=0.2;
```

```
float eta, ka, alfa, beta, gamma, ro;
```

```
/* система трех неравенств от НСХА */
```

```
eta=x[0]; ka=x[1]; alfa=x[2]; beta=x[3]; gamma=x[4]; ro=x[5];
```

```
/* Расчет целевой функции */
```

```
y1=eta-(1-alfa)*(1-ka);
```

```
y2=alfa+gamma/(1-beta)-eta/(1+romax)-1.0;
```

```
y3=(1-beta)*((1-alfa)*(1+ro)-eta)-1.0;
```

```
fk1=fk2=fk3=0.0;
```

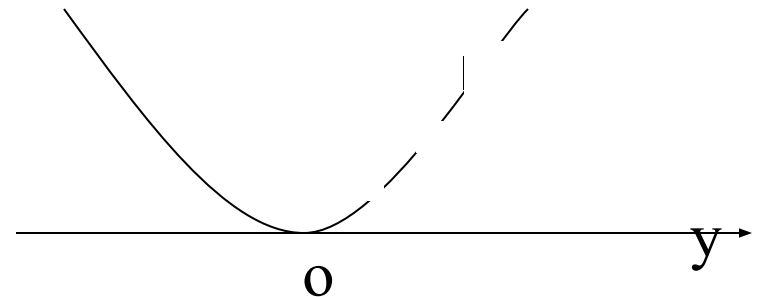
```
if(y1<=0) fk1=y1*y1;
```

```
if(y2<=0) fk2=y2*y2;
```

```
if(y3<=0) fk3=y3*y3;
```

```
Fx=fk1+fk2+fk3;
```

```
} Демонстрация с neqav.dat .
```



F1-индик

F2-точка

F3- шаг

F4-спуск

F5- итог

F6- стоп

F7-диалог

## Поиск решения из точки 1

Function = 1.306549e+00, Вычислений функции 0, Переменные:  
 9.960938e-02 9.960938e-02 9.960938e-02 9.959942e-02  
 9.960938e-02 1.000000e-01

Function = 5.448208e-01, Вычислений функции 81, Переменные:  
 9.960938e-02 9.960938e-02 9.960938e-02 9.959942e-02  
 8.984375e-01 1.000000e-01

Function = 3.847336e-02, Вычислений функции 175, Переменные:  
 9.765625e-02 8.984375e-01 9.960938e-02 9.959942e-02  
 8.984375e-01 1.000000e-01

Function = 1.331525e-02, Вычислений функции 280, Переменные:  
 9.765625e-02 8.984375e-01 9.960938e-02 9.959942e-02  
 9.160156e-01 1.996094e-01

Function = 1.410455e-04, Вычислений функции 902, Переменные:  
 8.203125e-02 9.492188e-01 7.617188e-02 3.710566e-02  
 9.570312e-01 1.996094e-01

Function = 6.115684e-06, Вычислений функции 983, Переменные:  
 7.226562e-02 9.492188e-01 7.617188e-02 3.710566e-02  
 9.570312e-01 1.996094e-01

Function = 0.000000e+00, Вычислений функции 1077, Переменные:  
 6.445312e-02 9.492188e-01 7.617188e-02 3.710566e-02  
 9.570312e-01 1.996094e-01

Function = 0.000000e+00, Вычислений функции 1182, Переменные:  
 6.445312e-02 9.492188e-01 7.617188e-02 3.710566e-02  
 9.570312e-01 1.996094e-01



# Поиское интегрирование дифференциальных уравнений

$$\frac{z'' \cdot z'}{10} - \frac{4z}{t} = t\sqrt{z} \quad (1)$$

$$y_i = 0.1 \cdot z'' z' - \frac{4z_i}{t_i} - t_i \sqrt{z_i} \quad i = \overline{1, m} \quad x_i = z_i(t_i) \quad i = \overline{1, m}$$

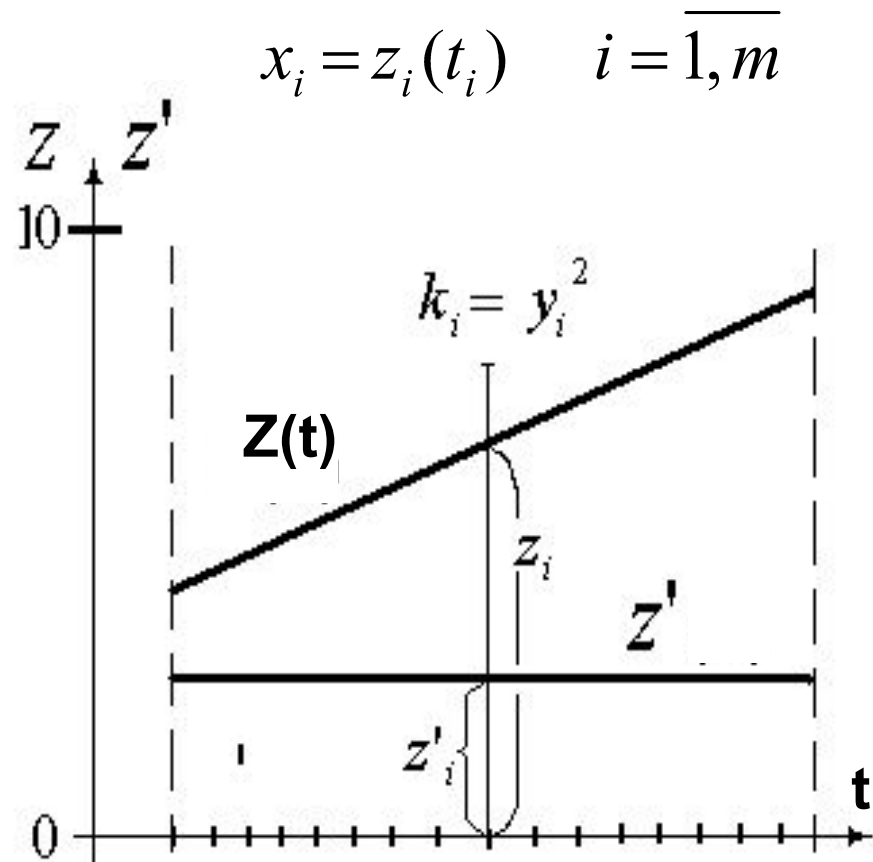
$$k_i = y_i^2 \quad F(z) = \sum_i k_i$$

$$F(z) = \min \sum_i k_i(z_i) \quad (2)$$

$$0 < z_i < 5$$

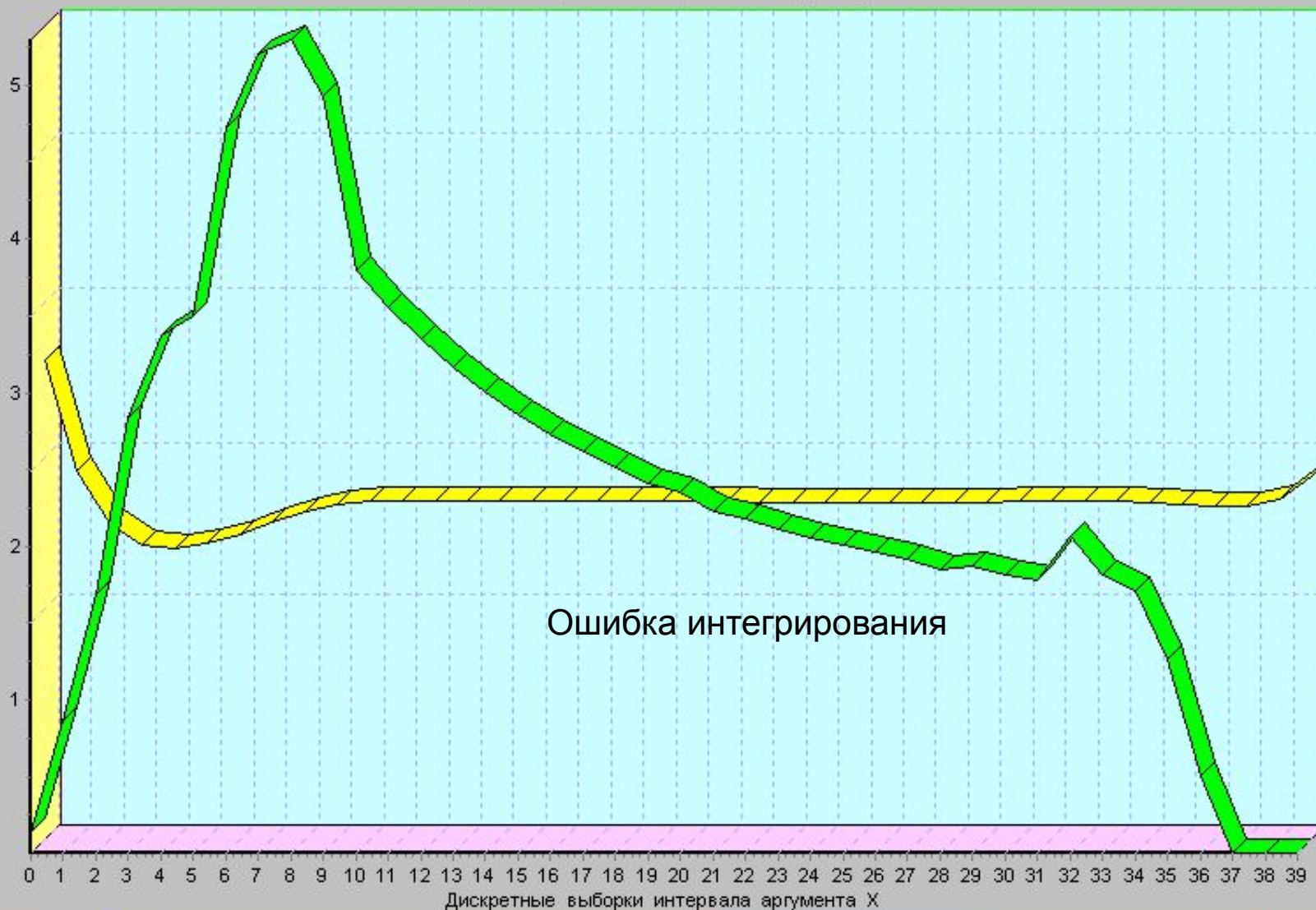
$$t_i^H < t_i < t_i^K$$

$$i = \overline{1, m}$$



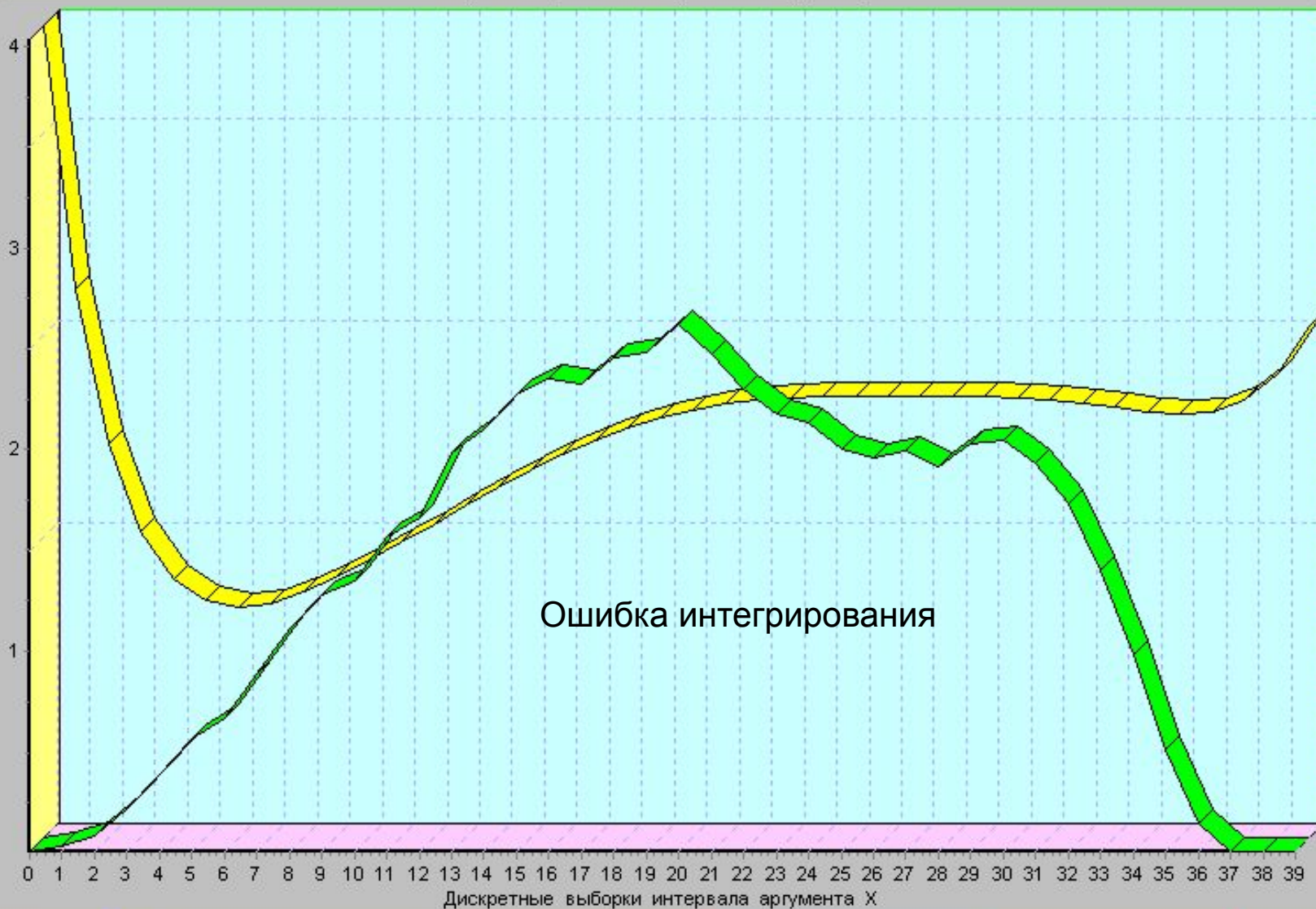
# Поисквое интегрирование дифференциальных уравнений

Первообразная и целевая функции



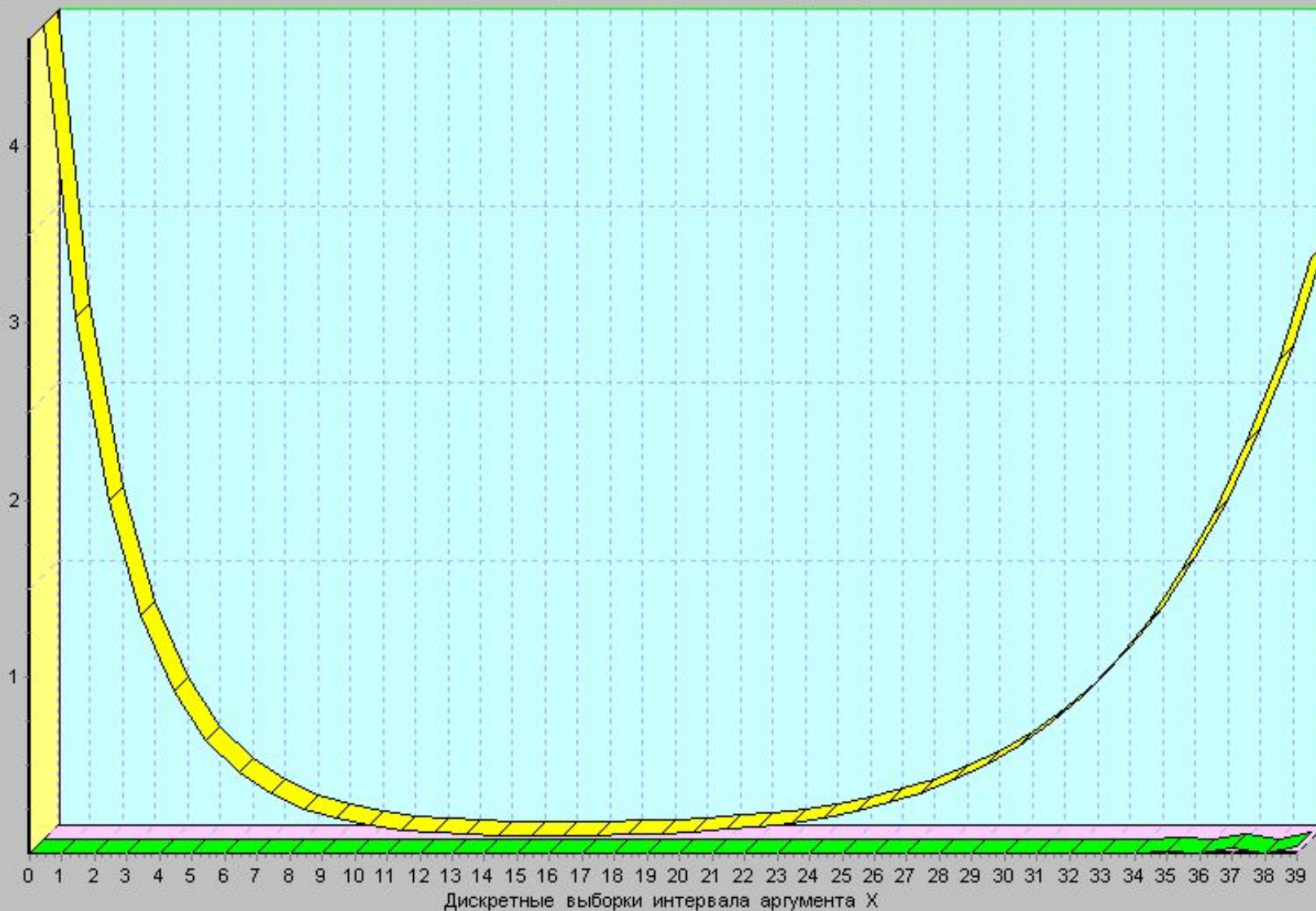
# Поисковое интегрирование дифференциальных уравнений

Первообразная и целевая функции



# Поиское интегрирование дифференциальных уравнений


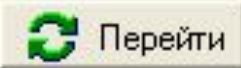

Первообразная и целевая функции



# Поисковое интегрирование дифференциальных уравнений

№ п/п	Выборка функции	Нижняя гран	Значение	Верхняя гран
1	точка дискретизации	2.0000e-02	4.6091e+00	5.000e+00
2	точка дискретизации	2.0000e-02	2.9516e+00	5.000e+00
3	точка дискретизации	2.0000e-02	1.9197e+00	5.000e+00
4	точка дискретизации	2.0000e-02	1.2643e+00	5.000e+00
5	точка дискретизации	2.0000e-02	8.4098e-01	5.000e+00
6	точка дискретизации	2.0000e-02	5.6336e-01	5.000e+00
7	точка дискретизации	2.0000e-02	3.7922e-01	5.000e+00
8	точка дискретизации	2.0000e-02	2.5586e-01	5.000e+00
9	точка дискретизации	2.0000e-02	1.7273e-01	5.000e+00
10	точка дискретизации	2.0000e-02	1.1663e-01	5.000e+00
11	точка дискретизации	2.0000e-02	7.8941e-02	5.000e+00
12	точка дискретизации	2.0000e-02	5.3921e-02	5.000e+00
13	точка дискретизации	2.0000e-02	3.7735e-02	5.000e+00
14	точка дискретизации	2.0000e-02	2.7785e-02	5.000e+00
15	точка дискретизации	2.0000e-02	2.2289e-02	5.000e+00

лист 1

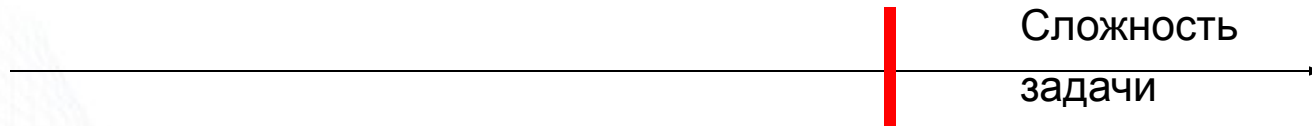
 PageUp  Перейти  PageDw

# Выводы

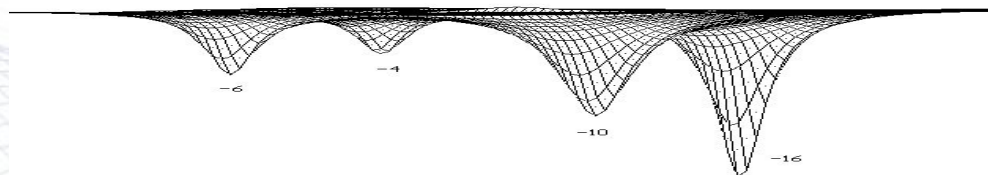
1. Поисковые методы математического программирования являются инвариантной методологией решения сложных математических задач: трансцендентных уравнений и систем, систем неравенств, нелинейных дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} |p-q|^{1,77} + (q-3)^{0,13} - 2e^{0.1(2p-3q+2)} = 0 \\ 3\cos^2(p-q-1) + e^{\sin(p-5)} - 4 = 0 \end{cases}$$

2. Инвариантность определяется внешней идеологией решения, не зависящая от сложности решаемой задачи. При решении математических задач методами МП не существует критерия сложности задачи – необходима только её формализация.



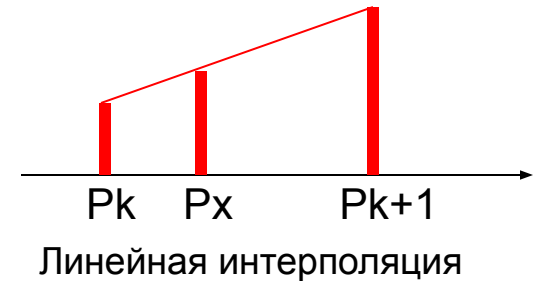
3. Решение сложных задач нелинейного МП возможно только поисковыми методами в многомерном пространстве параметров. При этом возникает критерий надёжности решения, надёжности поисковой минимизации полимодальных целевых функций.



4. Математическая задача, решаемая поисковыми методами МП, может не иметь аналитического выражения – данные, функциональные зависимости могут быть табулированы в таблицу. То есть возможна прямая обработка данных, например, физических измерений без их аналитической аппроксимации.

$$y_1 = |p - q|^{1,77} + (q - 3)^{0,13} - 2e^{0.1(2p - 3q + 2)}$$

$$y_2 = 3\cos^2(p - q - 1) + e^{\sin(p - 5)} - 4$$



Табулированная зависимость  $y_2(p, q)$

$p \backslash q$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
-10	-2.6	-2.5	1.7	-3.1	-1.8	1.1	-3.1	-1.1	0.1	-2.6	-0.7
-8	-0.5	-2.5	-0.4	-0.4	-3.2	0.3	-0.6	-3.6	0.8	-1.1	-3.4
-6	-3.2	-0.4	-0.4	-2.5	-0.5	-1.1	-1.4	-1.1	-1.7	-0.4	-1.9
-4	-1.8	-3.1	1.7	-2.5	-2.6	1.5	-2.9	-1.9	0.8	-2.8	-1.1
-2	-1.0	-1.6	-1.0	-0.4	-2.6	-0.5	-0.2	-3.3	0.0	-0.4	-3.6
0	-3.5	-0.9	0.4	-3.1	-0.5	-0.5	-2.3	-0.6	-1.4	-1.1	-1.1
2	-1.0	-3.3	1.2	-1.6	-3.2	1.5	-2.3	-2.7	1.3	-2.6	-1.9
4	-1.7	-0.9	-1.3	-0.8	-1.8	-1.1	-0.2	-2.7	-0.8	0.1	-3.4
6	-3.3	-1.6	1.2	-3.3	-1.0	0.3	-2.9	-0.6	-0.8	-2.0	-0.7
8	-0.5	-3.1	0.4	-0.9	-3.5	1.1	-1.4	-3.3	1.3	-2.0	-2.7
10	-2.6	-0.4	-1.1	-1.6	-1.0	-1.4	-0.6	-1.9	-1.4	0.1	-2.7

5. Решение сложных задач нелинейного математического программирования возможно как в непрерывном  $E^n$ , так и в дискретном вещественном  $Q^n$  или целочисленном  $I^n$  многомерном пространстве параметров.



В задачах проектирования, например, дискретизация пространства параметров осуществляется стандартными эквидистантными рядами E6 (с погрешностью от номинала 20%) до E192 (0,5%), по которым радиоэлектронные компоненты (резисторы, конденсаторы, индуктивности) производятся промышленностью. Номиналы дискретного ряда E24 (5%) в декаде определяются, например, так:

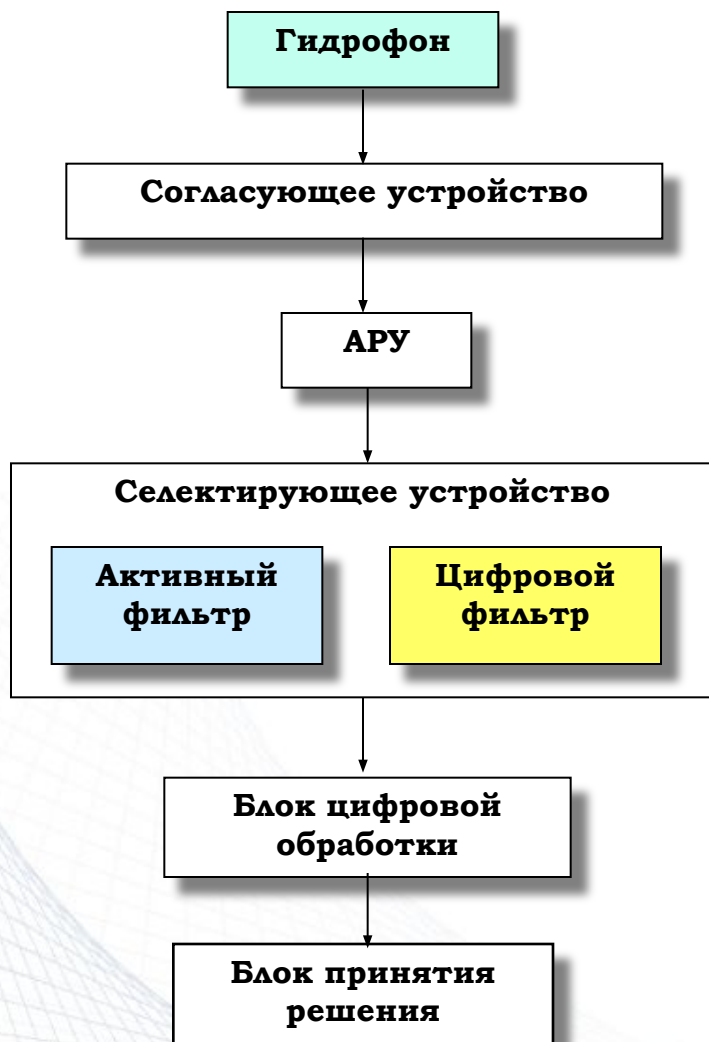
$$R = a \cdot 10^n \quad E24: \{1.0 \ 1.1 \ 1.2 \ 1.3 \ 1.5 \ 1.6 \ 1.8 \ 2.0 \ 2.4 \ 2.7 \ 3.0 \ 3.6 \ 3.9 \ 4.3 \ 4.7 \ 5.1 \ 5.6 \ 6.8 \ 7.5 \ 8.2 \ 9.1 \}$$



# **Дискретный синтез активных фильтров гидроакустического тракта**



# Структура гидроакустической приемной станции



## Основные задачи

1. Управление исполнительным устройством по заданной команде
2. Задачи опознавания объектов по спектру гидроакустических шумов

## Основные требования

1. Обеспечение совокупности требуемых характеристик
2. Произвольная форма характеристик
3. Линейность частотных шкал
4. Низкое энергопотребление
5. Устойчивость работы
6. Низкая стоимость

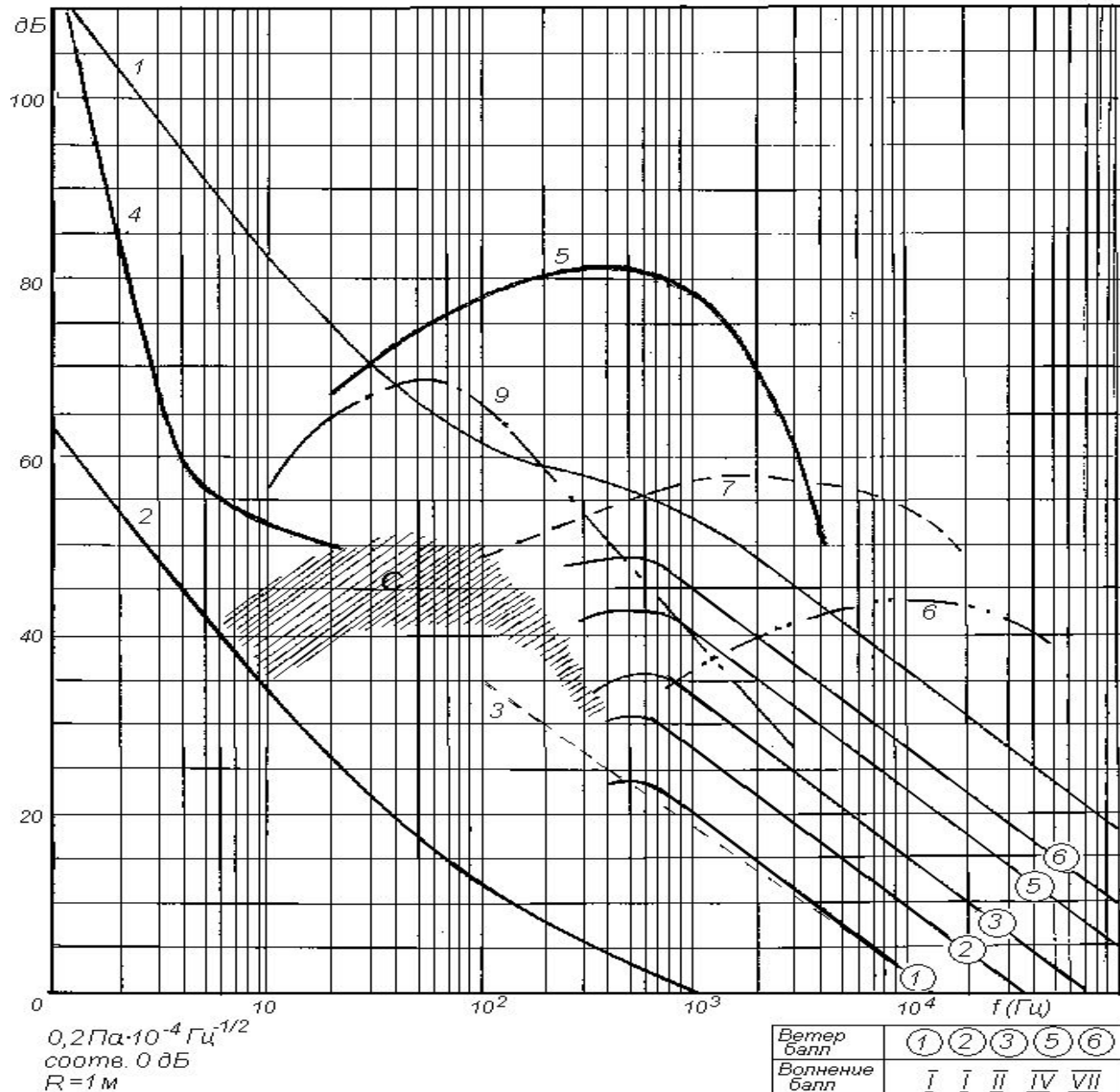
## Аналоговый тракт

Для обеспечения передачи информации по гидроакустическому каналу на дистанции более 5 км используют частотный диапазон не выше 50 кГц. Приведем диапазоны шумов, которые могут повлиять на работу устройства:

- динамические шумы (20 Гц – 16 кГц);
- шумы мирового судоходства, а также в гаванях и прибрежных районах от технических сооружений (20 – 150 Гц);
- сейсмические шумы (0,1 – 25 Гц);
- подледные шумы (100 – 300 Гц, пики интенсивности на частотах 0,3 – 0,5 и 3 – 5 кГц);
- биологические шумы (63 Гц – 200 кГц);
- тепловые шумы (на 50 кГц порядка 8,9 мкПа).

Биологические шумы имеют обычно малую интенсивность. Они могут помешать только тогда, когда прибор находится в местах массового скопления их источников, носящих сезонный характер.

# Гидрофонный тракт



1, 2 – максимальные и минимальные уровни шумов

3 – шум при штиле по Кнудсену

4 – сейсмические шумы

5 – шум горбылевых рыб

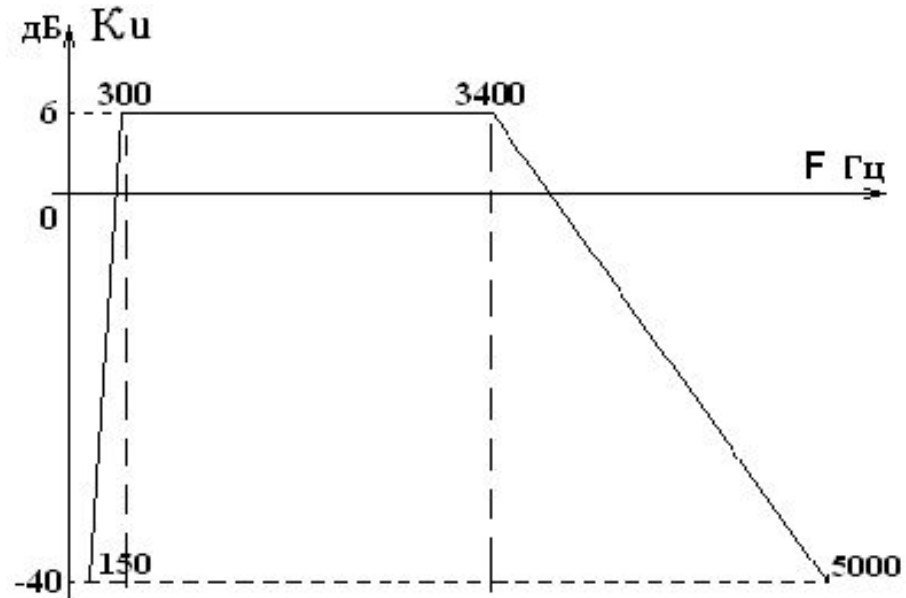
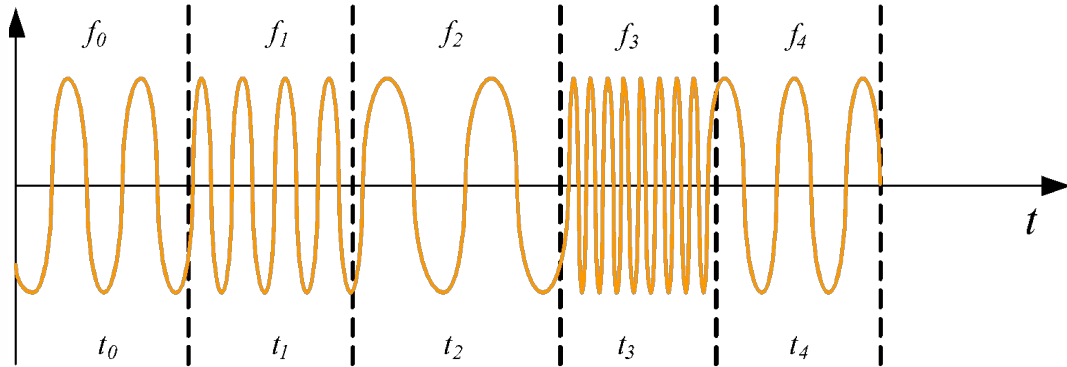
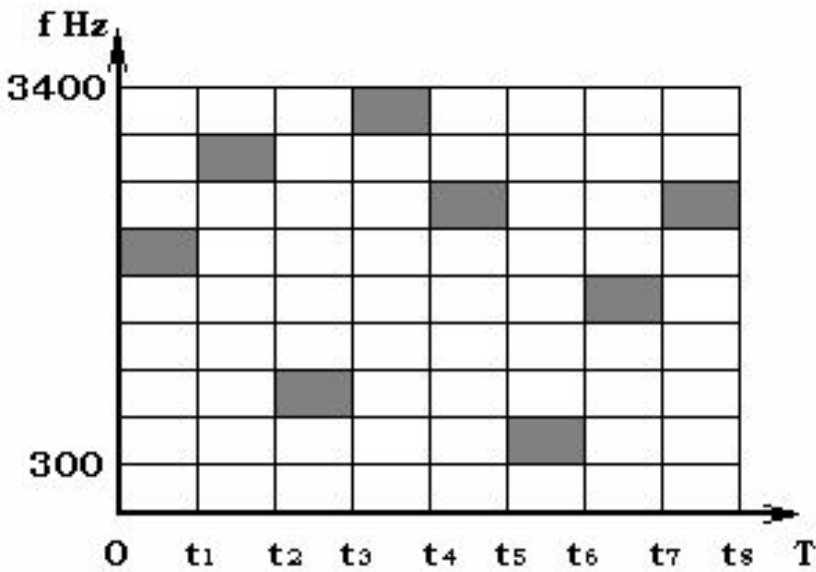
6 – шум креветок

7 – шум ливня

9 – шумы интенсивного судоходства

С – шумы умеренного судоходства

# Структура ЧВС сигнала



ВОЗМОЖНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ БОЛЬШОГО  
ОБЪЕМА ИНФОРМАЦИИ

- полоса 3 кГц,
- восемь несущих частот,
- 127 дискретных значений  
количество сообщений более 10 млрд.



расширенная    непрерывный    нормальный

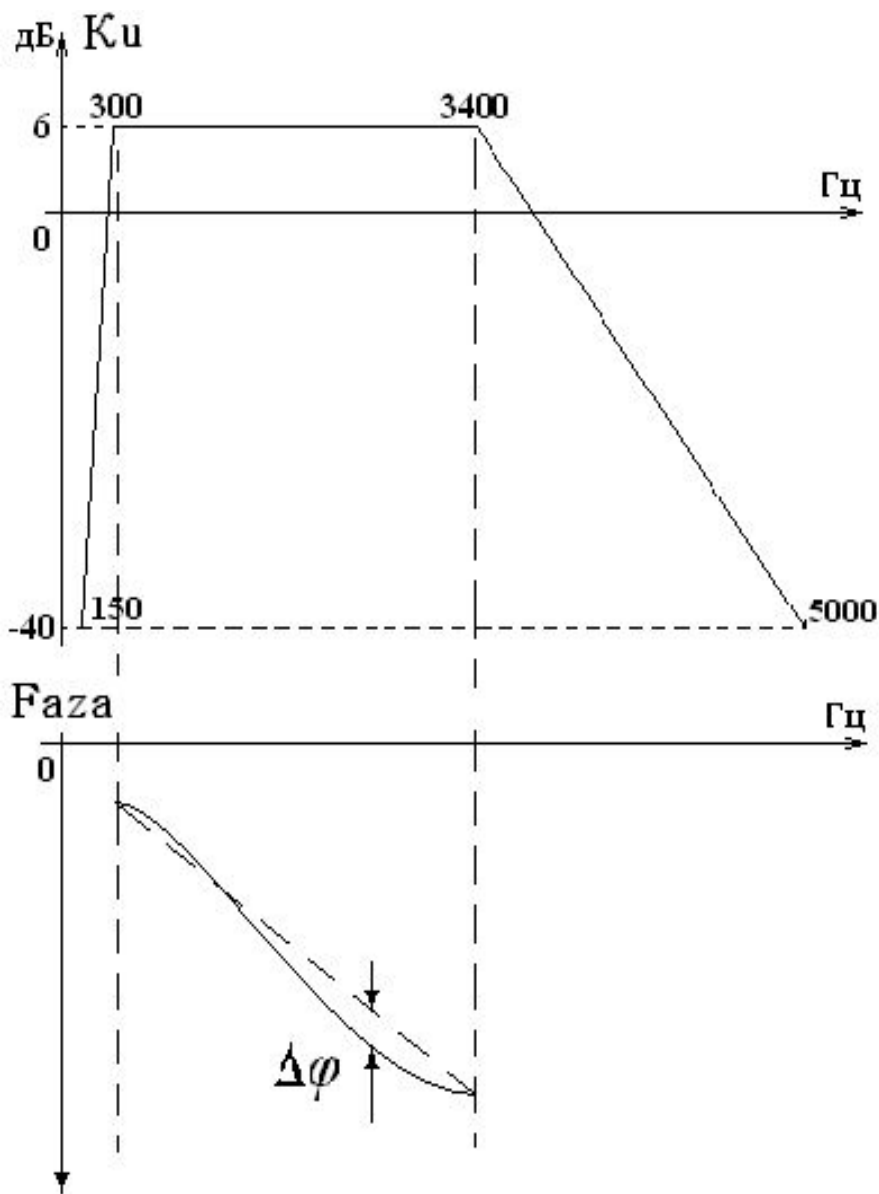
# СИНТЕЗ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Copyright ©

800 x 600

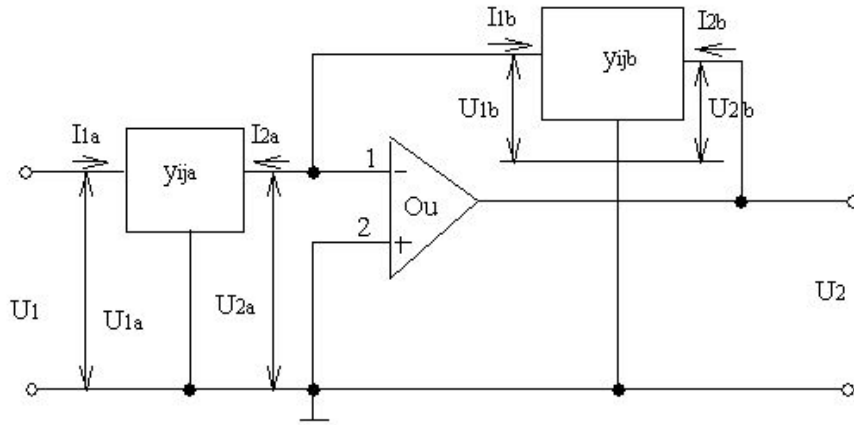
# Техническое Задание

## Активный полосовой фильтр 300 – 3400 Гц



1. Полоса пропускания 300 – 3400 Гц
2. Усиление в полосе  $6 \pm 0.5$  дБ
3. Затухание на 150 Гц не менее -40 дБ
4. Затухание на 5 кГц не менее -40 дБ
5. Фазовые искажение не более 60 градусов в полосе 300 – 3400 Гц
6. Дискретизация варьируемых параметров по ряду E192
7. Компонентные ограничения  
 $C_{\max} = 44.2$  нФ      $C_{\min} = 36$  пФ

# Выбор схемы каскадов фильтра



Одноконтурная обратная связь

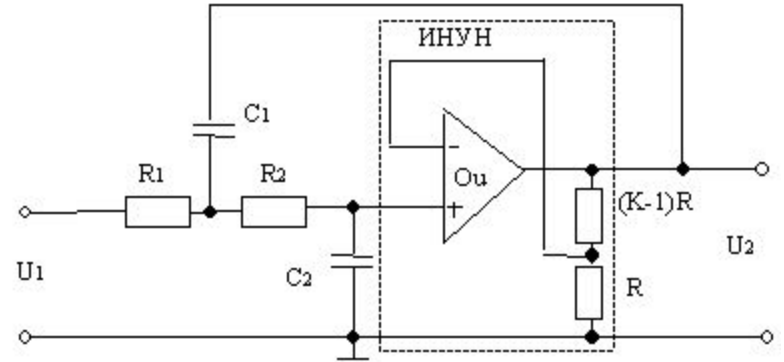


Схема на источнике напряжения, управляемом напряжением

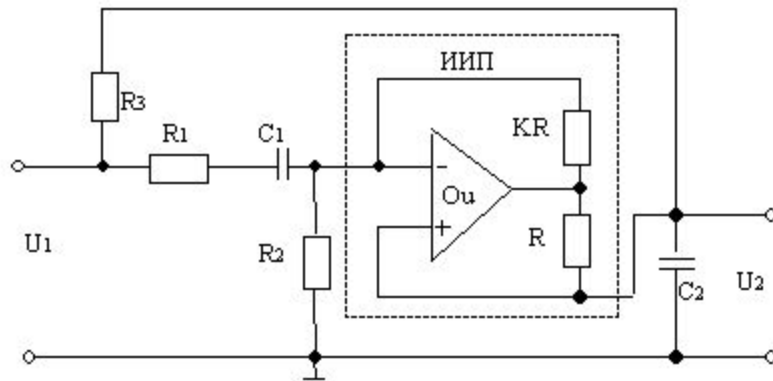
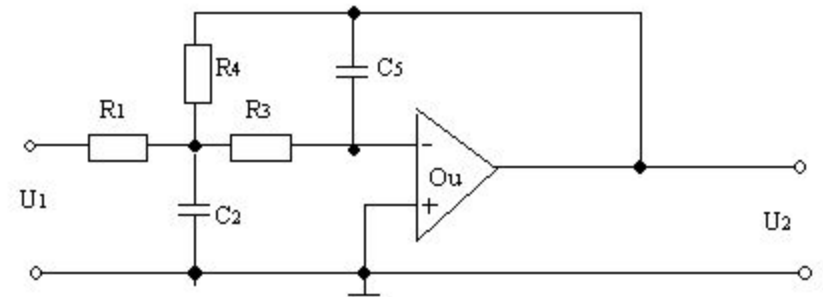
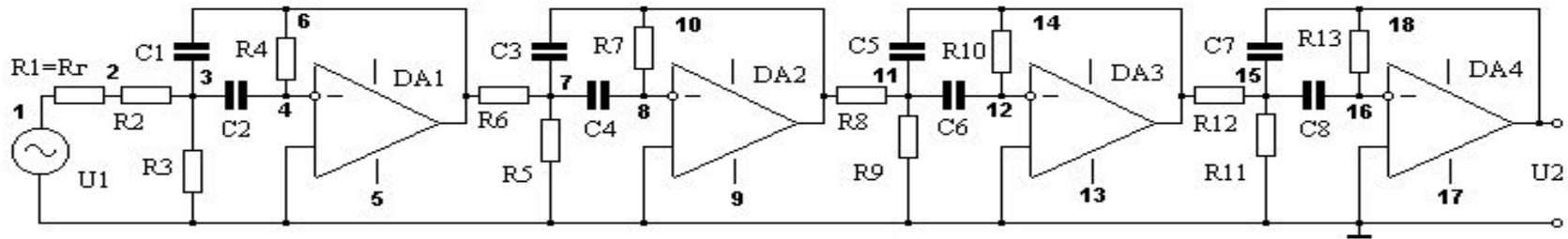


Схема с инвертором проводимостей

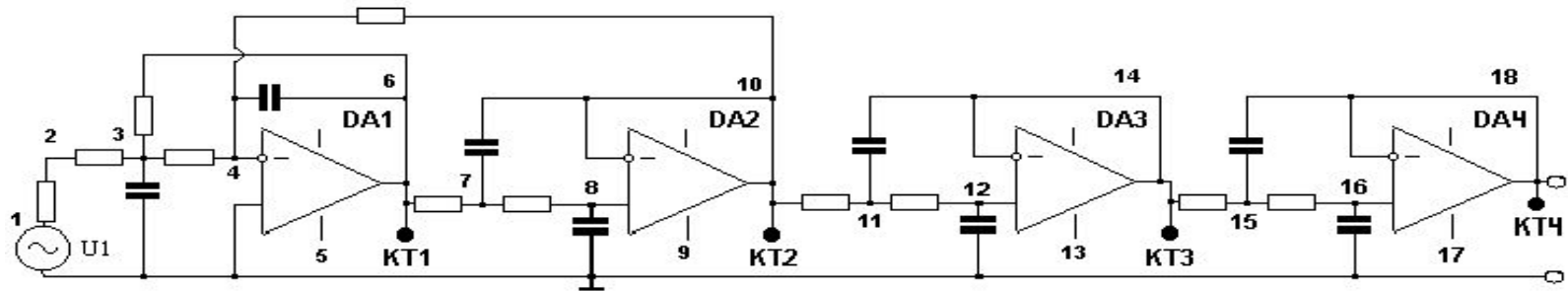


Многопетлевая обратная связь

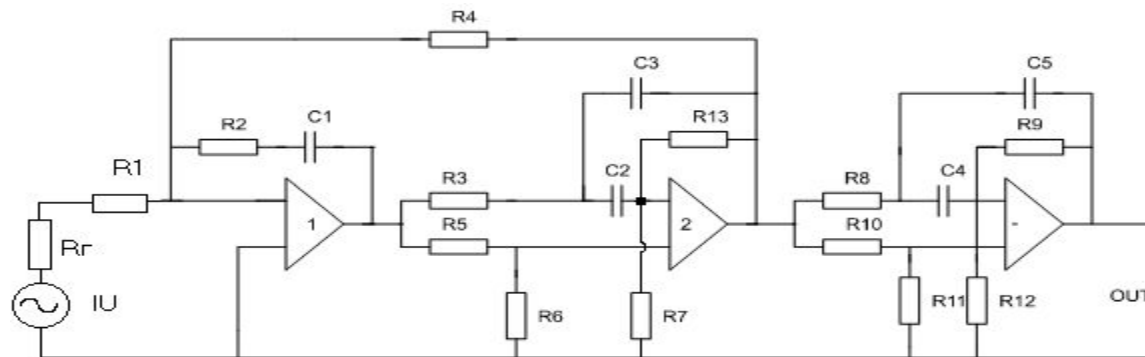
# Выбор структурной схемы ДАФФ



1. Активный фильтр на одинаковых каскадах с двухконтурной ОС



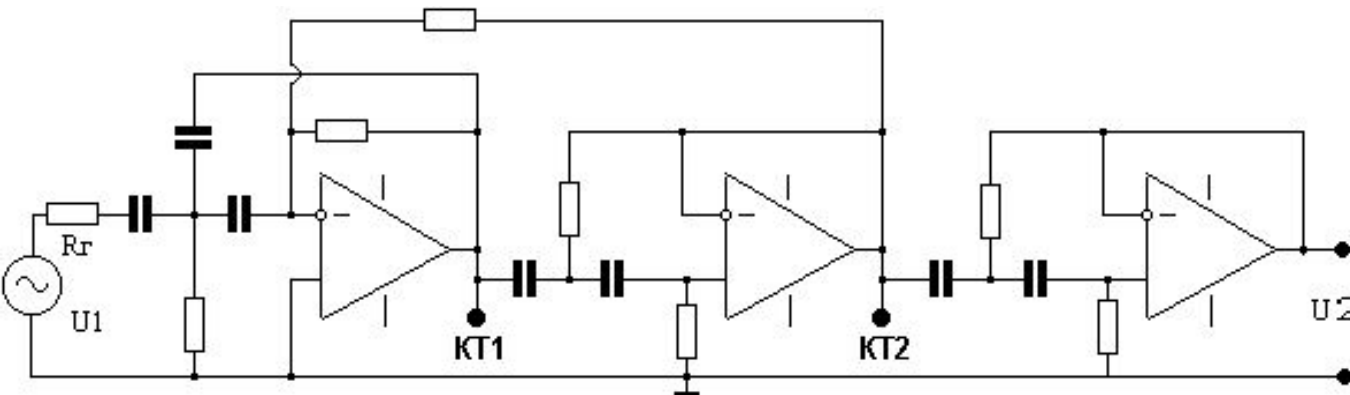
3. Активный полиномиальный ФНЧ с межкаскадной ОС



3. Активный эллиптический ФНЧ с межкаскадной ОС



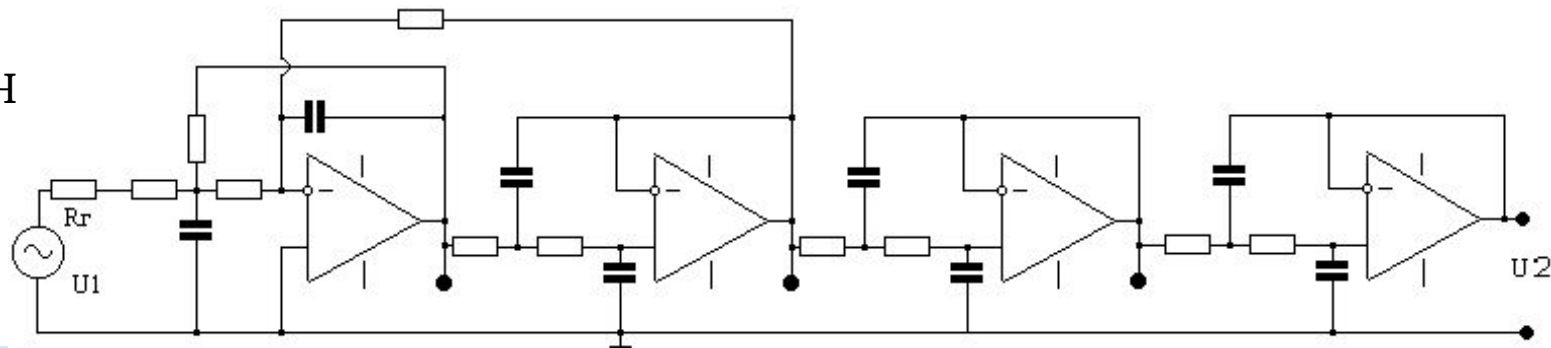
# Синтез полосового фильтра 300 – 3400 Гц на полиномиальных ФВЧ и ФНЧ каскадах



Линейка ФВЧ

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}$$

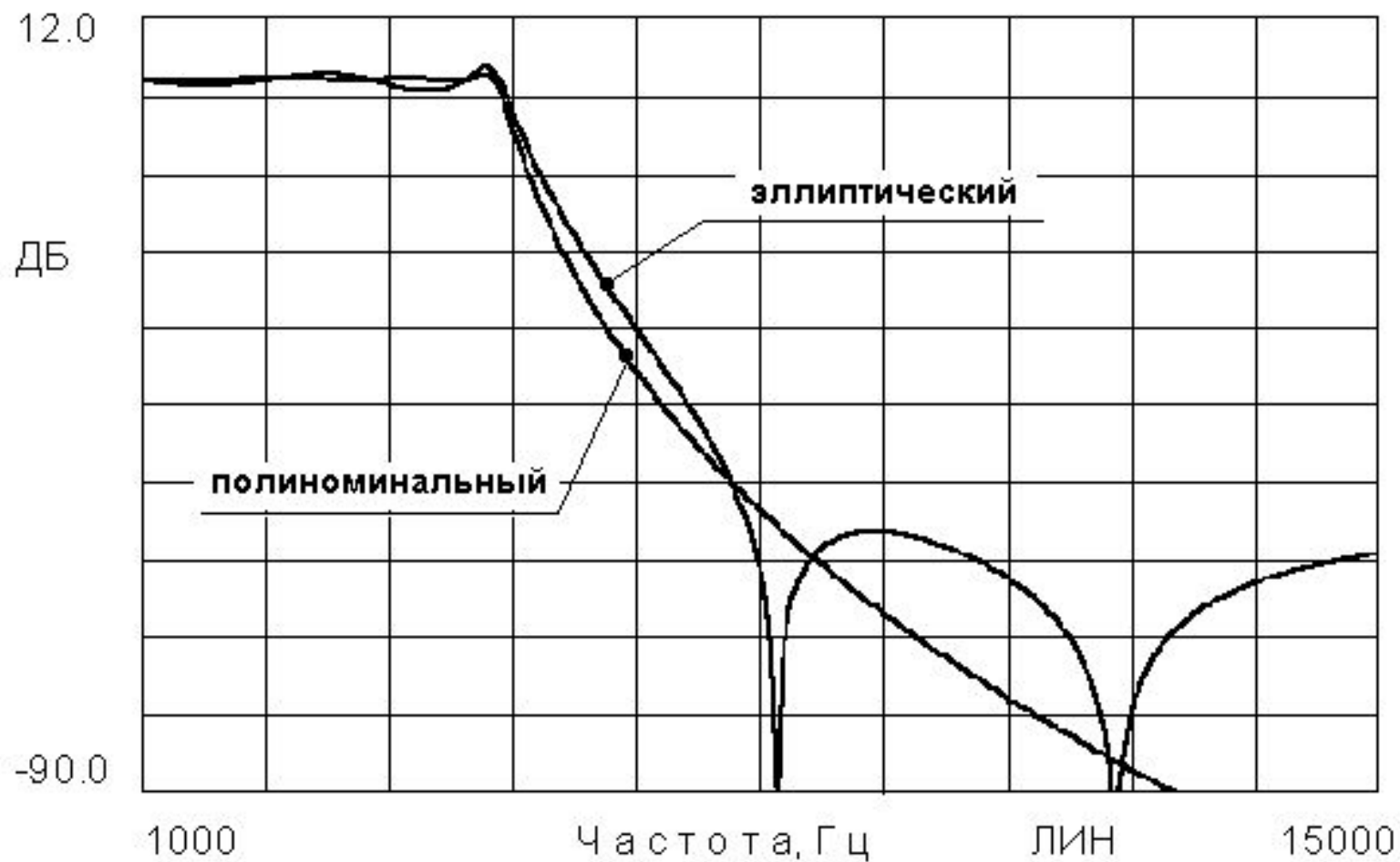
Линейка ФНЧ



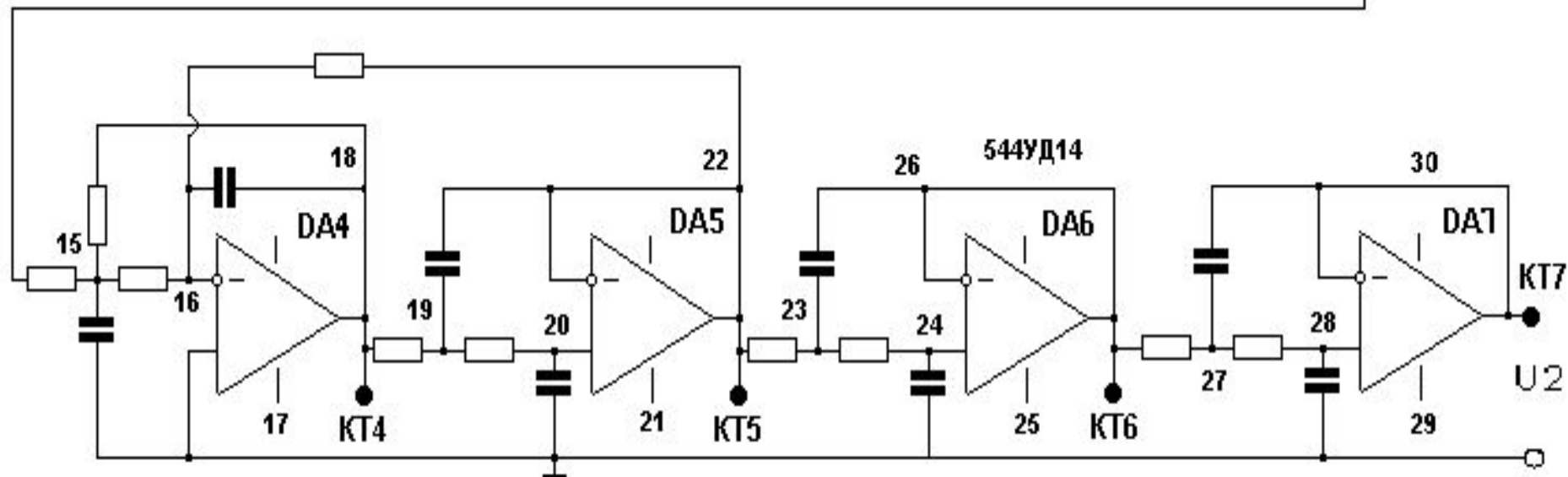
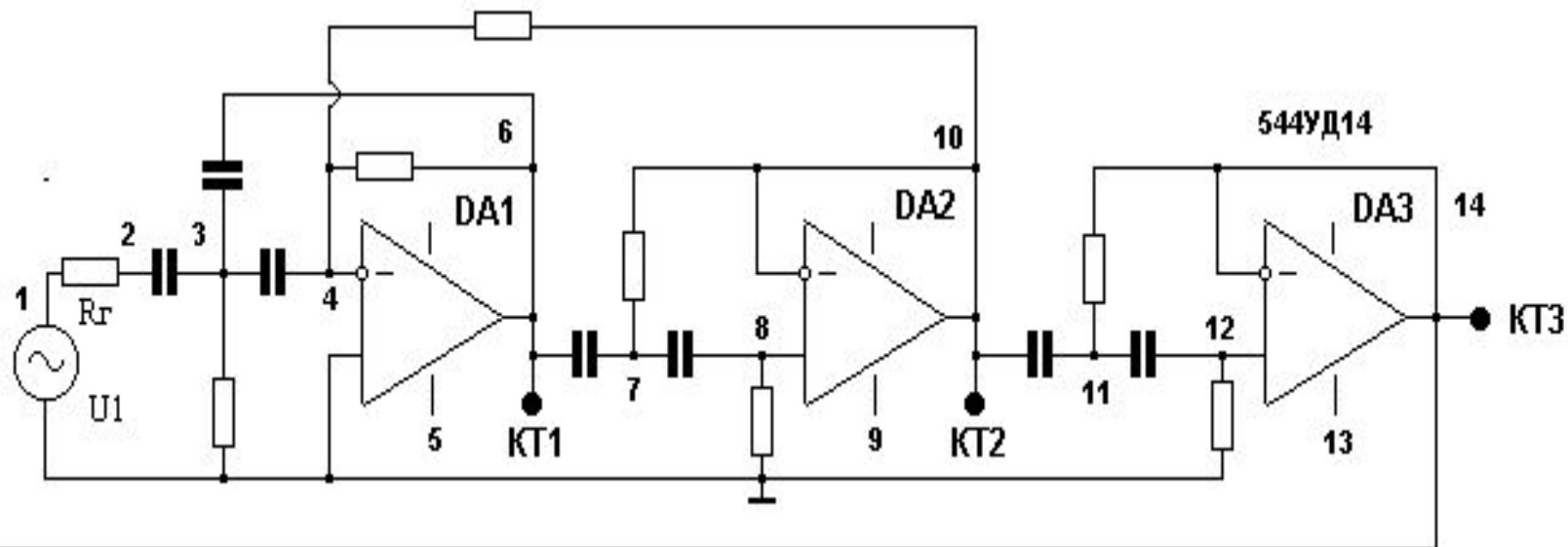
$a$  и  $b$  – вещественные постоянные величины, а  $m, n=1, 2, 3, \dots (m \leq n)$ .

Если все коэффициенты  $a=0$ , за исключением  $a_0$ , передаточная функция не содержит конечных нулей, при этом все полюсы передаточной функции конечны. В этом случае фильтр является полиномиальным

## Особенности ЧХ активных фильтров полиномиальной и эллиптической структуры



# Выбор структурной схемы



# Выбор операционного усилителя

Название	Производитель	Ток потребления	Питание	Полоса (по 0 Дб)	Штук в корпусе
МСР6144		600 нА	$\pm 3,5$ В	5 кГц	4
AD8132		7,25 мА	$\pm 5.5$ В	400 МГц	2
544 уд 14		1,7 мА	$\pm 7,5$ В	1 МГц	4
МАХ4254		1,5 мА	$\pm 2,5$ В	2 МГц	4

## ПРИМЕНЕНИЯ

- Многокаскадные схемы с высоким входным сопротивлением и повышенным быстродействием
- Преобразователи тока в напряжение, в том числе для ЦАП
- Инструментальные усилители
- Схемы активных фильтров

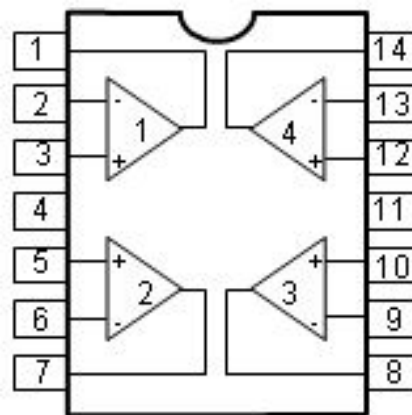


## СЧЕТВЕРЕННЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ПОЛЕВЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ НА ВХОДЕ И УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

544УД14АР1  
544УД14БР1  
544УД14АР3  
544УД14БР3

### ОСОБЕННОСТИ

- Низкий входной ток 30 нА (тип)
- Высокое входное сопротивление  $10^{12}$  Ом
- Высокое быстродействие 12 В/мкс (тип)
- Частота единичного усиления 2,7 МГц (тип)
- Малый ток потребления на канал 1,7 мА (тип)
- Полная внутренняя частотная коррекция



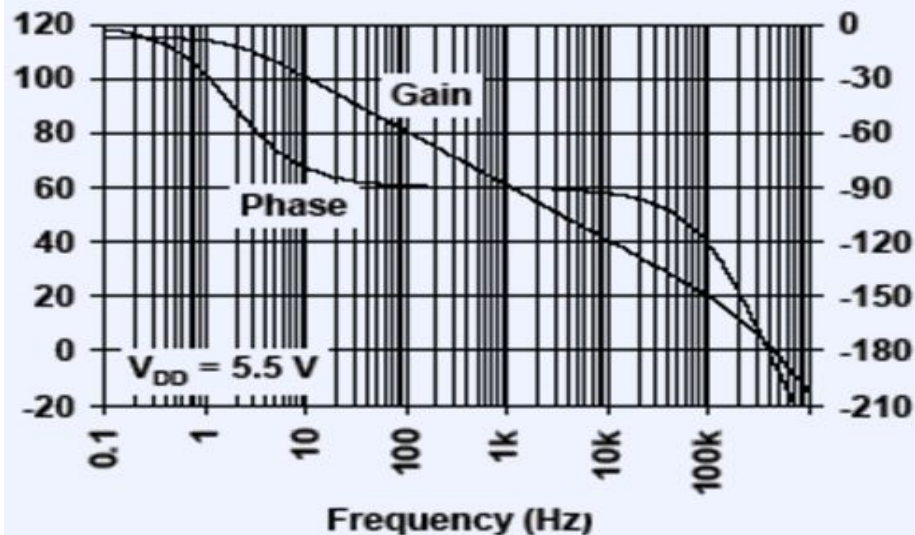
### Основные характеристики:

Входное сопротивление –  $10^{12}$  Ом

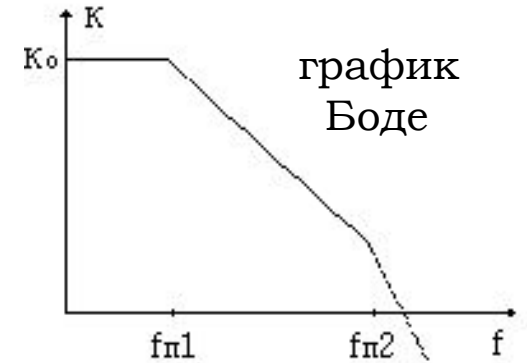
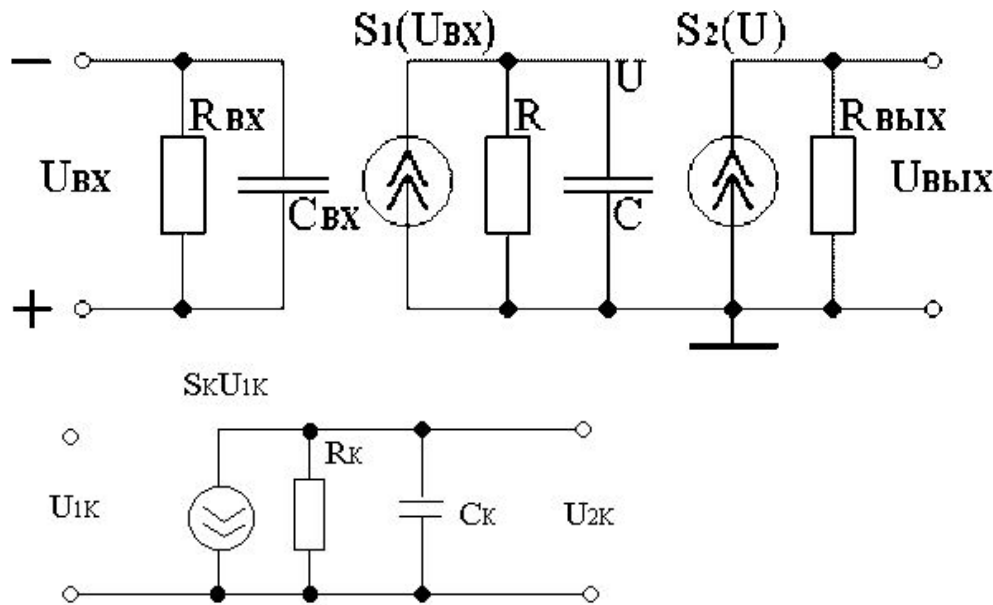
Входная емкость – 7 пФ

Выходное сопротивление (без ОС) – 150 Ом

Питание  $V_{DD}$   $V_{SS}$  -  $\pm 7,5$  В ( $7,5 \pm 2,5$ )



# Однополюсные макромодели операционных усилителей

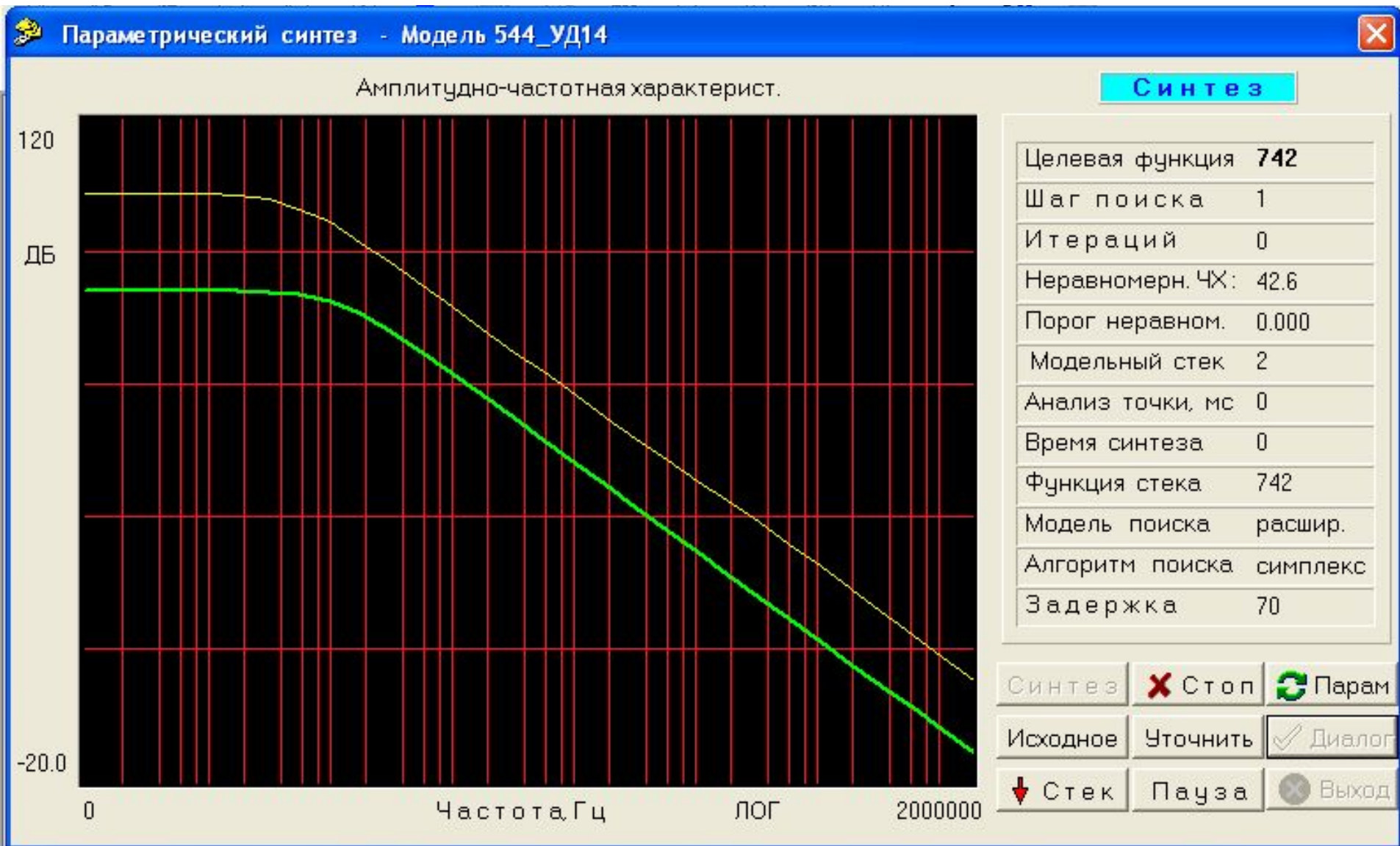


$$f_{пк} = \frac{1}{R_K C_K}$$

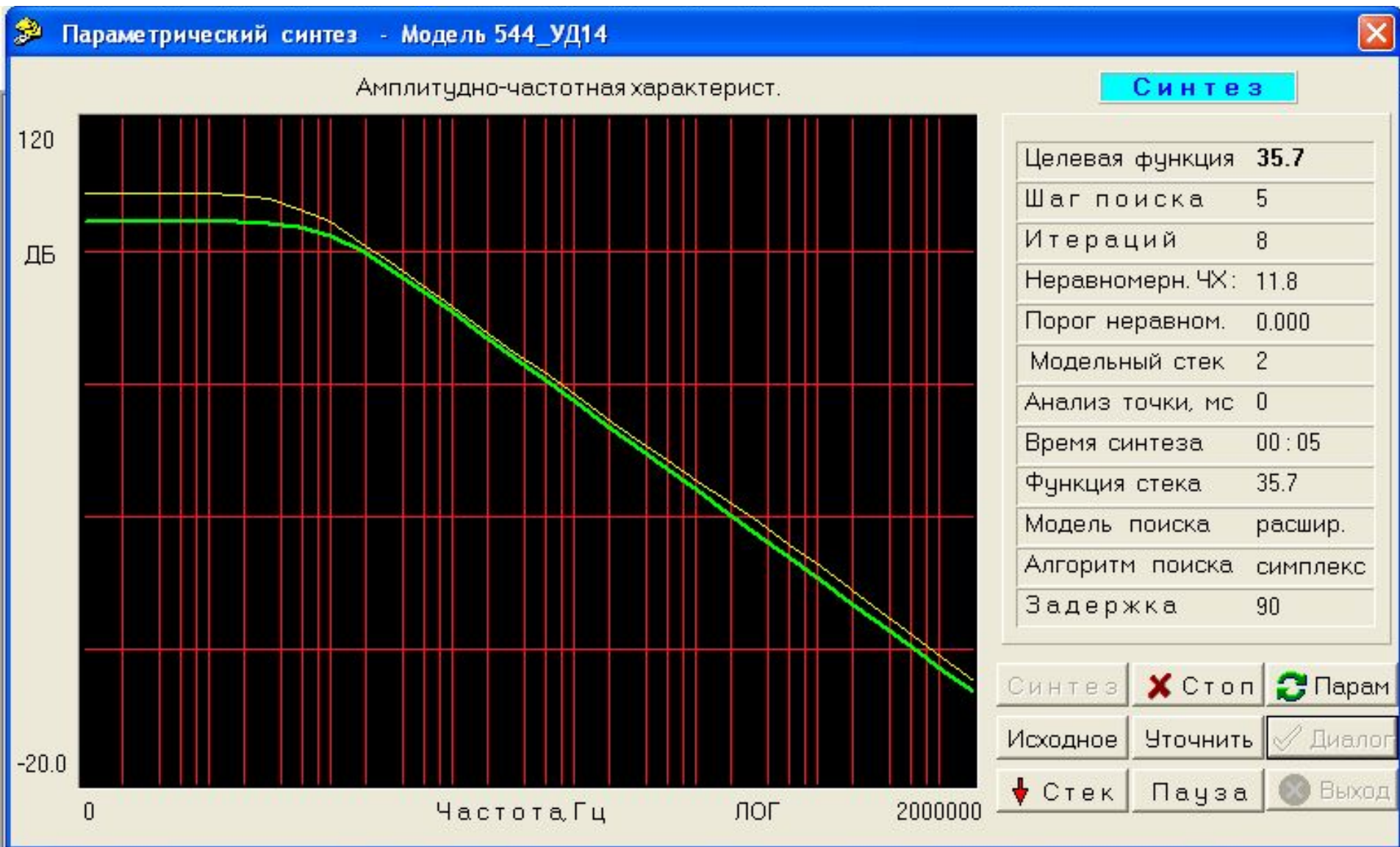
Звено, моделирующее k-ый полюс передаточной функции ОУ

Тип	Полюс Гц	RВХ Ом	СВХ Ф	S1 а/в	R Ом	C Ф	S2 а/в	RВЫХ Ом
MAX4254	1000	1e9	1.1e-11	1	630000	5e-10	0.0017	3.3
MCP6141	0.01	1e13	6e-12	1	850000	1e-6	0.07	10
544УД14	5	1e9	1.1e-11	1	800000	2.41e-8	0.003	200
LMH6643	10000	3e6	2e-12	0.4	580000	5e-9	0.023	100
AD_8137 sim	1000	4e5	3.6e-12	0.2	2100	7e-9	0.005	100
K140УД26	12000	3e6	1e-12	1	100000	4e-11	8.7e-5	150

# Оптимизация параметров макромодели 544УД14

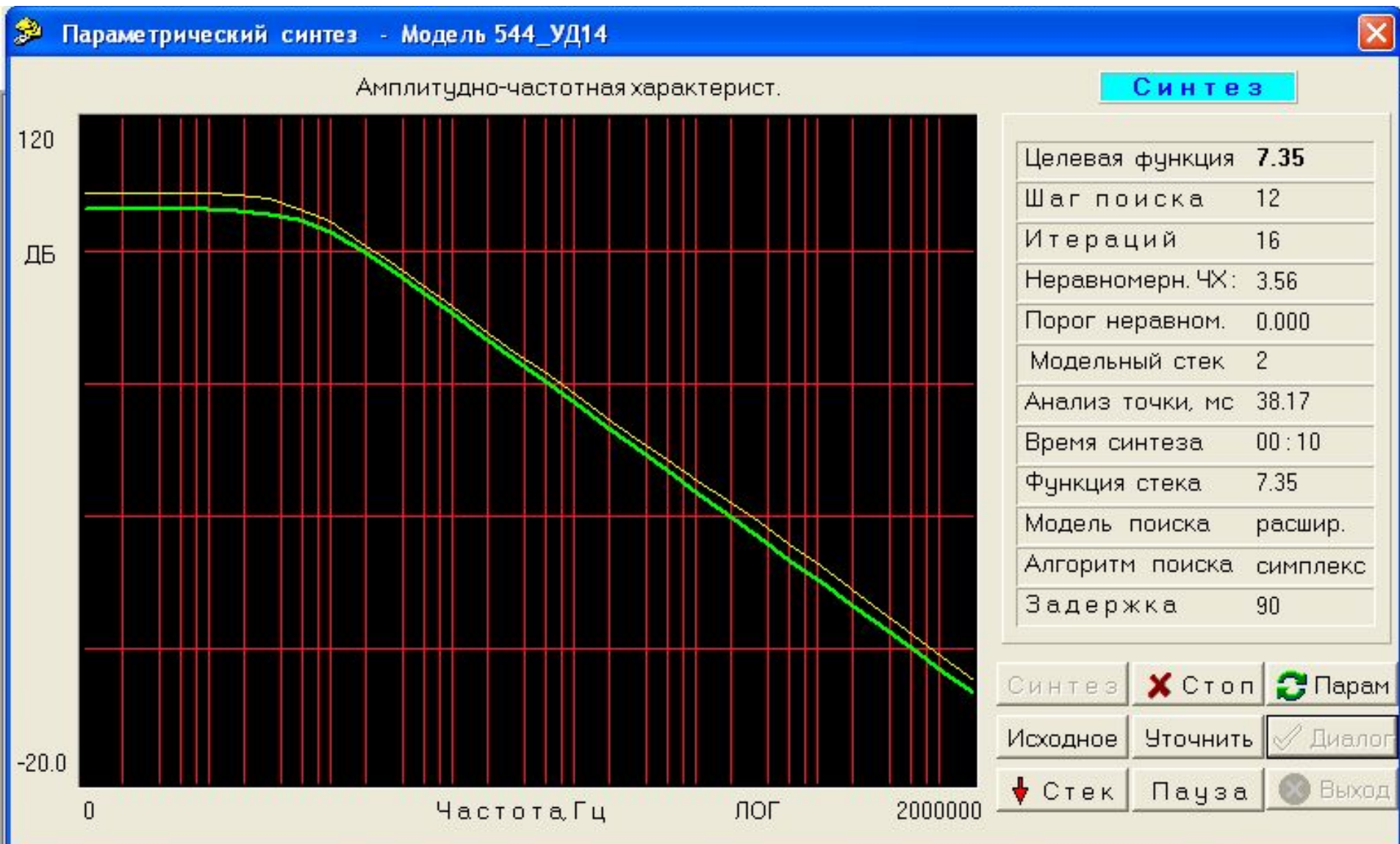


# Оптимизация параметров макромодели 544УД14

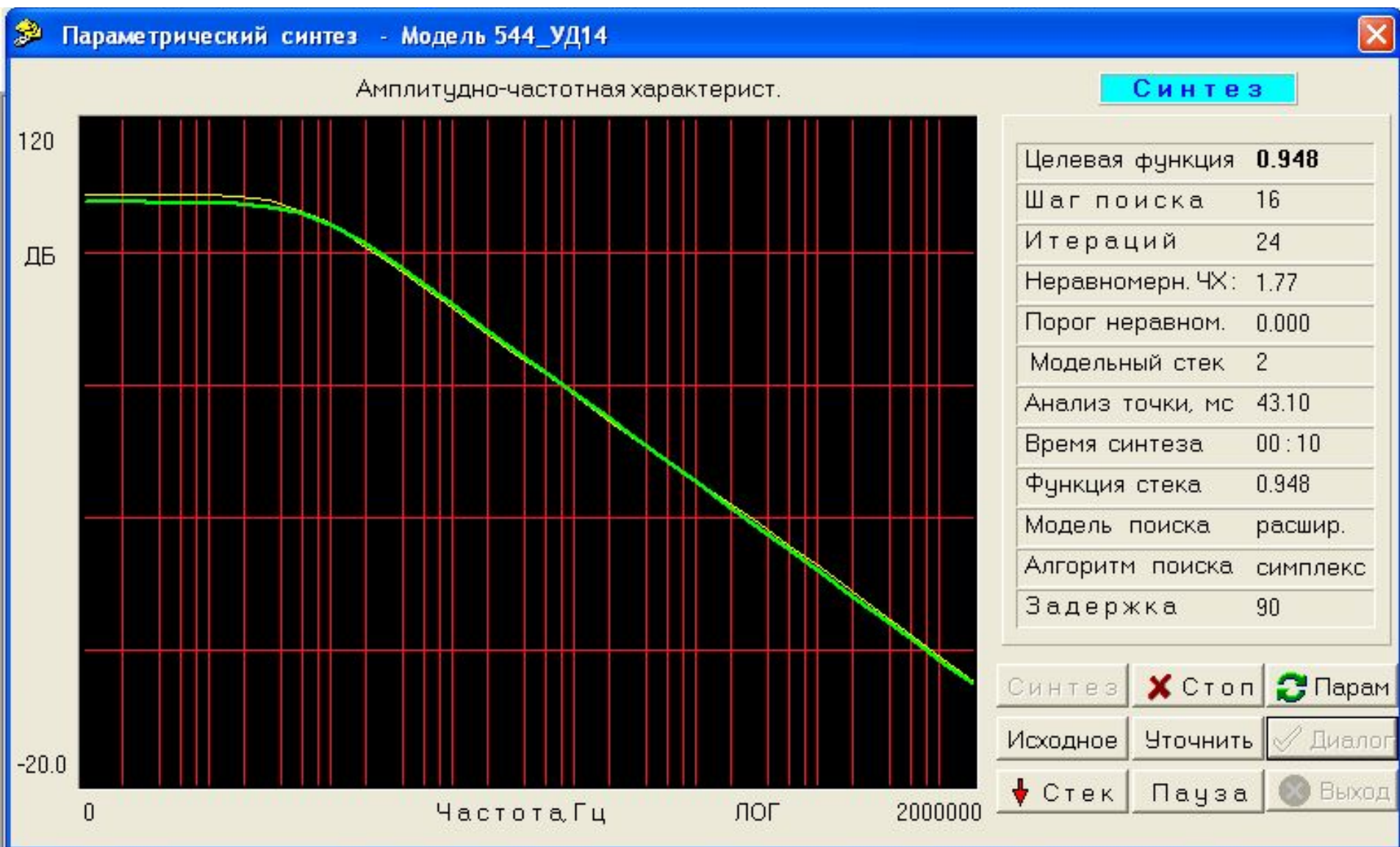




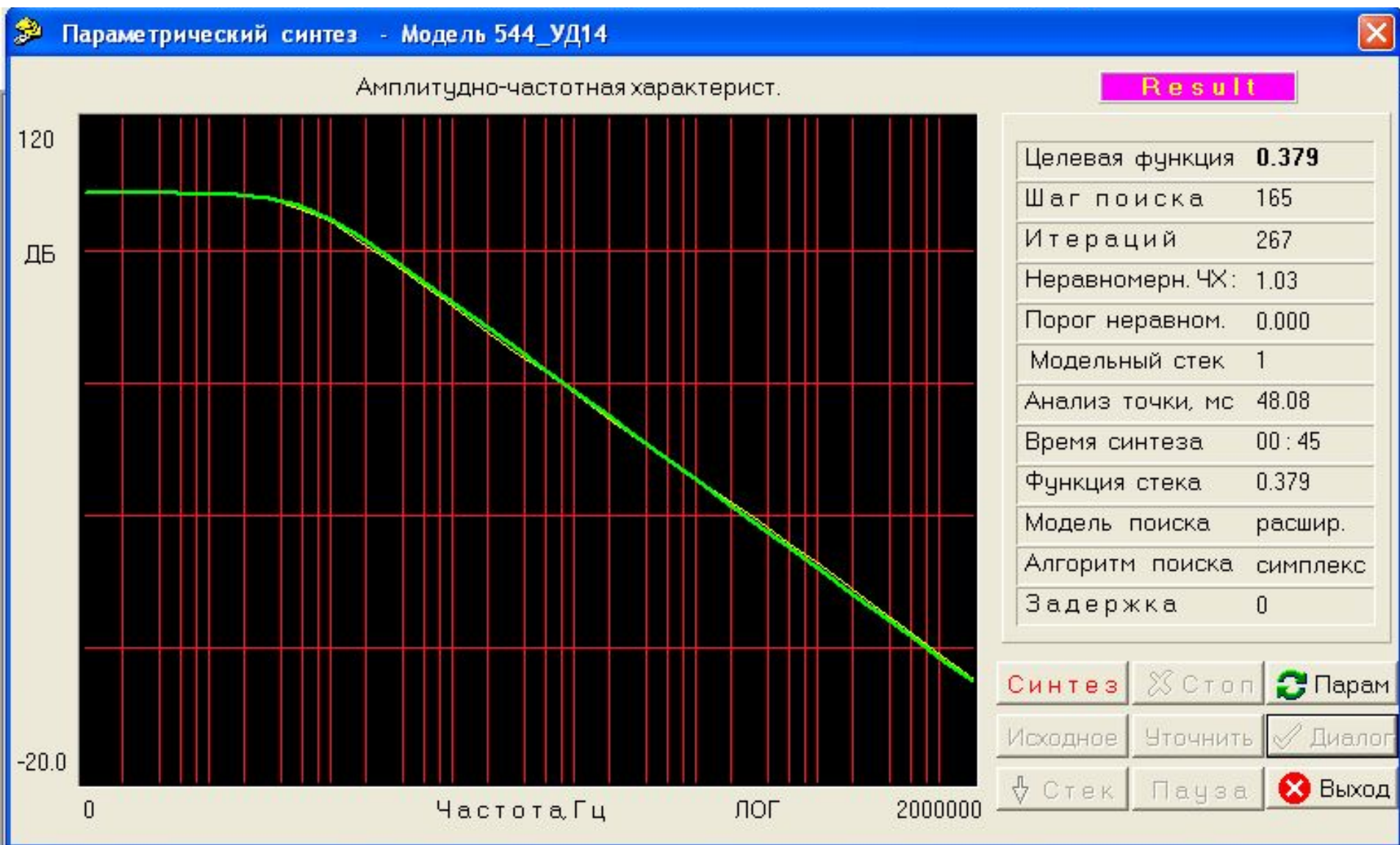
# Оптимизация параметров макромодели 544УД14



# Оптимизация параметров макромодели 544УД14



# Оптимизация параметров макромодели 544УД14



# Постановка задачи многофункционального дискретного синтеза активного фильтра

$$F(\mathbf{XD}) = \sum_w \beta_w f_w(\mathbf{XD}) \quad (1)$$

$$\mathring{F}(\mathring{\mathbf{XD}}) = \min F(\mathbf{XD}) \quad (2)$$

$$\mathbf{XD} \in S^n \in E192$$

$$10 \text{ Ом} < R_i < 1 \text{ МОм}$$

$$36 \text{ пФ} < C_i < 44.2 \text{ нФ}$$

$$K_j < K_j^{\max} \quad (3)$$

где:  $\mathbf{XD}^0$  - вектор оптимальных дискретных параметров фильтра,

$\mathbf{XD}$  - текущий вектор варьируемых дискретных параметров,

$S^n$  - область изменения дискретных варьируемых параметров.

$K^{\max}$  - предельно-допустимое усиление каскада

Дискретизация пространства параметров  $S^n$  осуществляется по стандартным рядам **E6** - **E192** (ГОСТ 2852-67). Номиналы определяются по формуле

$$R = a \cdot 10^n \quad E24: \{1.0 \ 1.1 \ 1.2 \ 1.3 \ 1.5 \ 1.6 \ 1.8 \ 2.0 \ 2.4 \ 2.7 \ 3.0 \ 3.6 \ 3.9 \ 4.3 \ 4.7 \ 5.1 \ 5.6 \ 6.8 \ 7.5 \ 8.2 \ 9.1 \}$$

# Формирование частных целевых функций

Частные целевых функций  $f_i(XD)$  отвечают за  $i$ -ую частотную характеристику фильтра и формируются в функциональном редакторе пакета в среднеквадратичном либо минимаксном виде

$$F(XD) = \beta_1 f_1(XD) + \beta_2 f_2(XD) + \dots + \beta_n f_n(XD)$$

$$f_i(XD) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=1}^p \left[ Y_k(XD) - Y_k^T \right]^2 \quad (4)$$

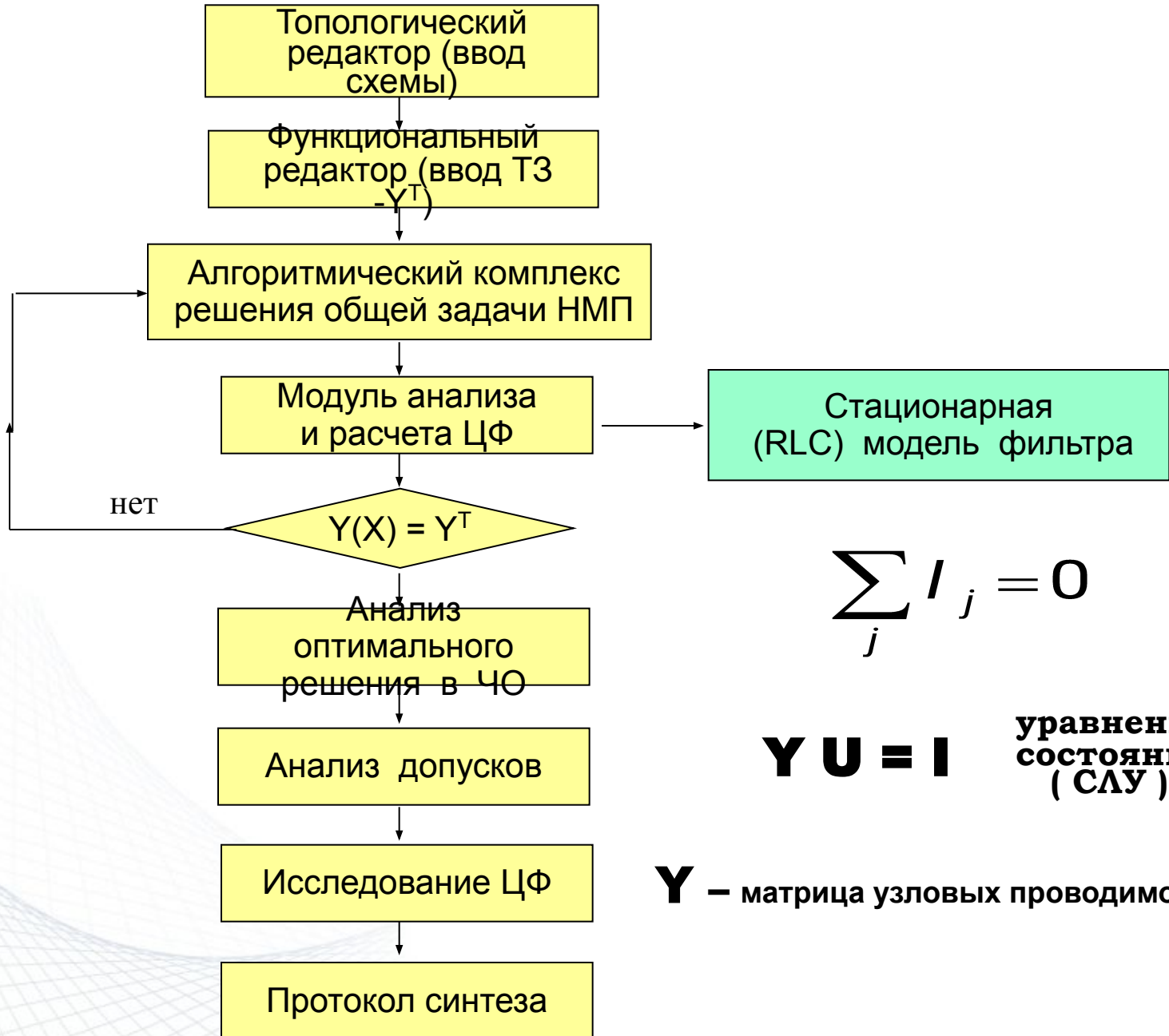
$$k_j(XD) = \left[ \frac{Y_j(XD) - Y_j^T}{Y_j^T} \right]^2 \quad \Delta Y_j = \sqrt{k_j} \cdot Y_j^T \quad \text{- погрешность синтеза}$$

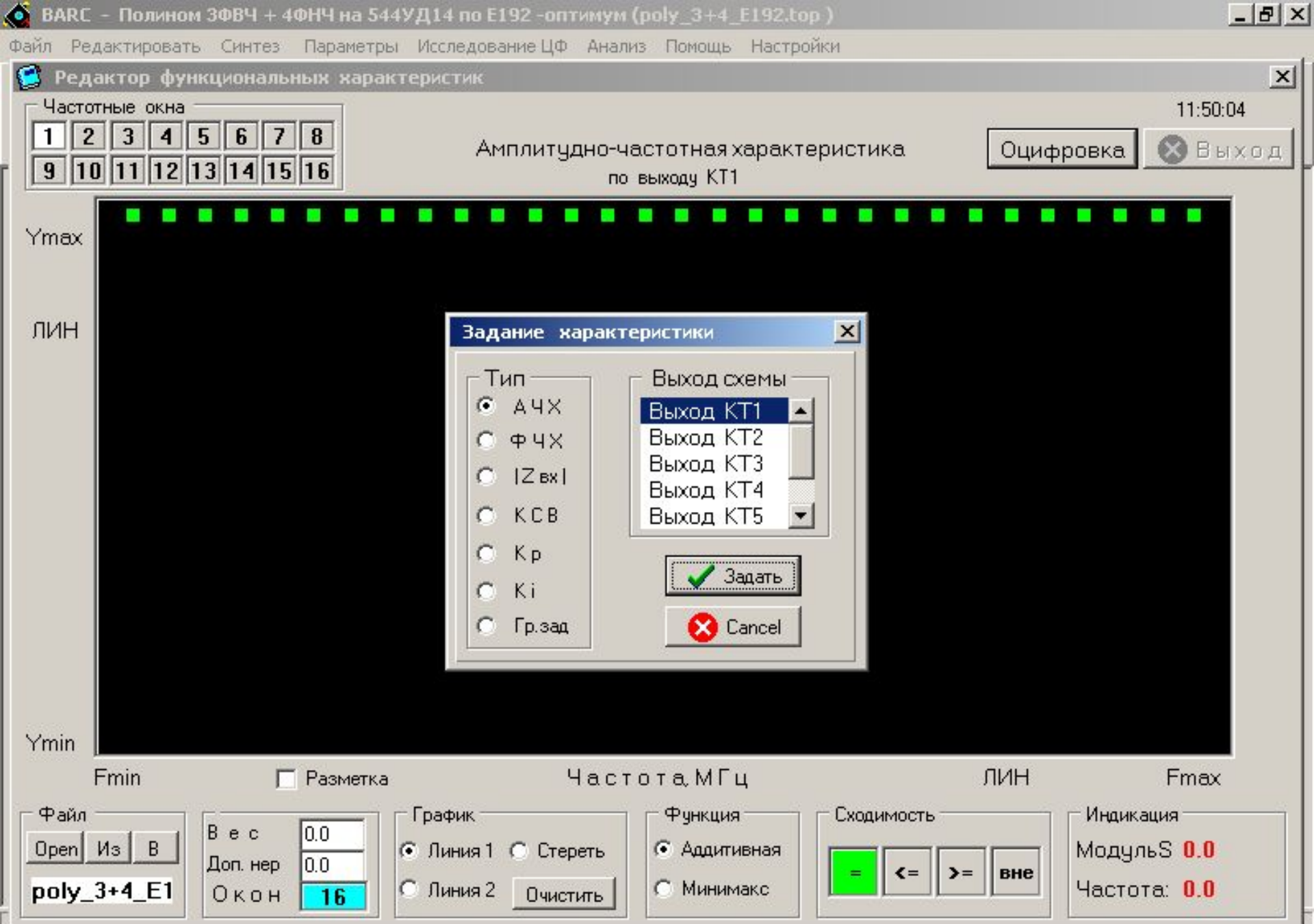
$$f_i(XD) = \frac{1}{p} \cdot \sum_{k=1}^p \left[ \frac{Y_k(XD) - Y_k^T}{Y_k^T} \right]^2 \quad (5)$$

Минимаксный критерий

$$f_i(XD) = \max_k \left\{ | Y_k(XD) - Y_k^T |^2 \right\} \quad (6)$$

# Общая структура программы синтеза





Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

11:50:54

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

27.00

ДБ

30.00

Разметка

Частота, Гц

ЛИН

850.00

-70.00

Файл

Орен Из В

W1\_crez\_29!

Вес 1

Доп. нер 0

Окон 16

График

Линия 1  Стереть

Линия 2

Функция

Аддитивная

Минимакс

Сходимость

Индикация

Ku(АЧХ): 6.32

Частота: 296

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе



### Редактор функциональных характеристик

11:51:44

Оцифровка ✖ Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

27.00  
ДБ  
-70.00

940.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 5200.00

Файл:     
**W2\_crez\_30I**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>ц</sub>(АЧХ): **6.02**  
Частота: **2999**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

11:52:34

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

8.00  
ДБ  
4.00

288.00 Частота, Гц ЛИН 400.00

Разметка

Файл:     
**W3\_Pol\_295**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **6.33**  
Частота: **297**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

11:53:24

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

8.00

ДБ

4.00

95.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3200.00

Файл:     
**W4\_All\_pol**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>ц</sub>(АЧХ): **6.04**  
Частота: **1641**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

Оцифровка ✖ Выход

11:54:24

8.00  
ДБ  
4.00

1600.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3100.00

Файл:     
**W5\_pol\_300!**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **6.24**  
Частота: **3005**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

Редактор функциональных характеристик

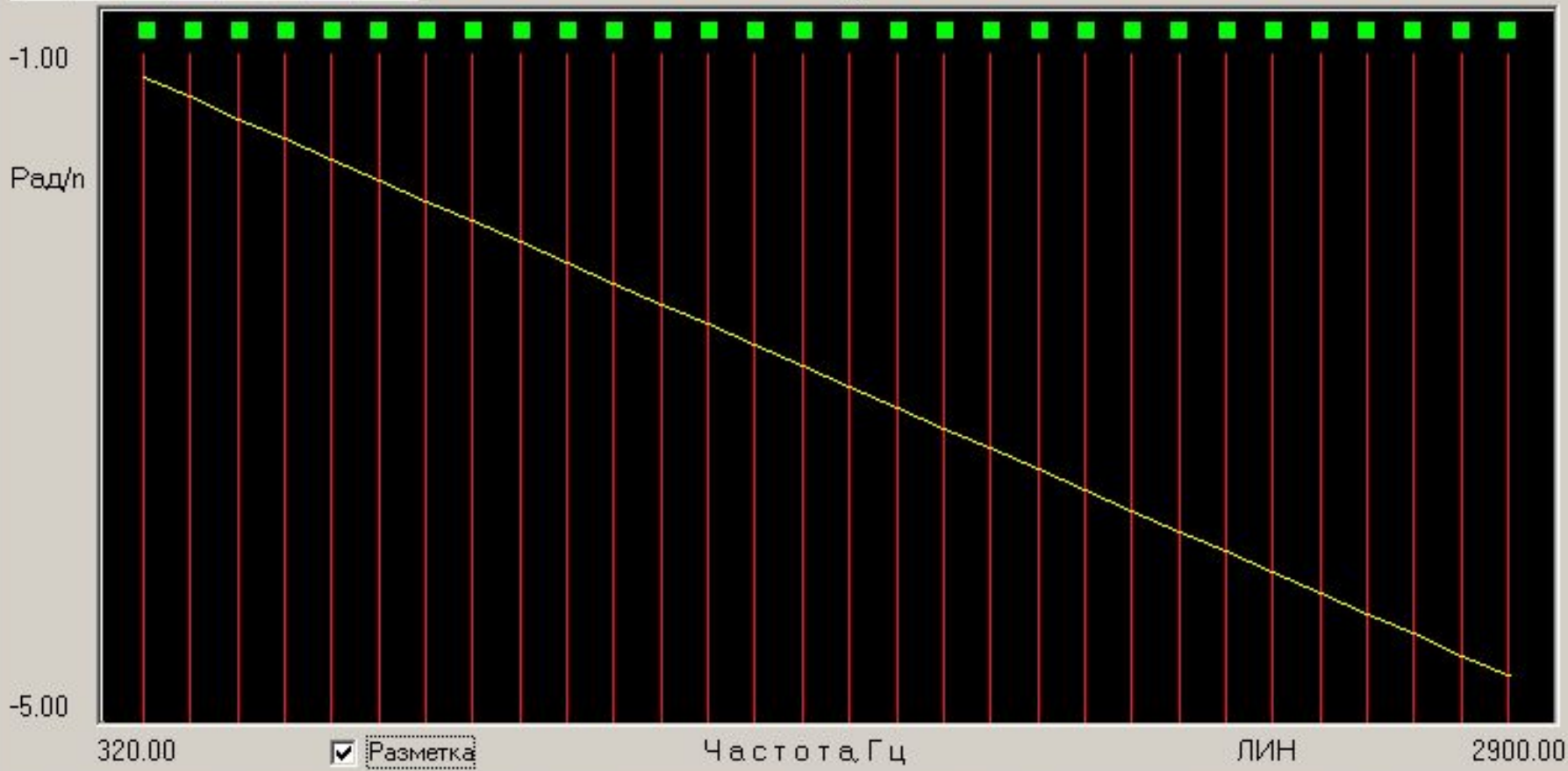
11:55:34

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

Фаза коэффициента передачи  
по выходу КТ7

Оцифровка ✖ Выход



Файл

Открыть Изменить Вывести

W6\_Faza

Вес: 0.1

Доп. пер: 0

Окно: 16

График

Линия 1  Стереть

Линия 2

Функция

Аддитивная

Минимум

Сходимость

Индикация

Фаза К<sub>u</sub>: -4.009

Частота: 1545

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

11:57:14

Оцифровка ✖ Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ7

27.00

ДБ

-70.00

50.00 Частота, Гц ЛОГ 20000.00

Разметка

Файл:     
W7\_gain\_loc

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация: К<sub>н</sub>(АЧХ): -59.66  
Частота: 16535.79

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

11:58:14

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

Групповая задержка сигнала по выходу КТ7

100.0  
мсек  
5.0

380.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 2900.00

Файл:     
**W8\_Tgrz**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
Задерж: **38.06**  
Частота: **1642**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:00:24

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ1

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00  
ДБ  
-20.00

270.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3300.00

Файл:     
**W9\_gain\_KT**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **7.98**  
Частота: **834**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе



### Редактор функциональных характеристик

12:00:54

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ2

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00  
ДБ  
-20.00

270.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3300.00

Файл:     
**W10\_gain\_K**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **-4.53**  
Частота: **1757**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:01:24

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТЗ

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00  
ДБ  
-20.00

270.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3300.00

Файл:     
**W11\_gain\_K**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимум

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>н</sub>(АЧХ): **12.04**  
Частота: **3202.26**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:01:44

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ4

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00  
ДБ  
-20.00

270.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3300.00

Файл:     
**W12\_gain\_K**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **2.60**  
Частота: **2176**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:02:54

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ5

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00  
ДБ  
-20.00

270.00  Разметка Частота, Гц ЛИН 3300.00

Файл:     
**W13\_gain\_K**

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **1.72**  
Частота: **1586**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:03:14

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ6

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00

ДБ

270.00

Частота, Гц

ЛИН

3300.00

Разметка

Файл

Открыть Изменить Вывести

W14\_gain\_K

Вес: 1

Доп. пер: 0

Окно: 16

График

Линия 1  Стереть

Линия 2

Функция

Аддитивная

Минимум

Сходимость

Индикация

Ku(АЧХ): 12.04

Частота: 3202.26

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:03:55

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ6

Оцифровка ✖ Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00

ДБ

270.00 Частота, Гц ЛИН 3300.00

Разметка

Файл:     
W15\_gain\_K

Вес:   
Доп. нер:   
Окон:

График:  
 Линия 1  Стереть  
 Линия 2

Функция:  
 Аддитивная  
 Минимакс

Сходимость:

Индикация:  
К<sub>и</sub>(АЧХ): **-10.67**  
Частота: **1665**

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе

### Редактор функциональных характеристик

12:04:24

Амплитудно-частотная характеристика по выходу КТ5

Оцифровка **✖** Выход

Частотные окна

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16

15.00

ДБ

270.00

Разметка

Частота, Гц

ЛИН

3300.00

20.00

Файл

Орен Из В

W16\_gain\_K

Вес 1

Доп. пер 0

Окон 16

График

Линия 1  Стереть

Линия 2

Функция

Аддитивная

Минимакс

Сходимость

Индикация

Ku(АЧХ): -10.78

Частота: 1621

Задание характеристик фильтра в функциональном редакторе



расширенная непрерывный нормальный

Варьируемые параметры ARC-схемы

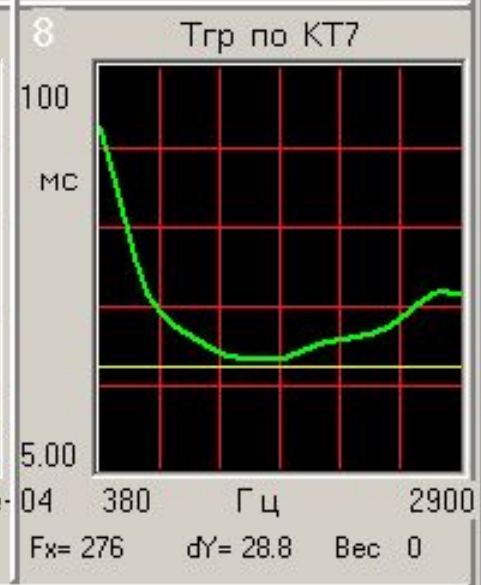
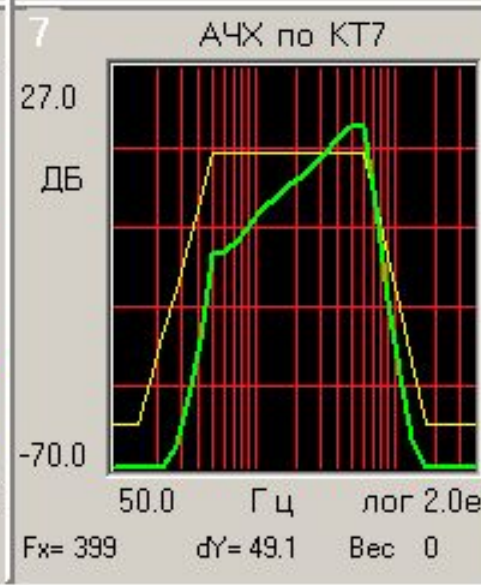
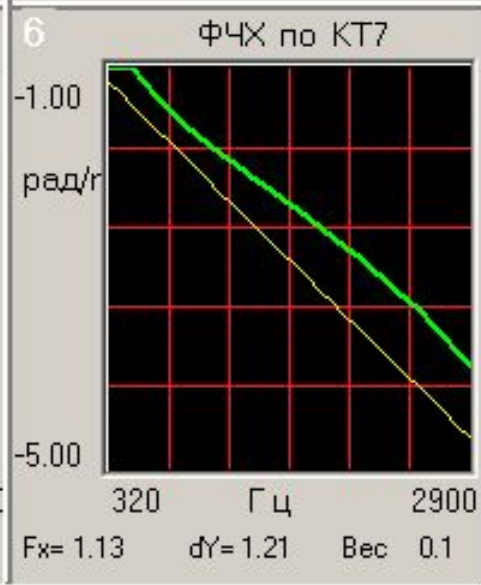
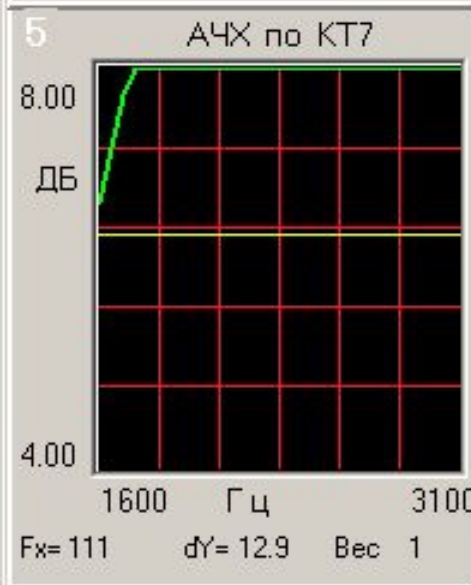
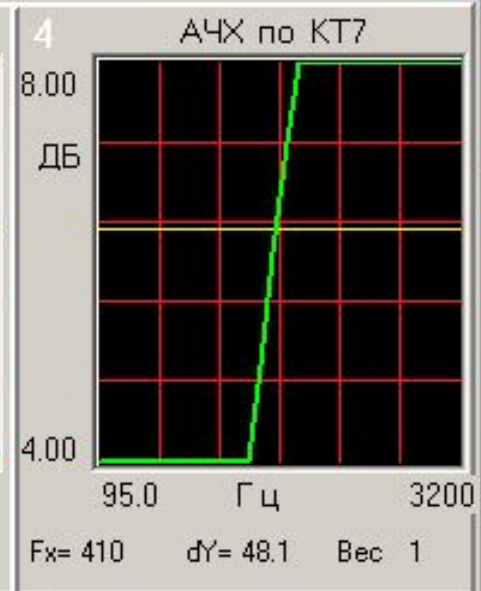
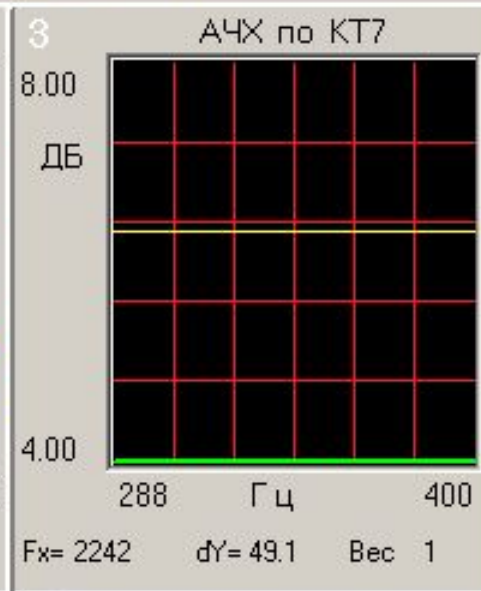
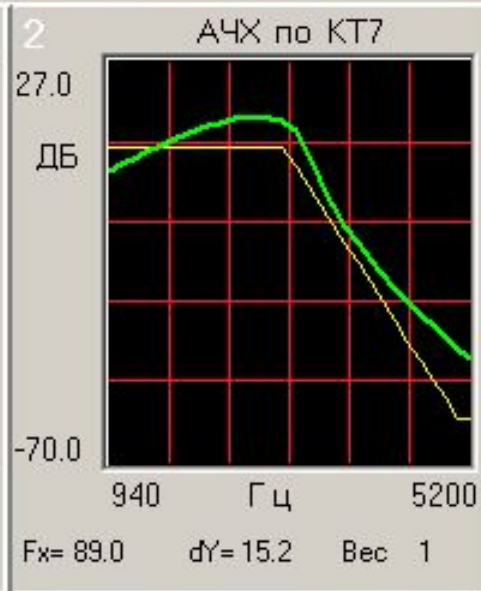
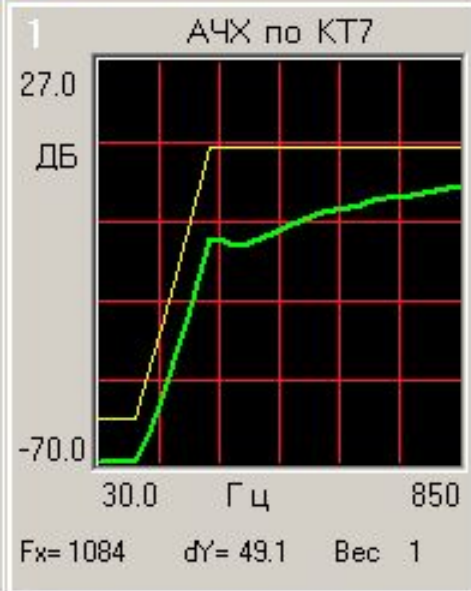
№ п/п	Ветвь	Тип	Ряд	Дубли	Нижняя гран	Значение	Верхняя гран
1	2	C	E192	нет	1.000e-08	8.3500e-08	1.000e-07
2	3	C	E192	нет	1.000e-08	7.5000e-07	2.000e-06
3	5	C	E192	нет	4.020e-09	7.2300e-08	1.000e-07
4	14	C	E192	нет	1.000e-09	2.7700e-09	2.000e-08
5	15	C	E192	нет	2.000e-08	1.4000e-07	6.980e-07
6	25	R	E192	нет	4.990e+04	2.4300e+05	8.980e+05
7	26	C	E192	нет	1.000e-09	3.7400e-08	7.960e-08
8	27	C	E192	нет	4.020e-09	2.8700e-08	1.000e-07
9	4	R	E192	нет	1.000e+02	1.9300e+02	1.000e+04
10	6	R	E192	нет	1.000e+03	6.5700e+03	2.000e+04
11	16	R	E192	нет	4.990e+04	4.0700e+05	1.000e+06
12	17	R	E192	нет	1.000e+02	1.1100e+03	1.000e+04
13	28	R	E192	нет	1.000e+04	3.0500e+05	1.000e+06
14	29	R	E192	нет	1.000e+02	8.8700e+02	4.990e+03
15	37	R	E192	нет	6.980e+02	2.0500e+03	1.000e+05

лист 1

PageUp Перейти PageDw

Начальные значения дискретных параметров фильтра

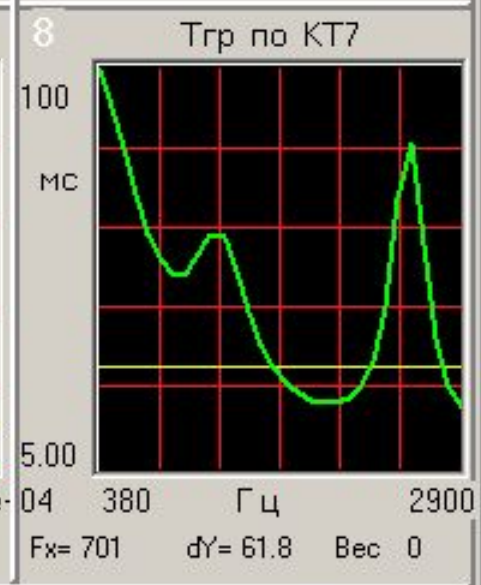
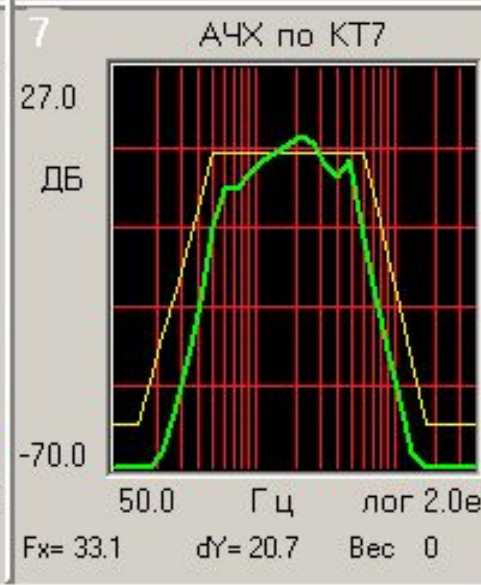
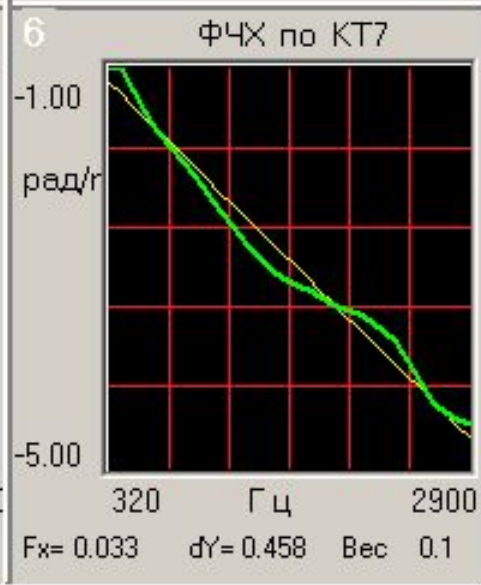
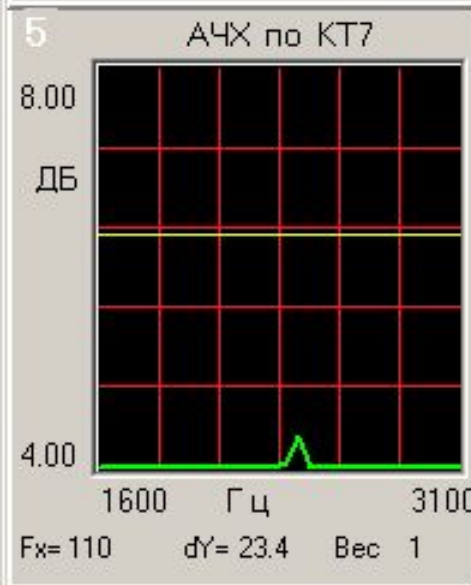
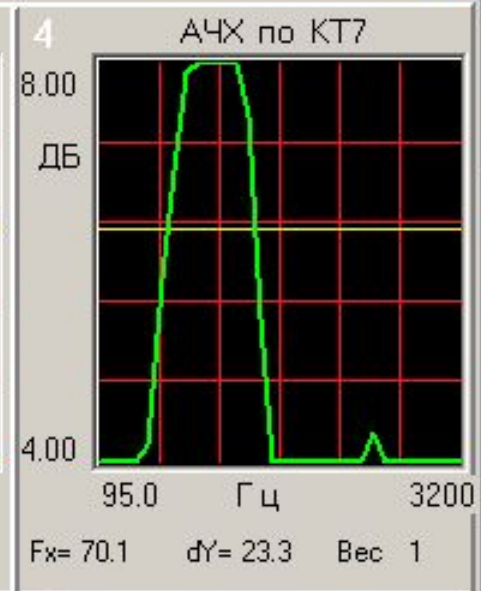
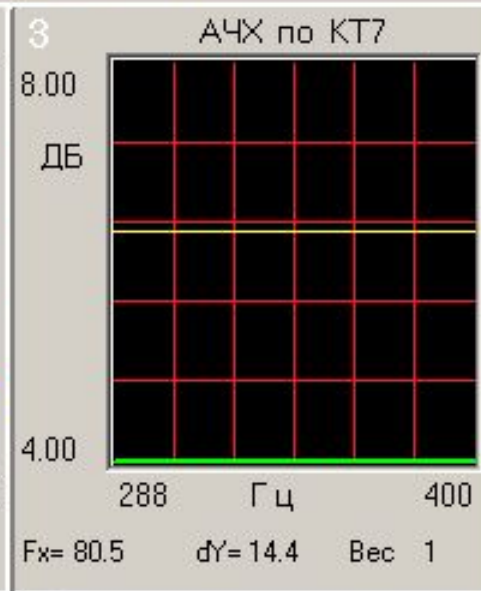
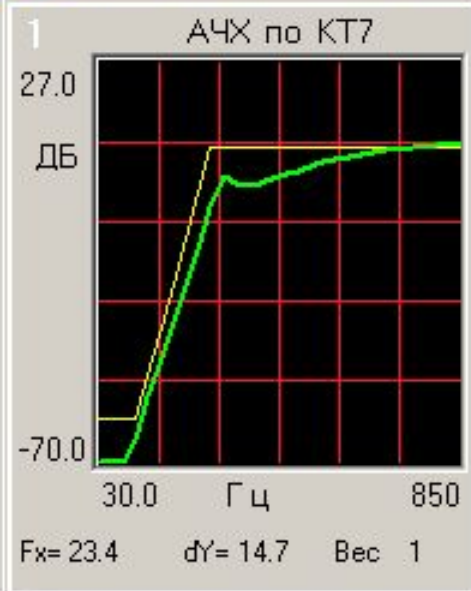




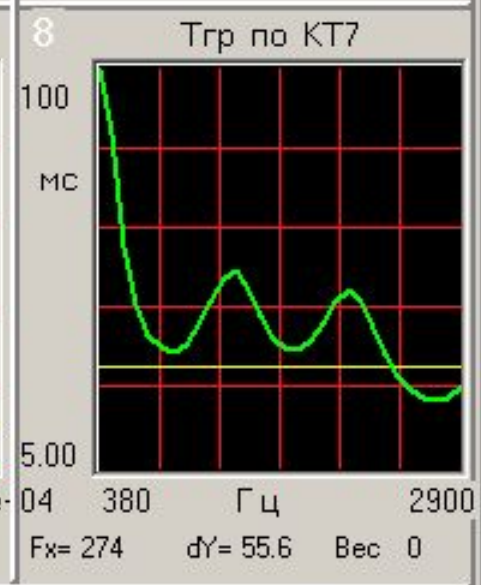
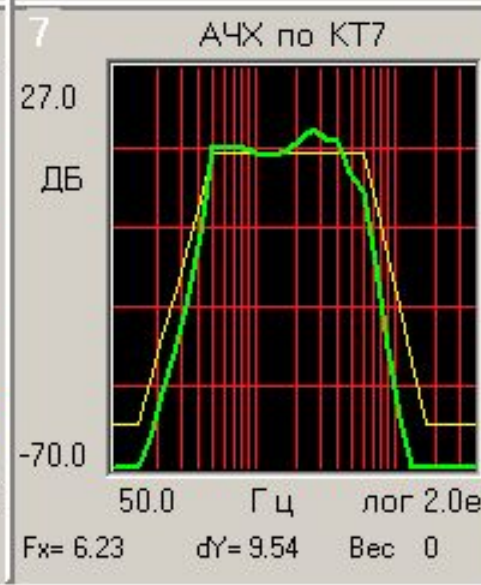
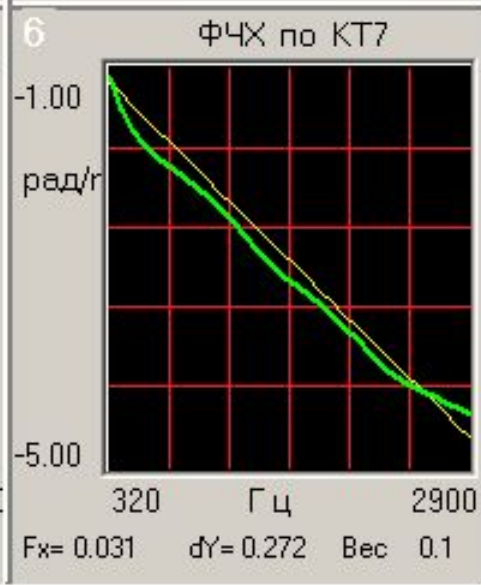
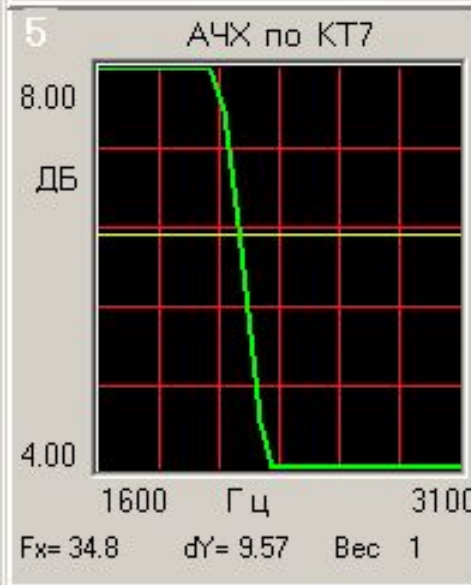
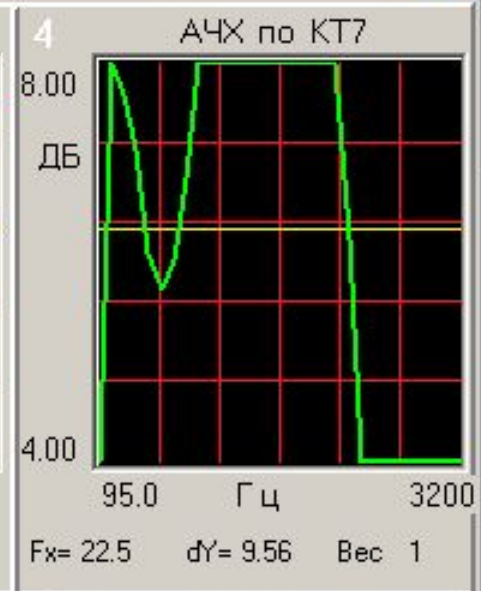
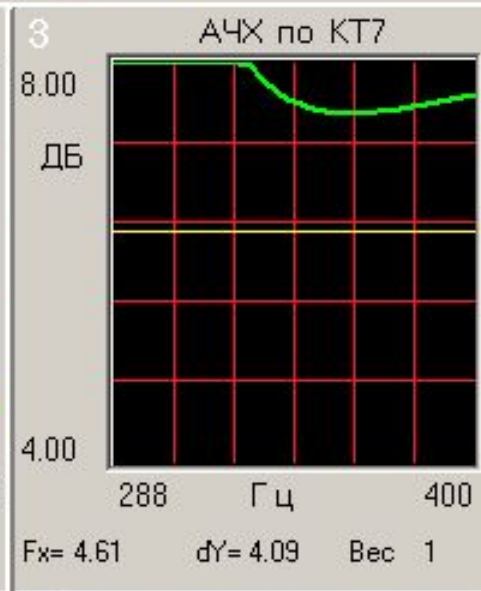
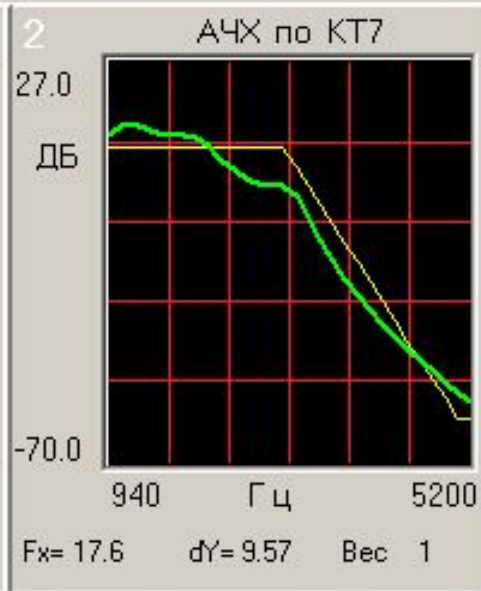
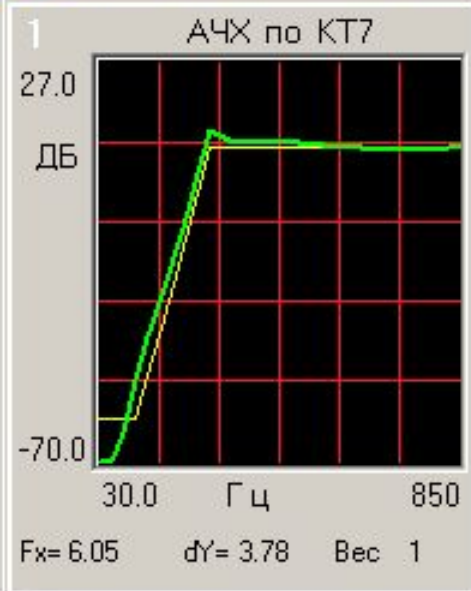
Функция: **4e+03** Шаг: 1 Итераций: 0 Время синтеза: 0 Стек: 2 4e+03

Синтез **✘** Стоп **↓** Стек Уточнить **↻** Парам **✓** Диалог **✕** Выход **1 - 8**

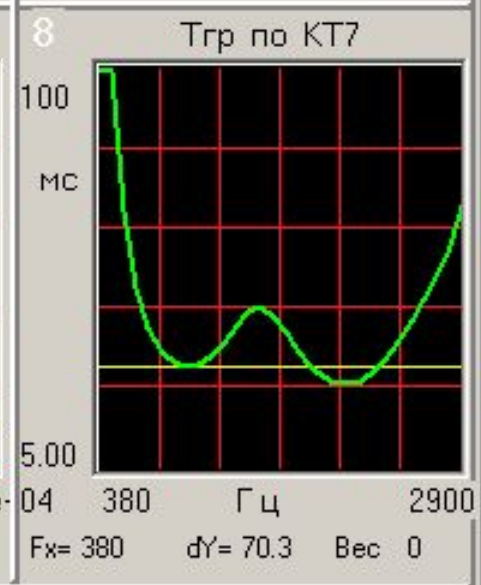
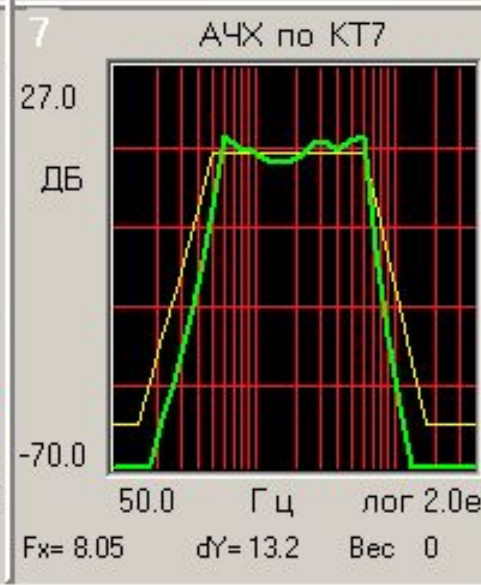
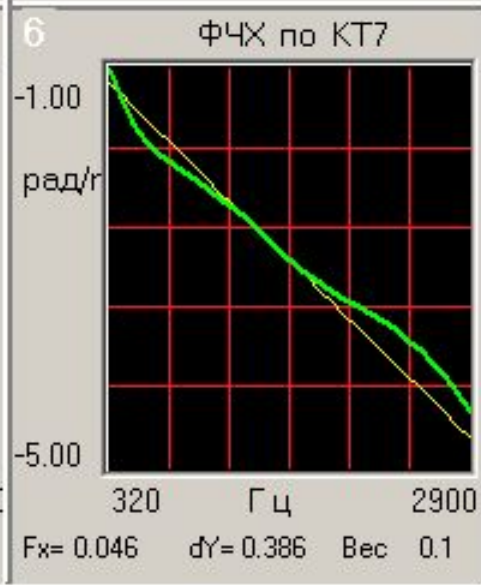
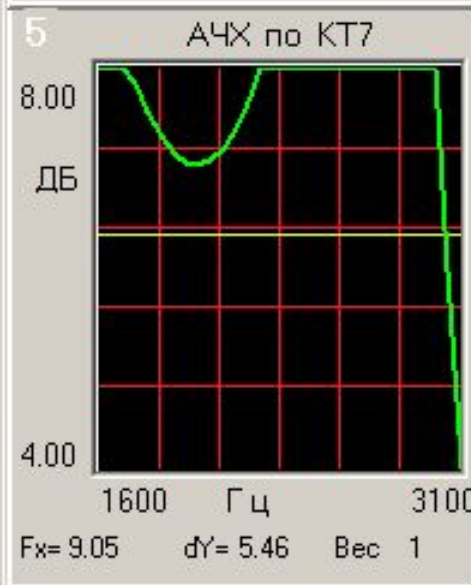
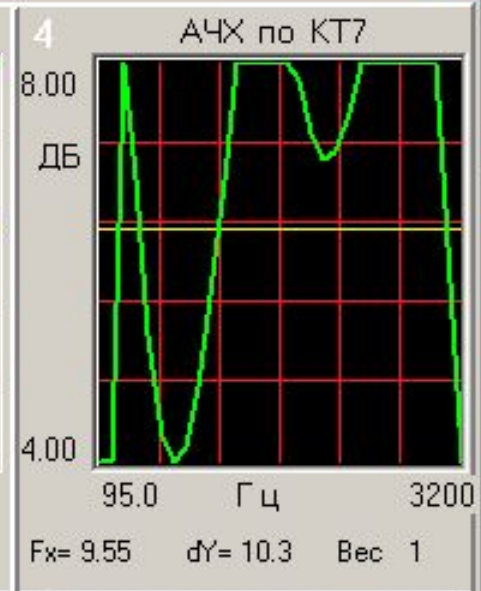
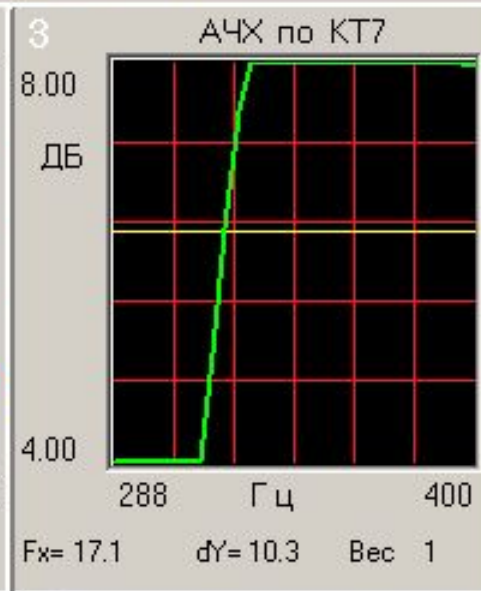
Процесс синтеза декадного активного фильтра



Процесс синтеза декадного активного фильтра



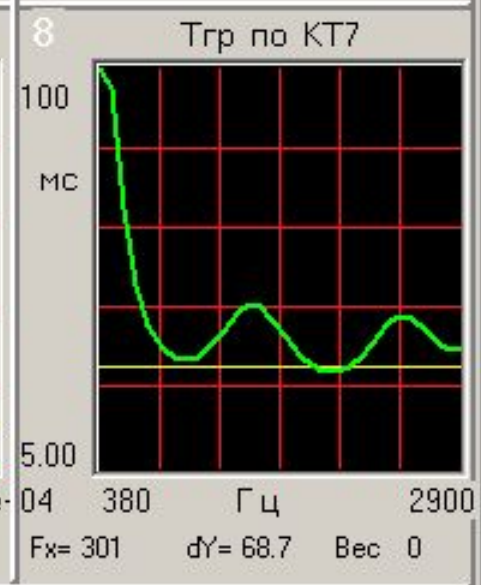
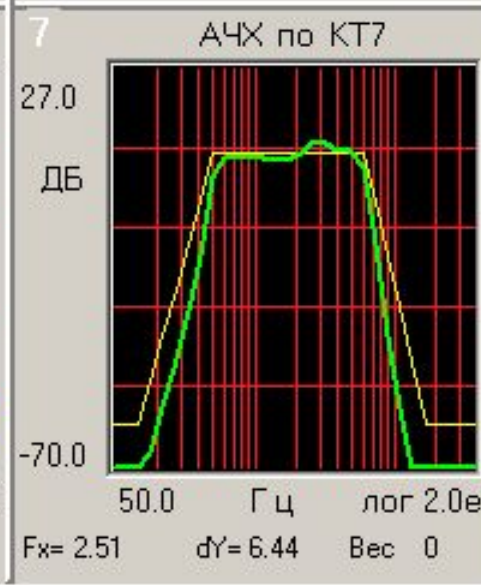
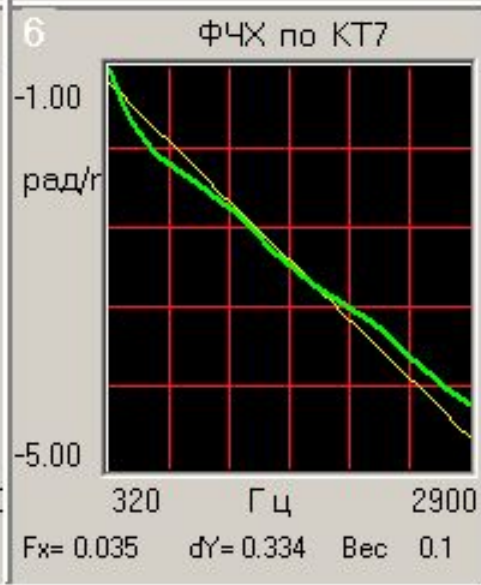
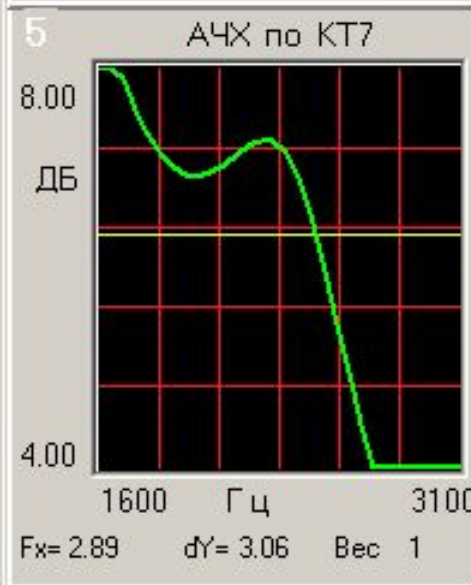
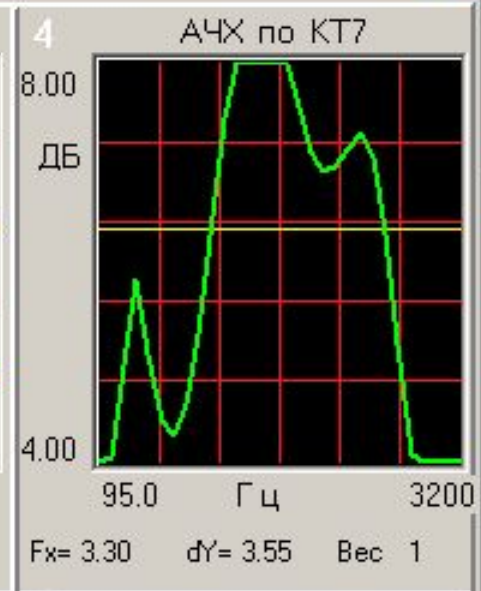
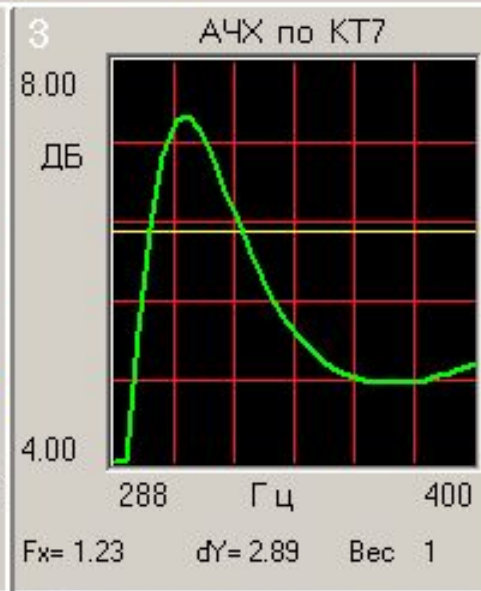
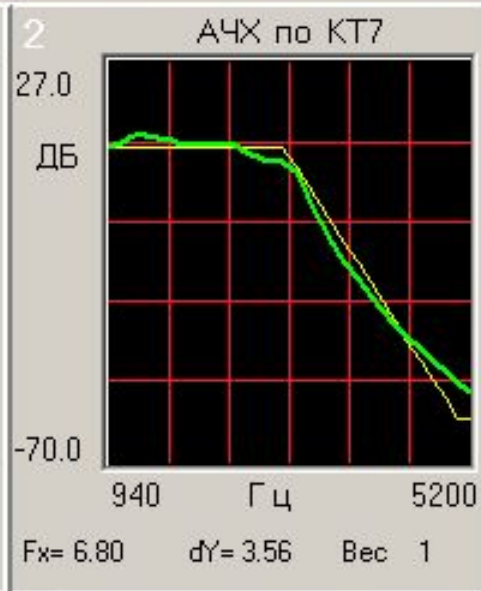
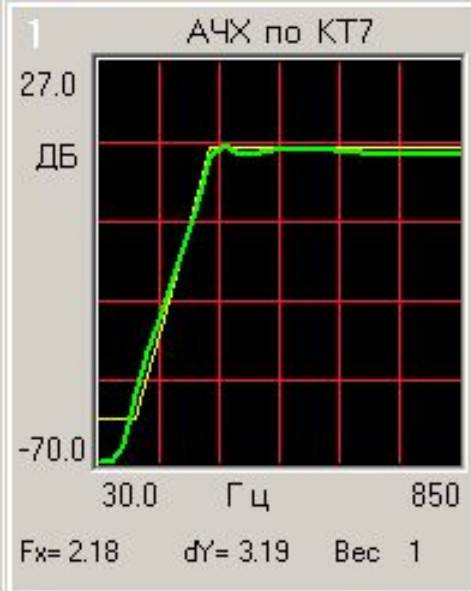
Процесс синтеза декадного активного фильтра



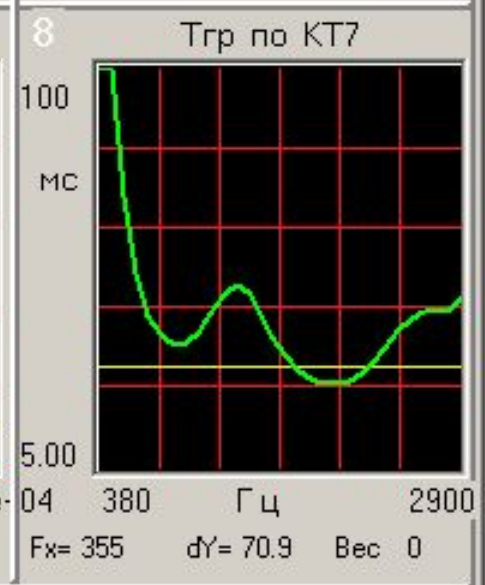
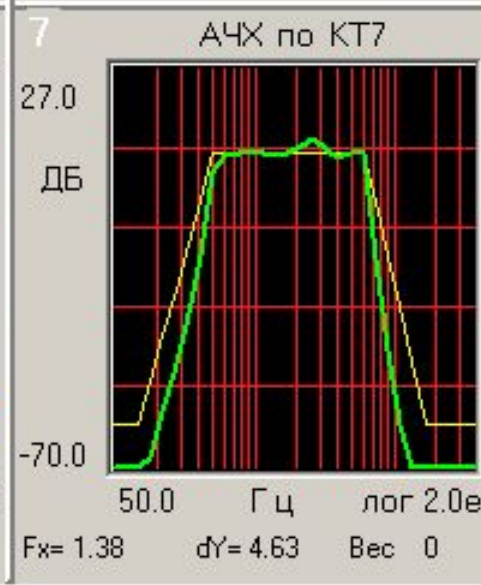
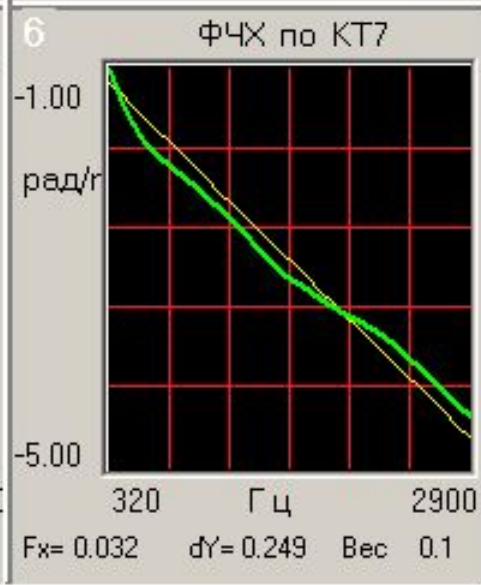
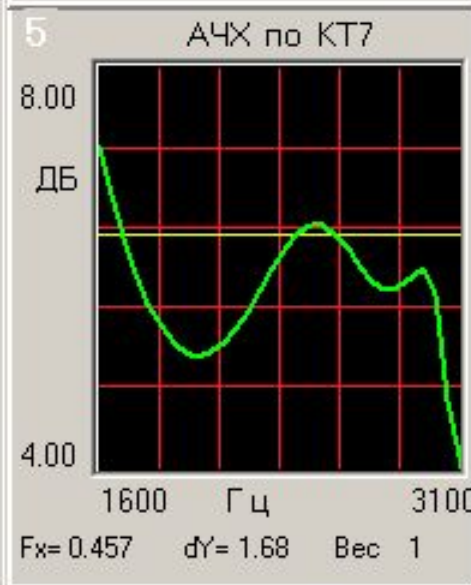
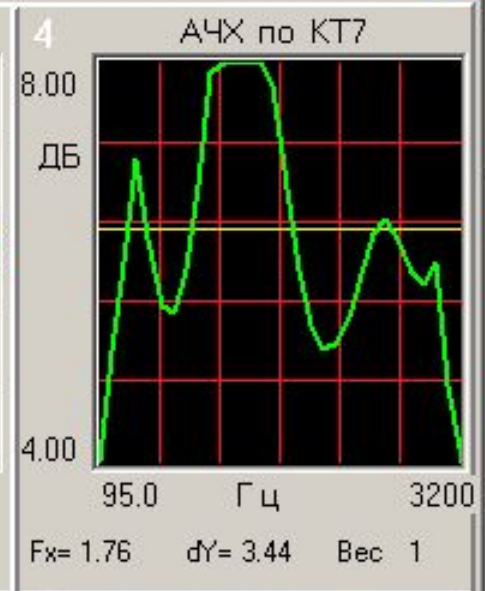
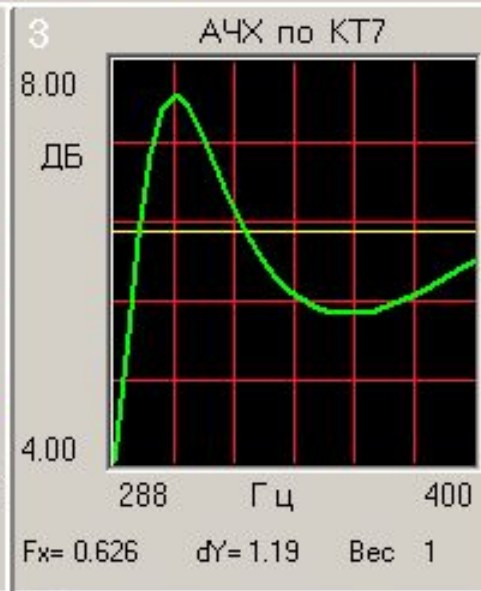
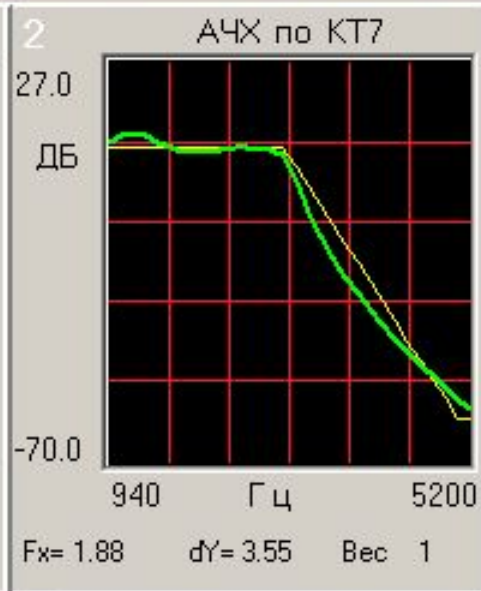
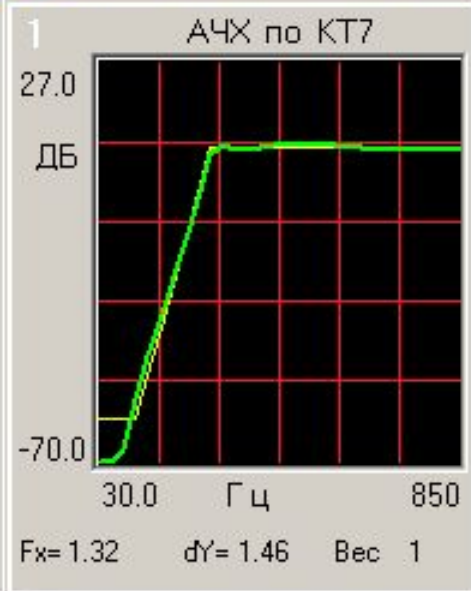
Функция: 49.2 Шаг: 135 Итераций: 197 Время синтеза: 02:05 Стек: 2 49.2

Синтез  Стоп  Стек  Уточнить  Парам  Диалог  Выход 1-8

Процесс синтеза декадного активного фильтра



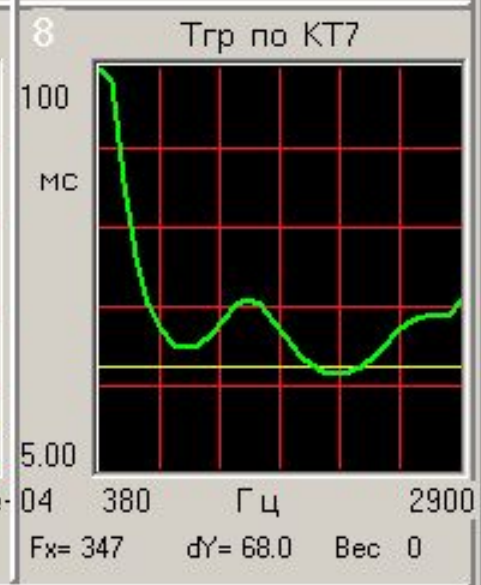
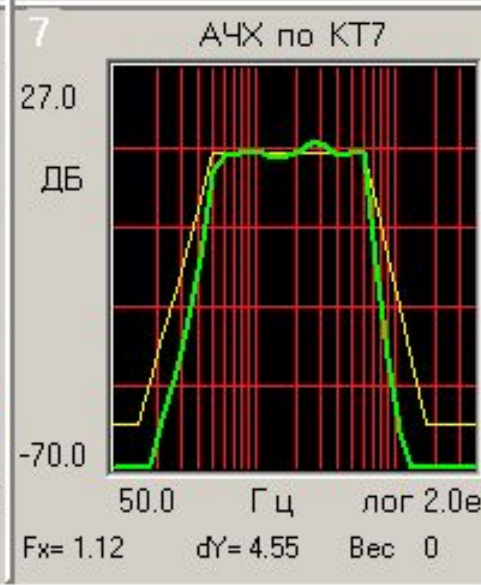
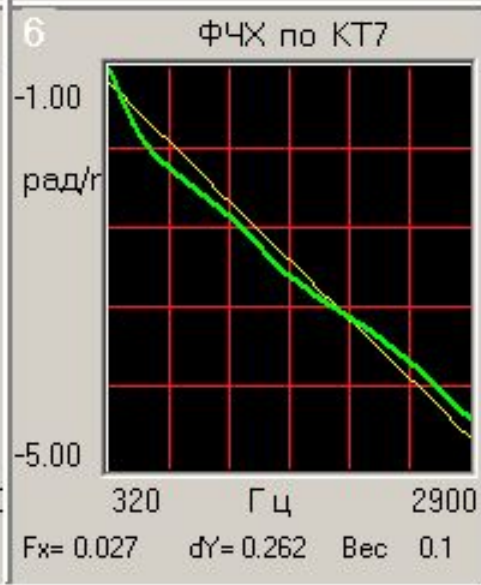
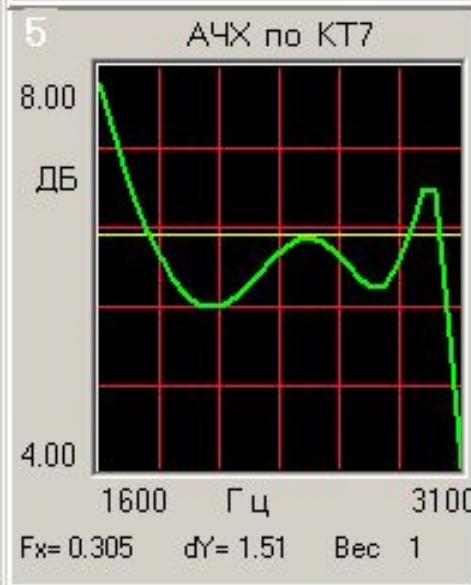
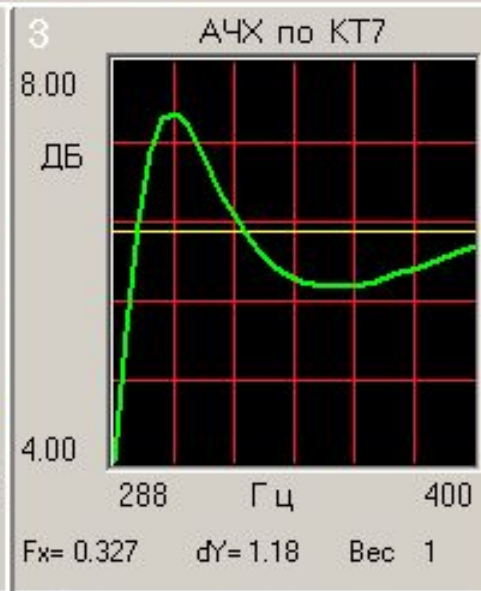
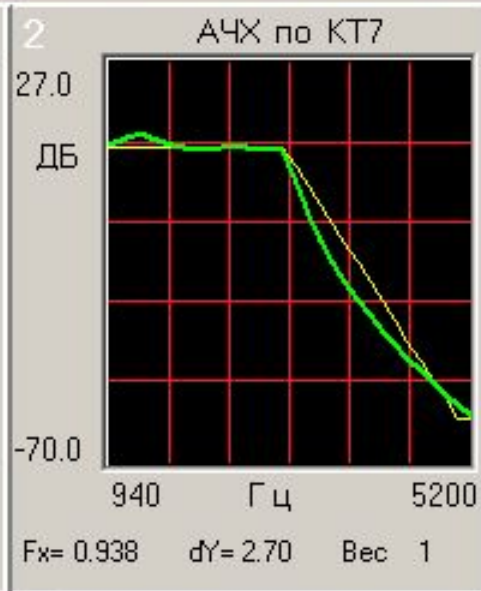
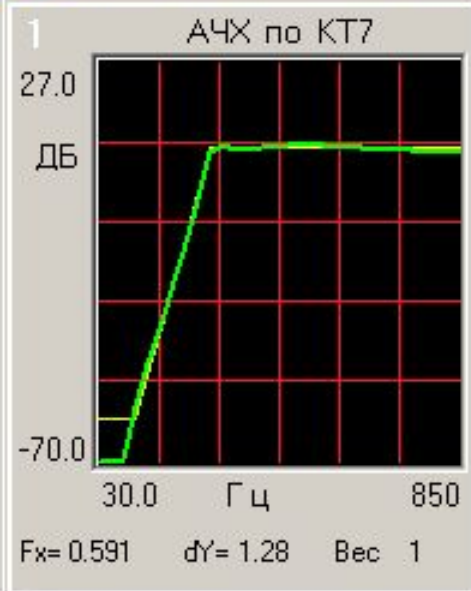
Процесс синтеза декадного активного фильтра



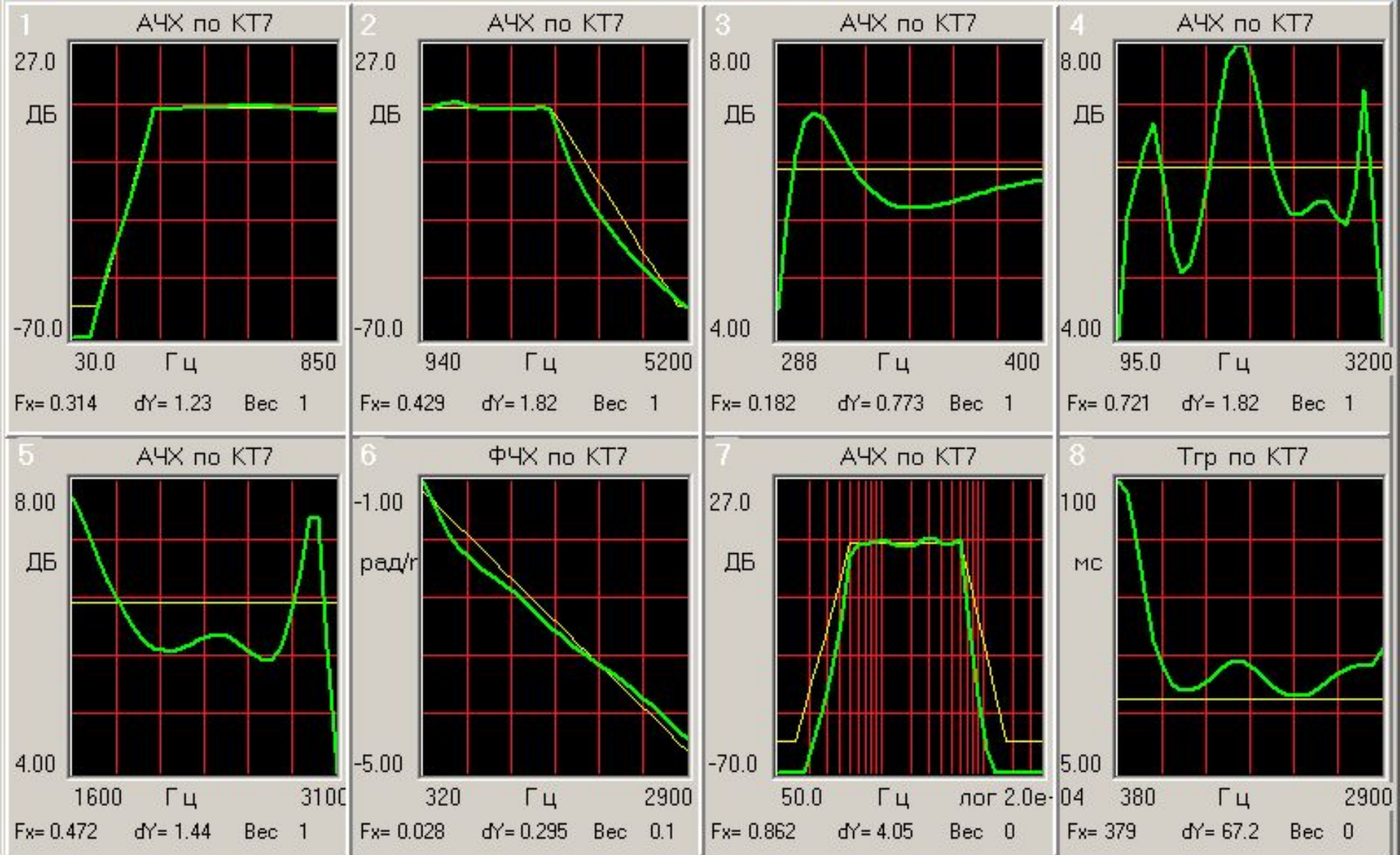
Функция: 6.05 Шаг: 425 Итераций: 759 Время синтеза: 06:00 Стек: 1 6.05

Синтез  Стоп  Стек  Уточнить  Парам  Диалог  Выход 1 - 8

Процесс синтеза декадного активного фильтра



Процесс синтеза декадного активного фильтра

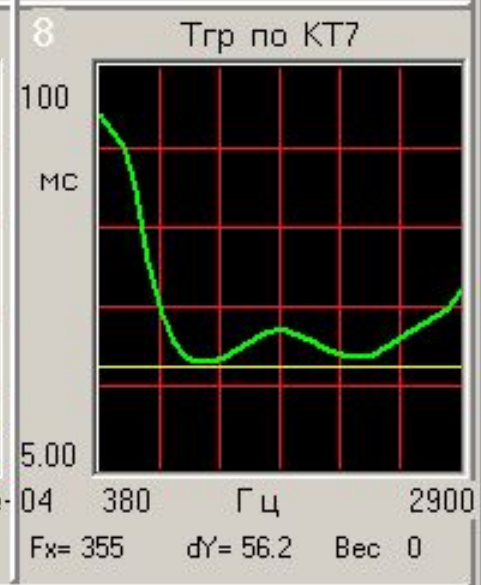
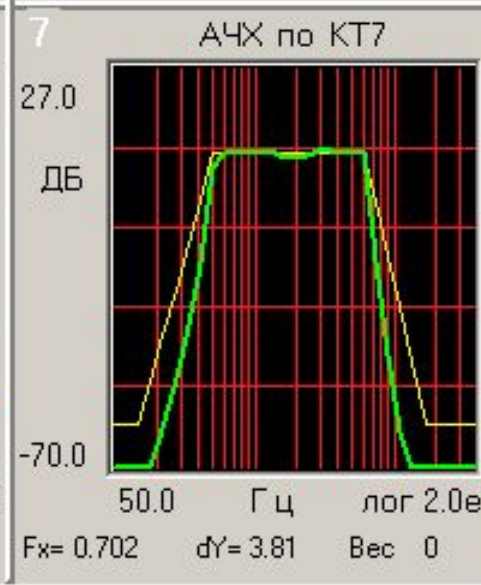
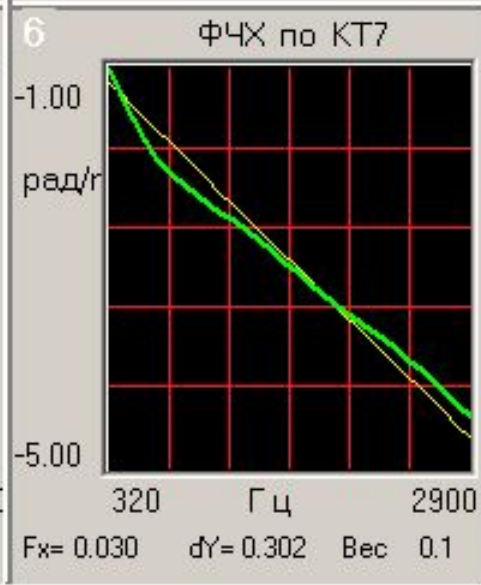
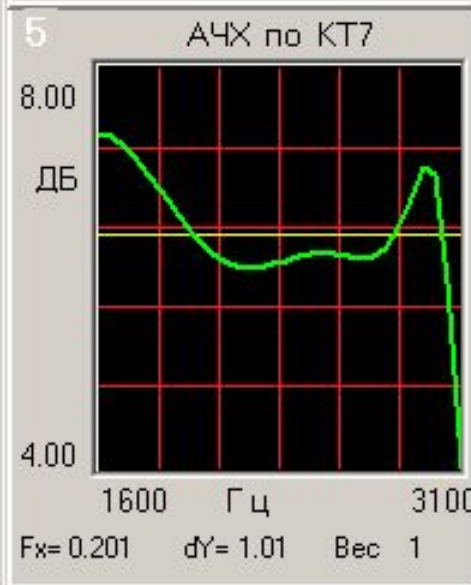
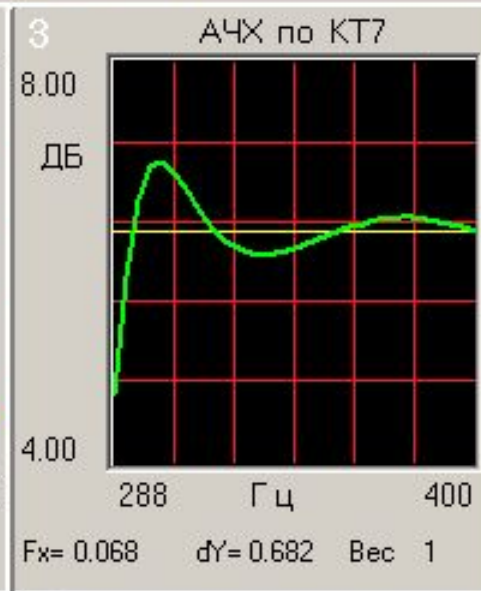
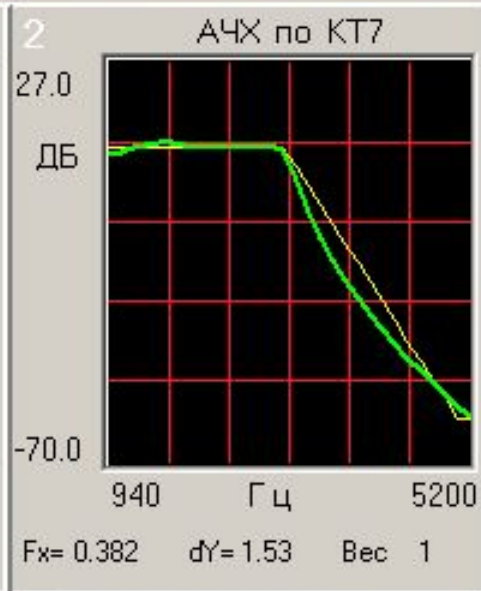
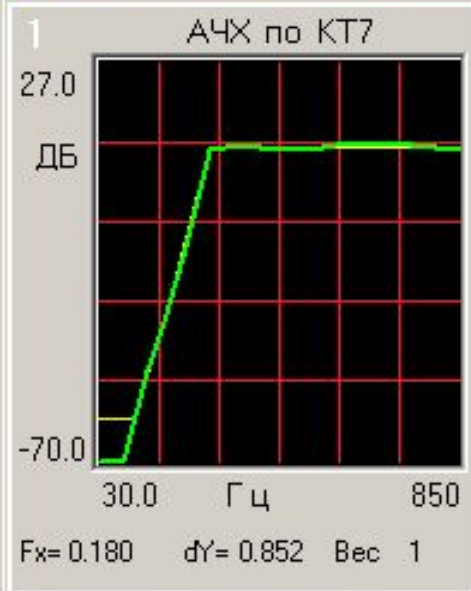


Функция: 2.12 Шаг: 1002 Итераций: 1472 Время синтеза: 10:55 Стек: 1 2.12

Синтез  Стоп  ↓ Стек Уточнить  Парам  Диалог  Выход 1-8

Процесс синтеза декадного активного фильтра

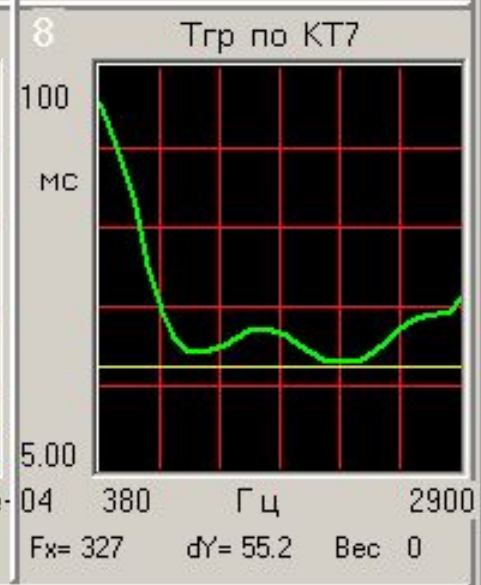
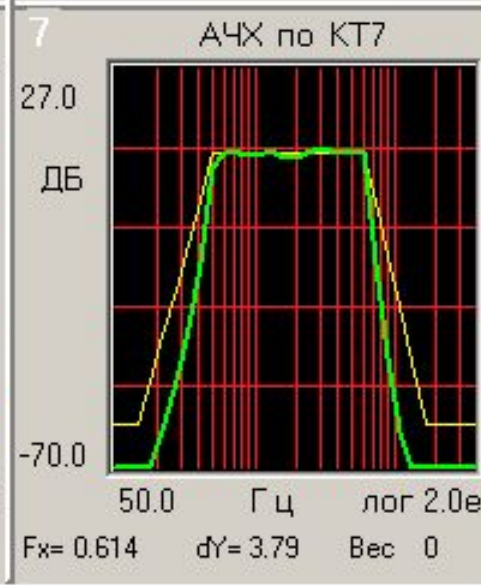
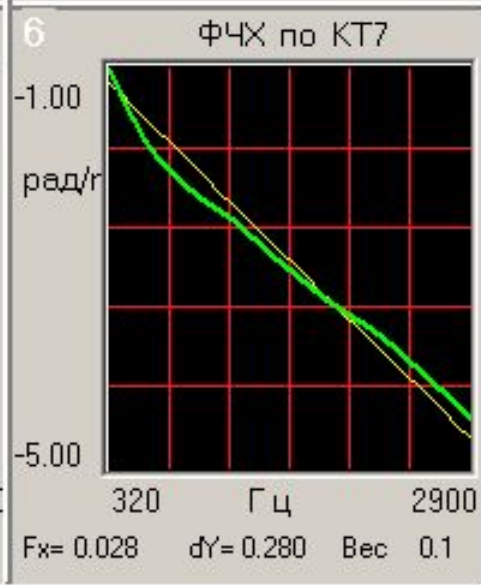
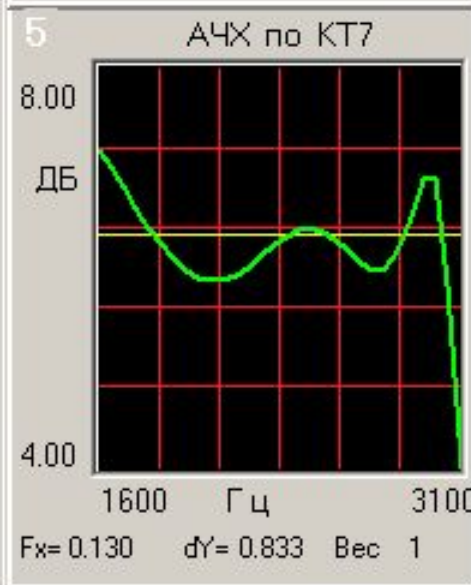
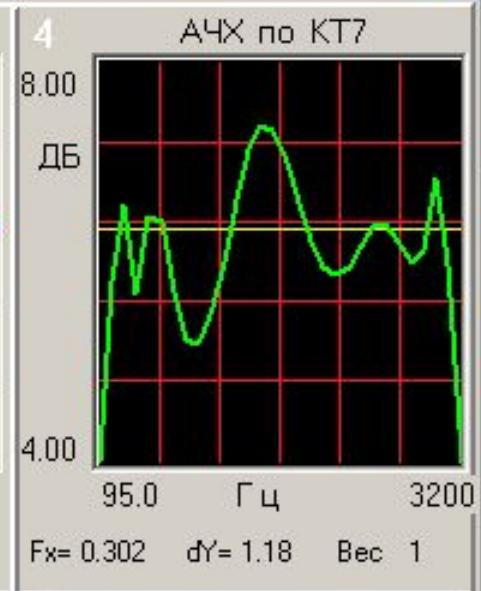
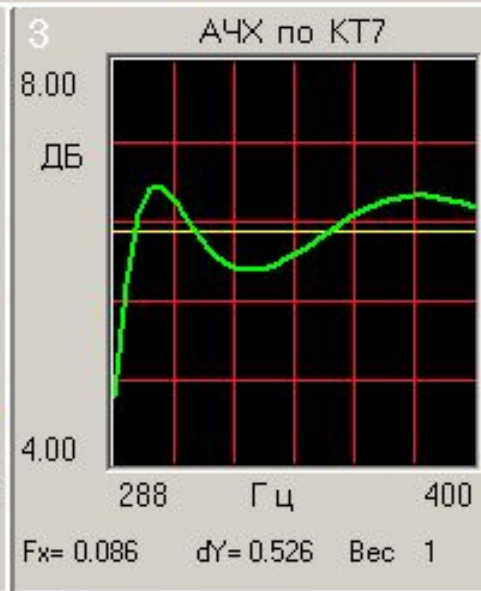
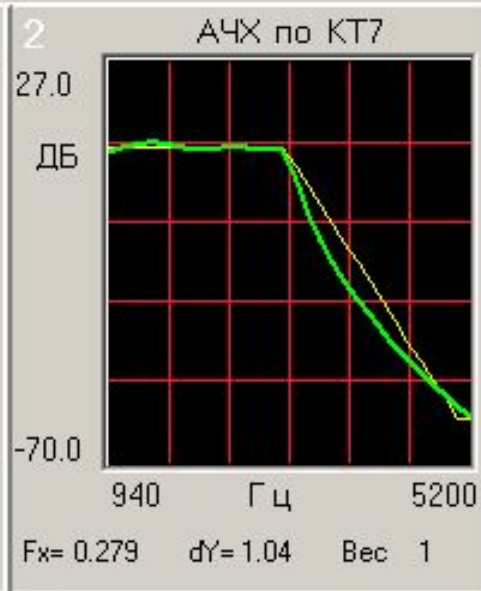
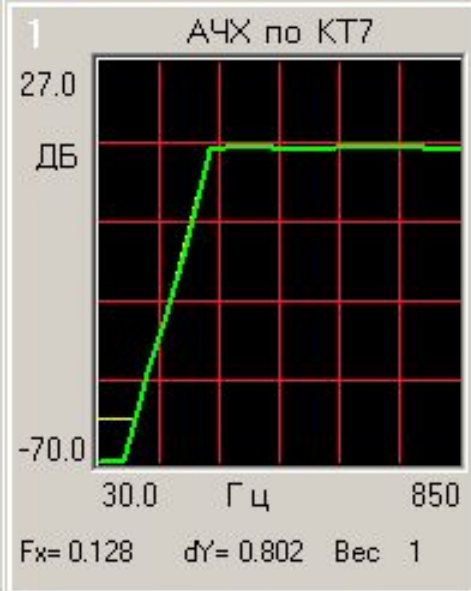




Функция: 1.29 Шаг: 1292 Итераций: 1828 Время синтеза: 13:20 Стек: 1 1.29

Синтез  Стоп  Стек  Уточнить  Парам  Диалог  Выход 1-8

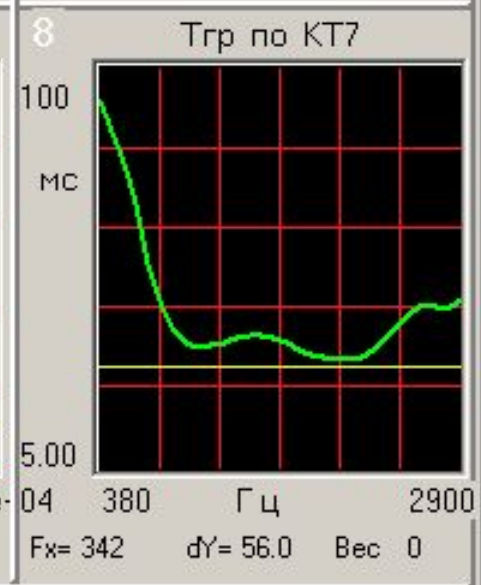
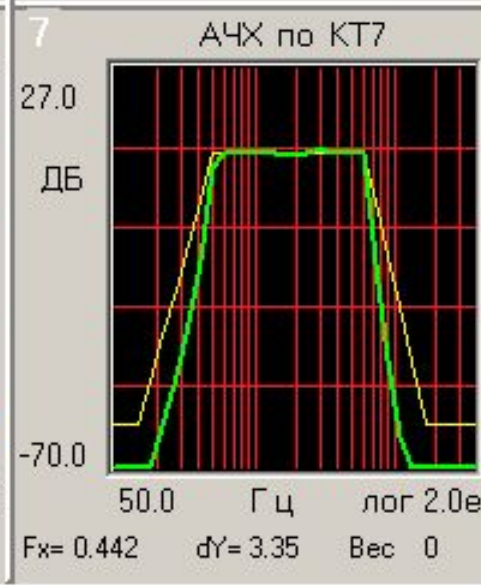
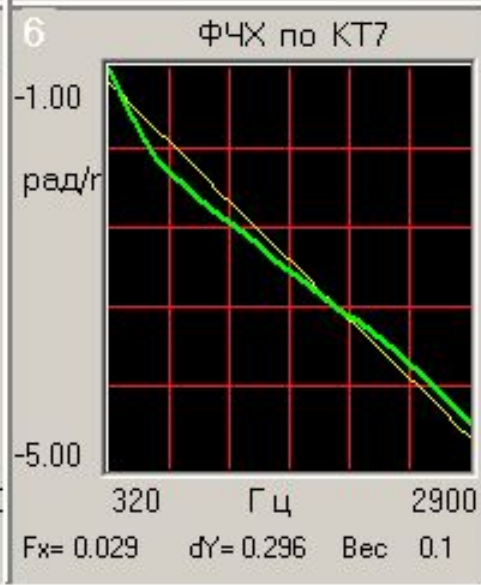
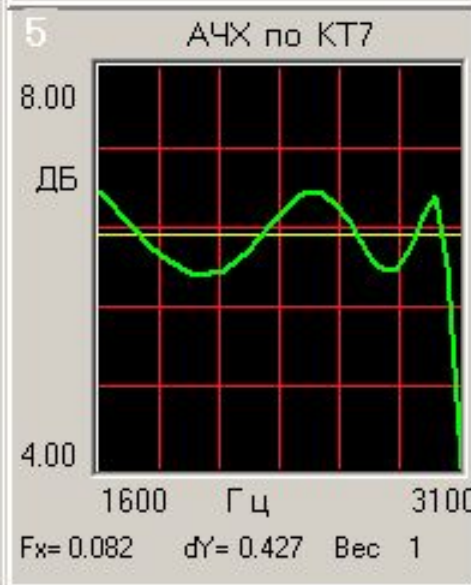
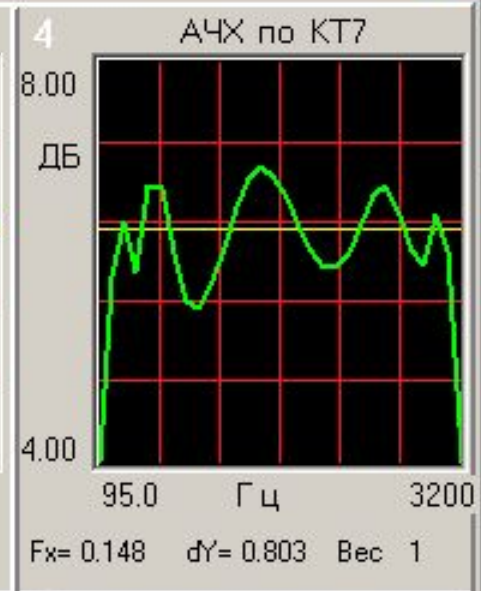
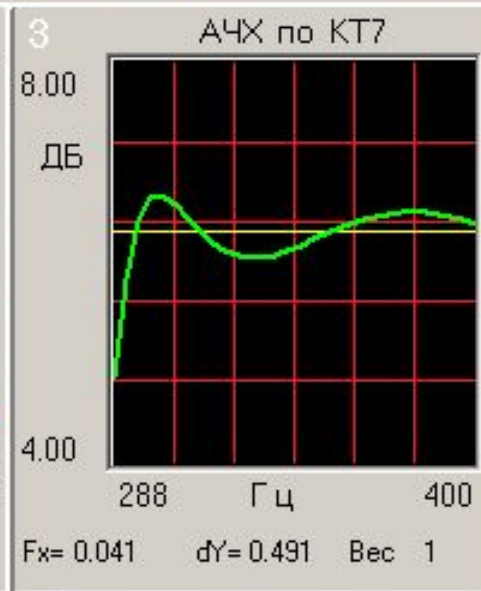
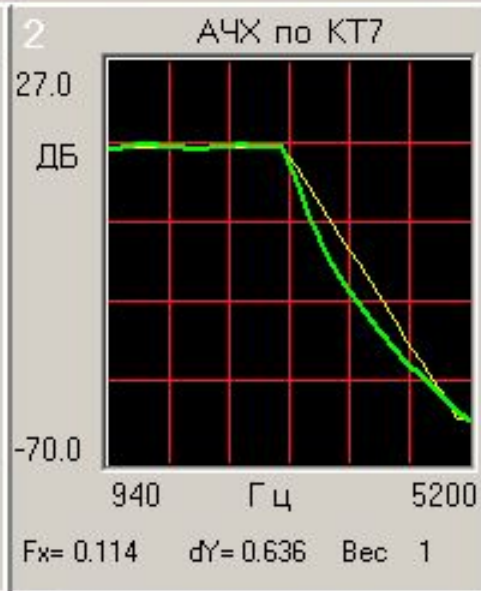
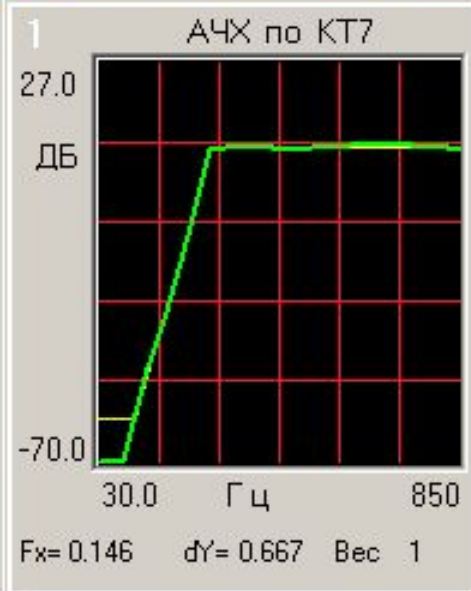
Процесс синтеза декадного активного фильтра



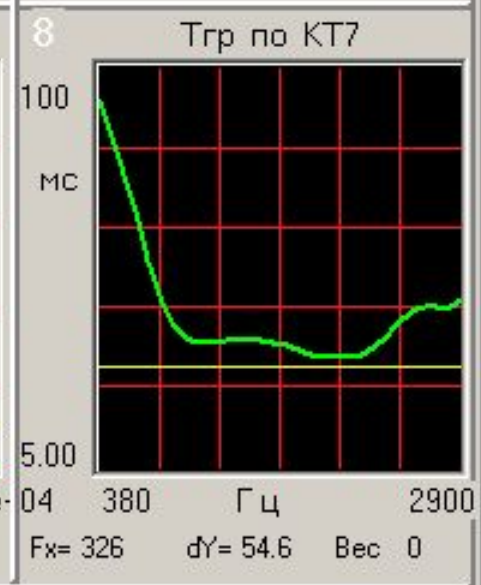
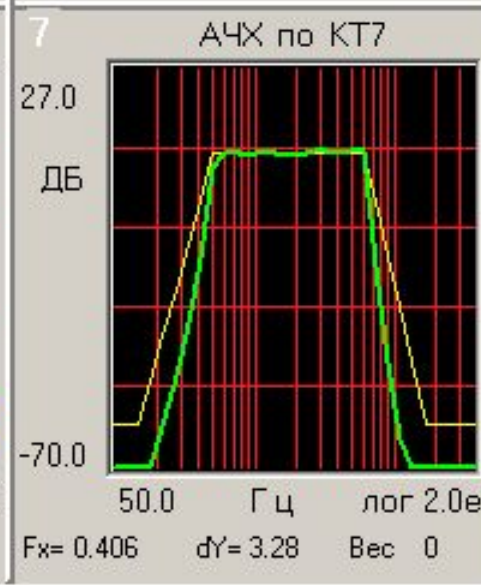
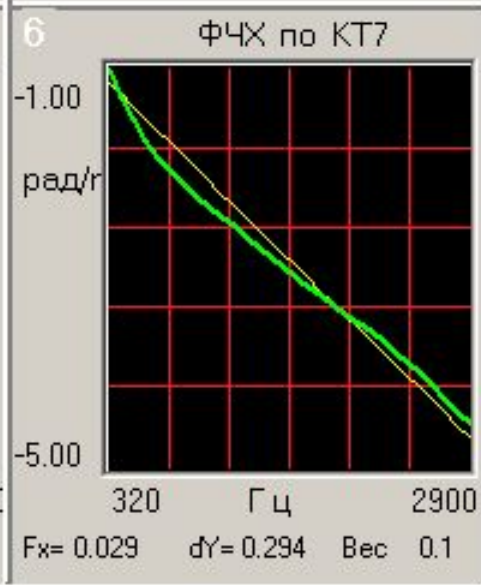
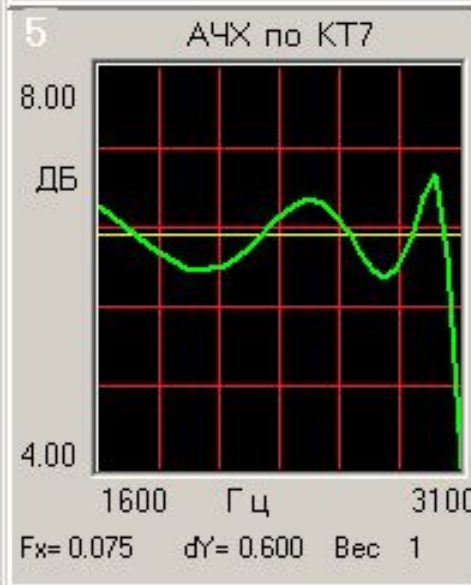
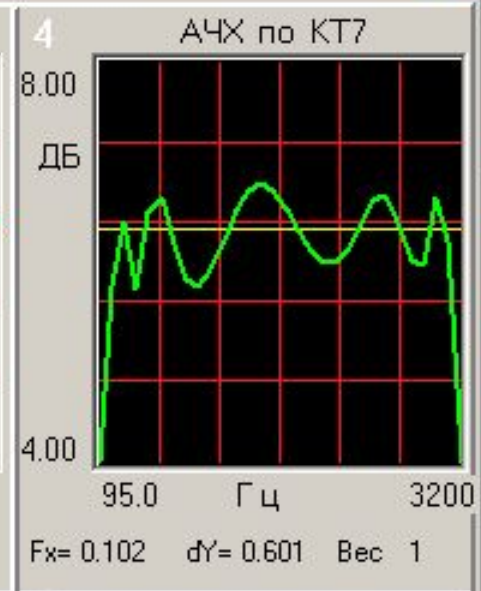
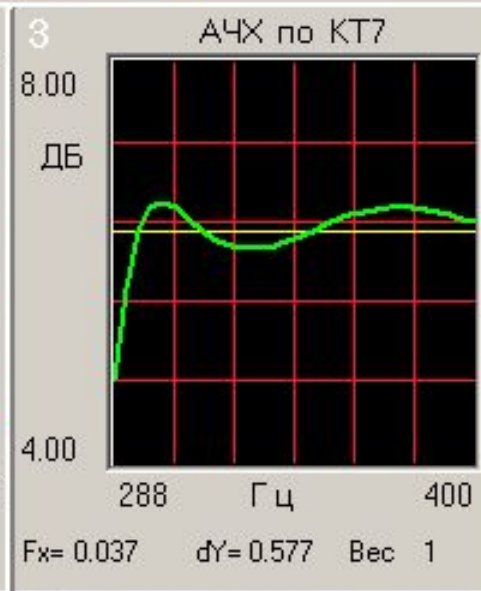
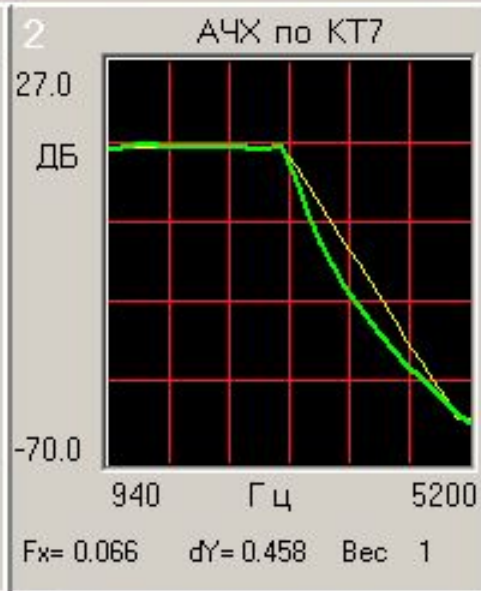
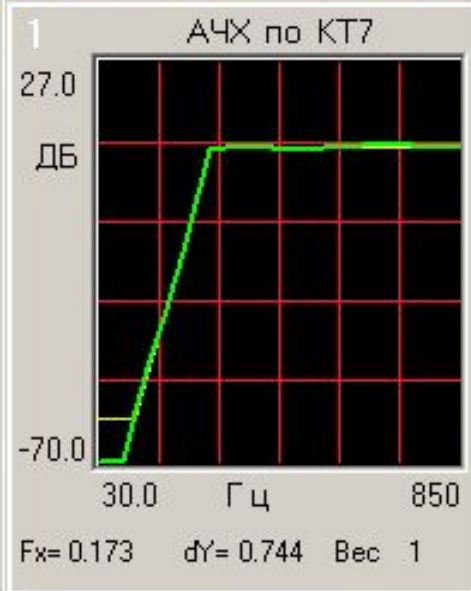
Функция: 0.928 Шаг: 1749 Итераций: 2383 Время синтеза: 16:45 Стек: 1 0.928

Синтез  Стоп  Стек  Уточнить  Парам  Диалог  Выход 1-8

Процесс синтеза декадного активного фильтра



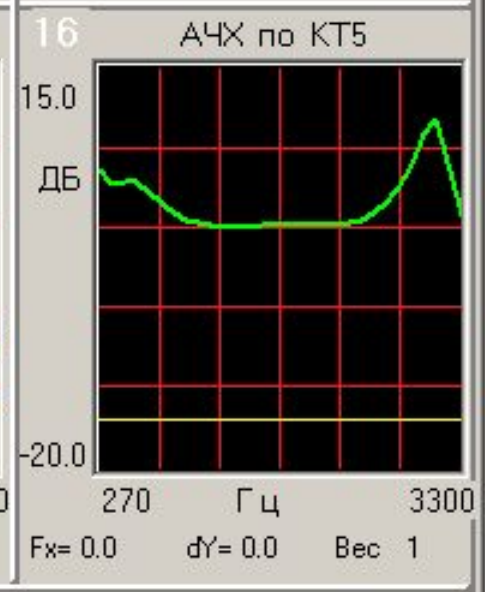
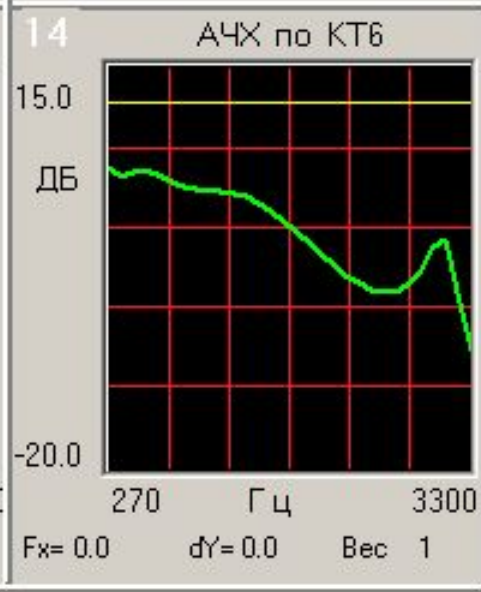
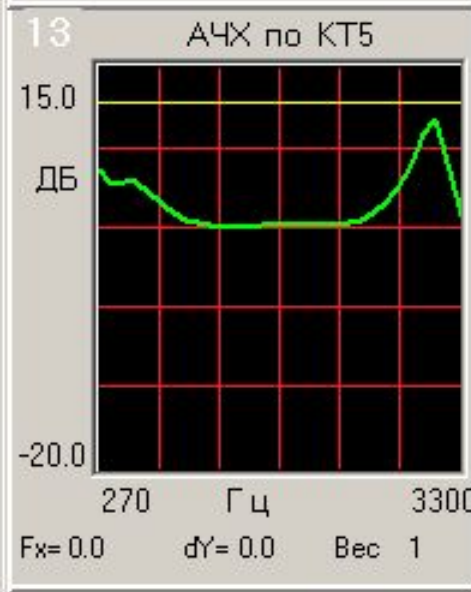
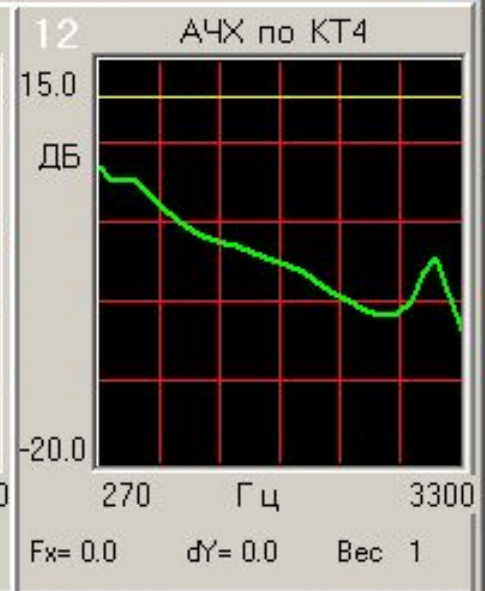
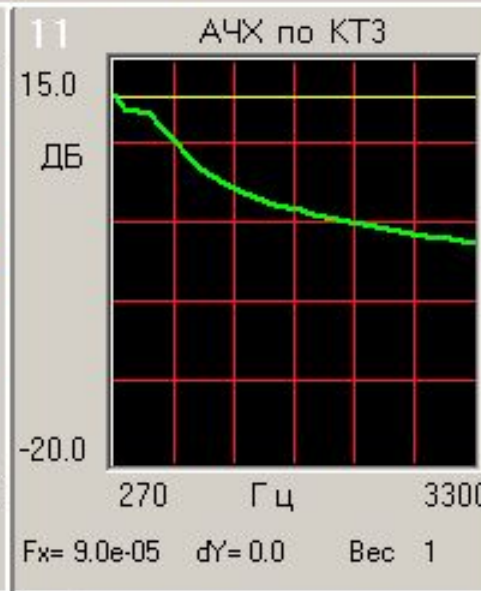
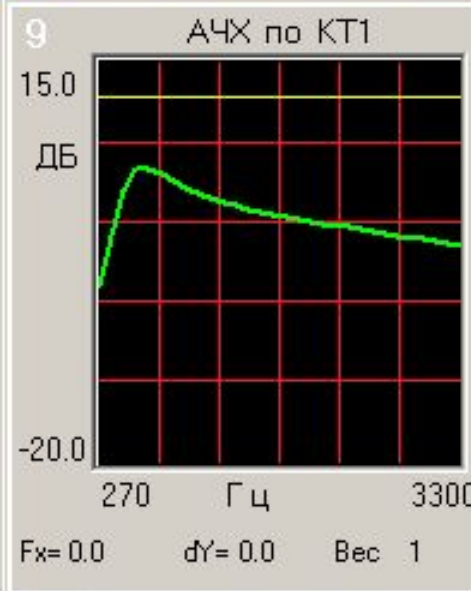
Процесс синтеза декадного активного фильтра



Функция: 0.456 Шаг: 4346 Итераций: 5467 Время синтеза: 35:30 Стек: 1 0.456

Синтез Стоп Стек Уточнить Парам Диалог Выход 1-8 Result

Синтез декадного активного фильтра завершен



Функция: 0.456 Шаг: 1 Итераций: 0 Время синтеза: 35:30 Стек: 1 0.456

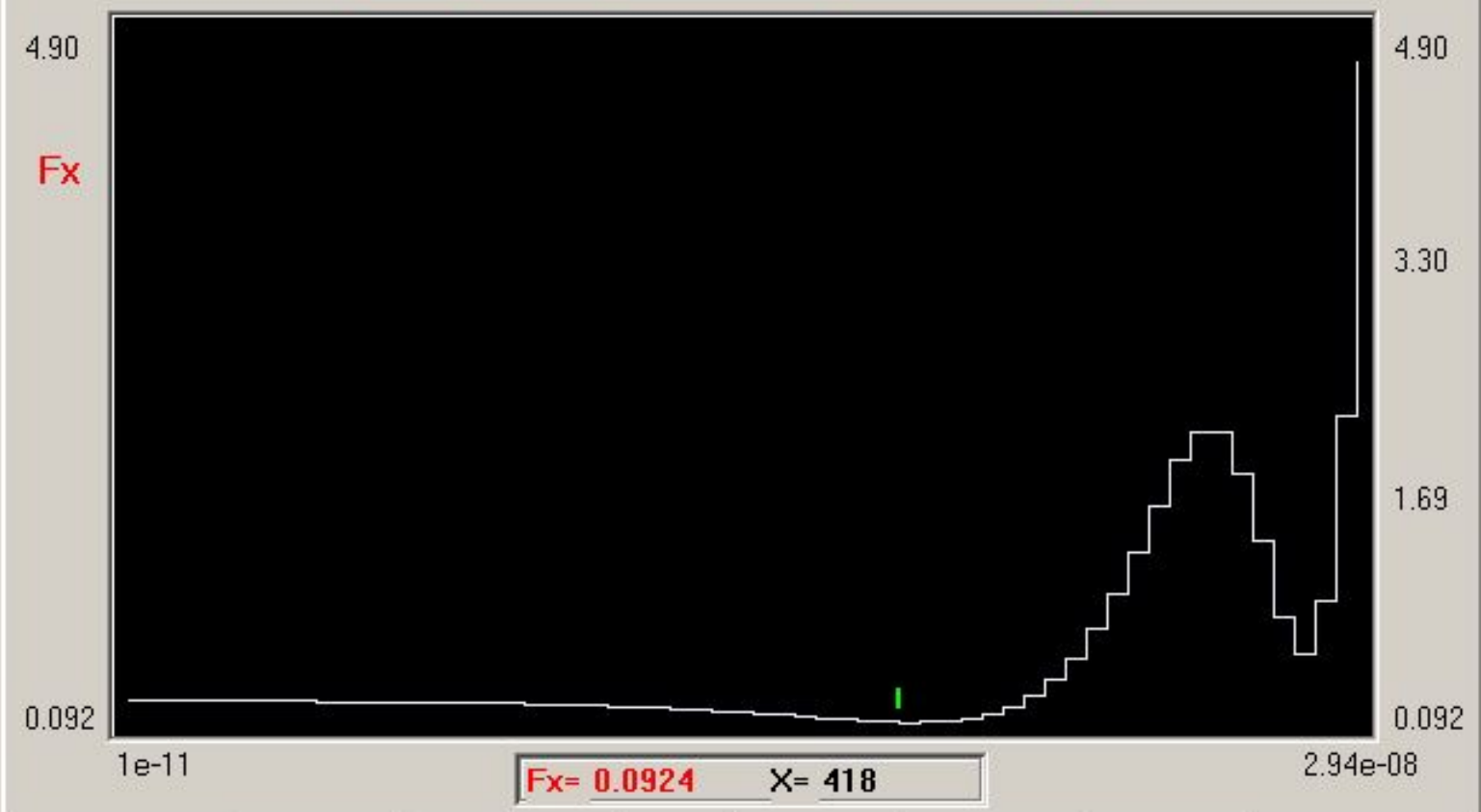
Синтез Стоп Стек Уточнить Парам Dialog Выход 9-16 Result

Синтез декадного активного фильтра завершен



расширен Координатный разрез целевого функционала

Разрез по переменной 31 (C = 4.1980e+02)

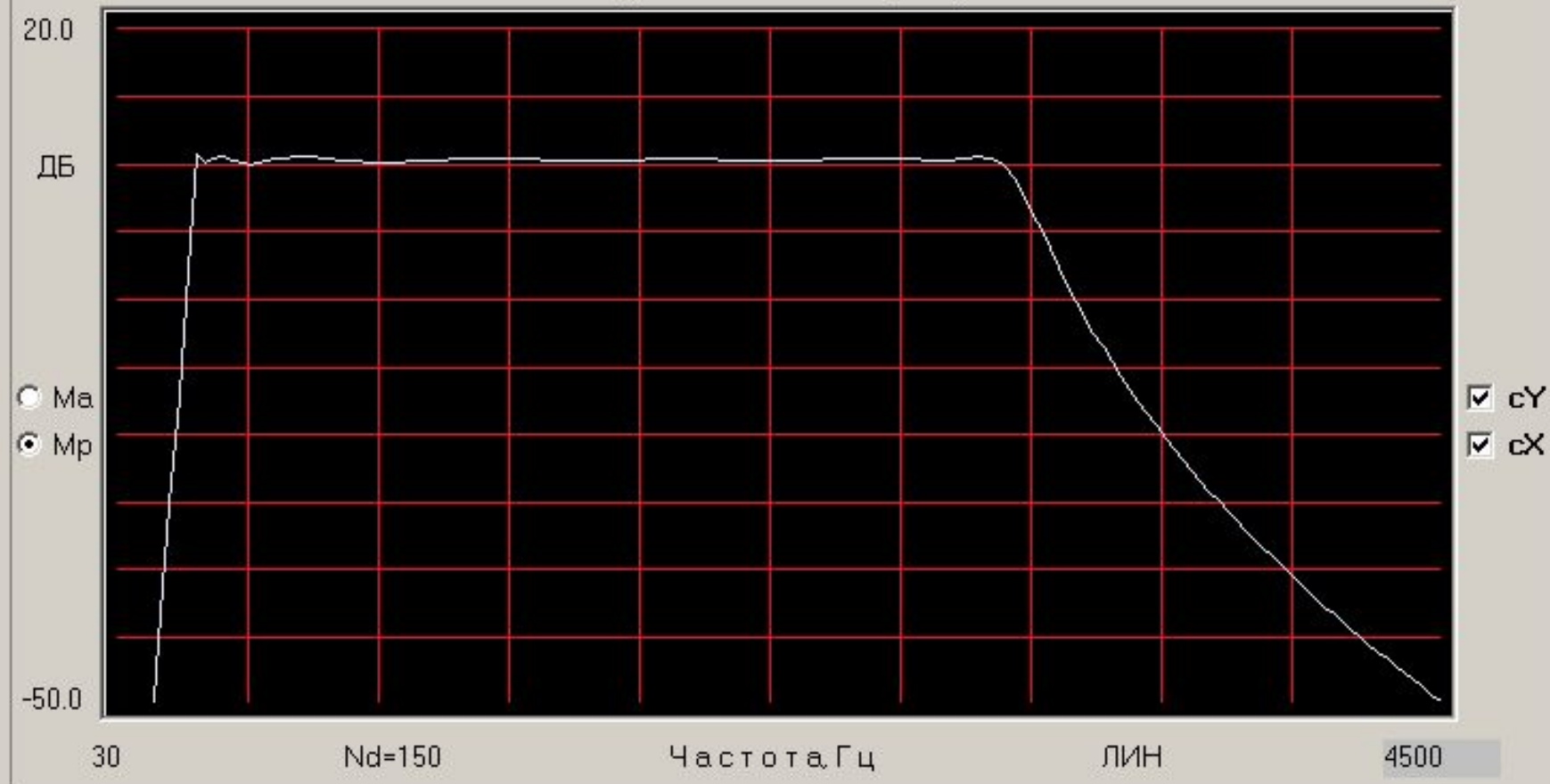


Разрез НГ ВГ Фикс Восстан Печать Cancel

Профиль разреза целевого функционала

Амплитудно-частотная характеристика

Выход 7



Параметры схемы

параметр	значение
R1 600	600
C1 8.35e-08	волн.сопр
C2 7.5e-07	50.00
R2 193	

Анализ    Протокол  
Panel    Восстан  
View    Print

Допуски

Анализ допусков

Допуск, % **2.0**

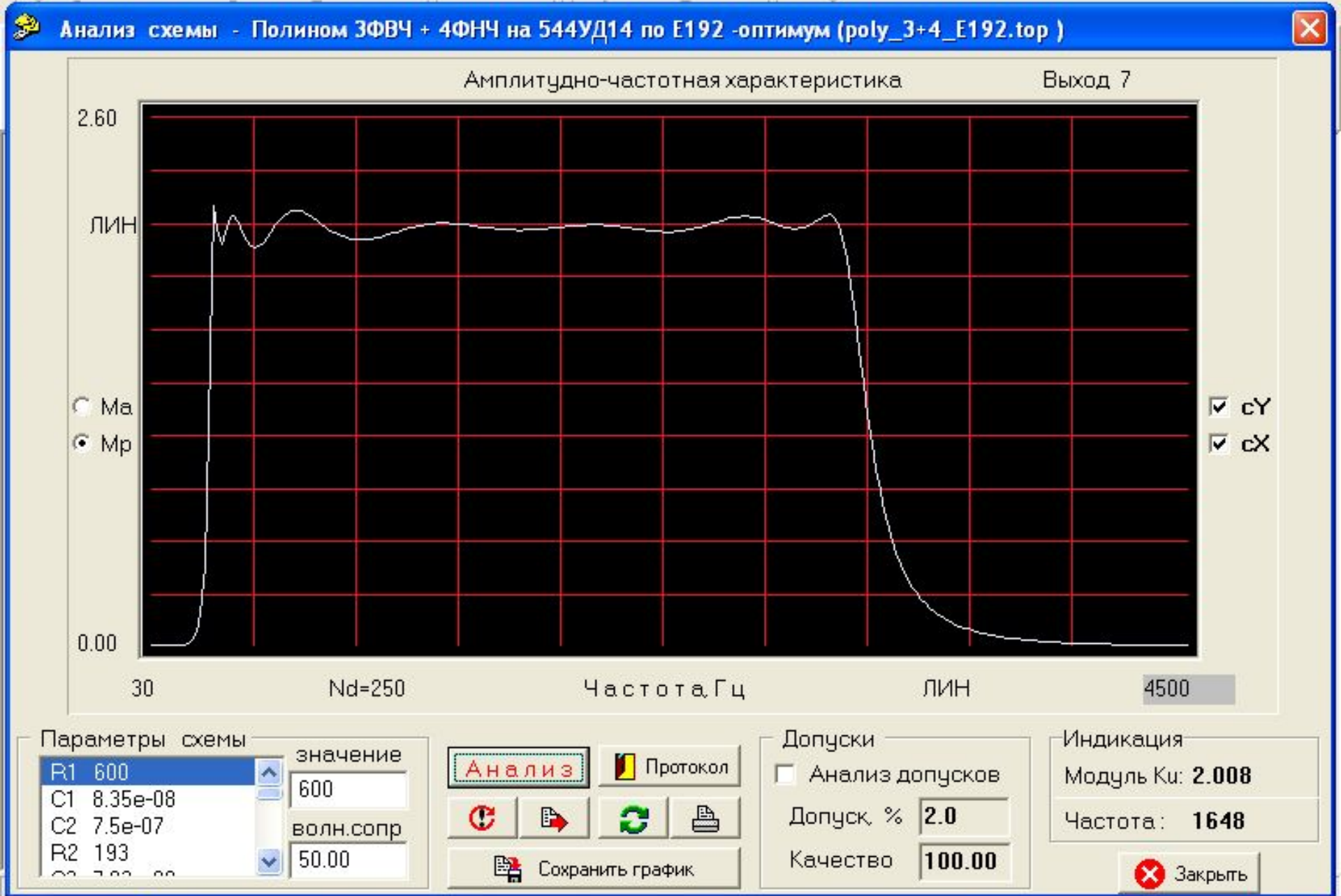
Качество **100.00**

Индикация

Модуль Ki: **6.709**

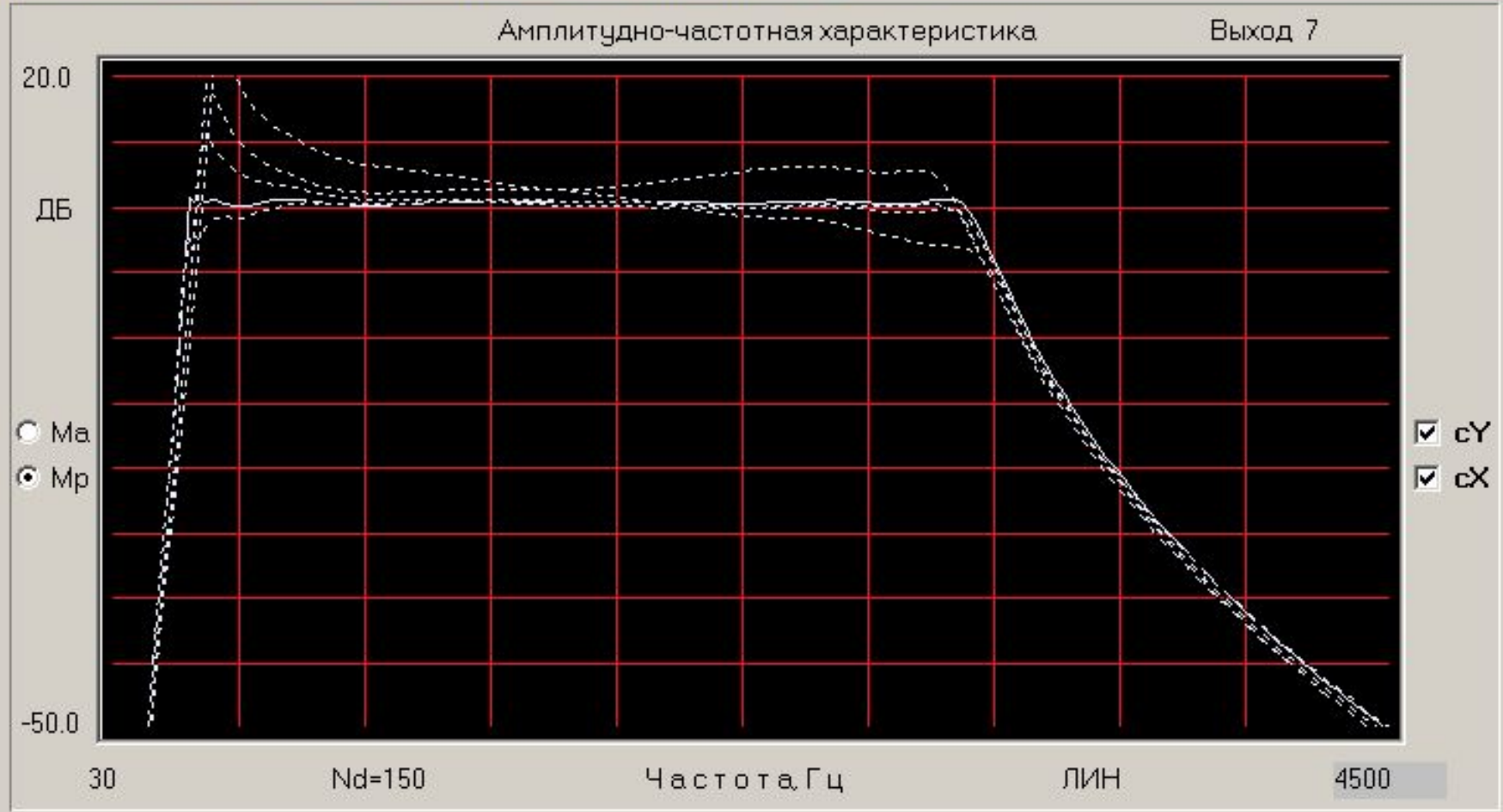
Частота: **2998**

Закреть



АЧХ фильтра в линейном масштабе





Параметры схемы

параметр	значение
R1 600	600
C1 8.385e-08	волн.сопр
C2 7.462e-07	50.00
R2 194.3	

Анализ Протокол  
 Panel Восстан  
 View Print

Допуски

Анализ допусков

Допуск, % **15.0**

Качество **0.12 %**

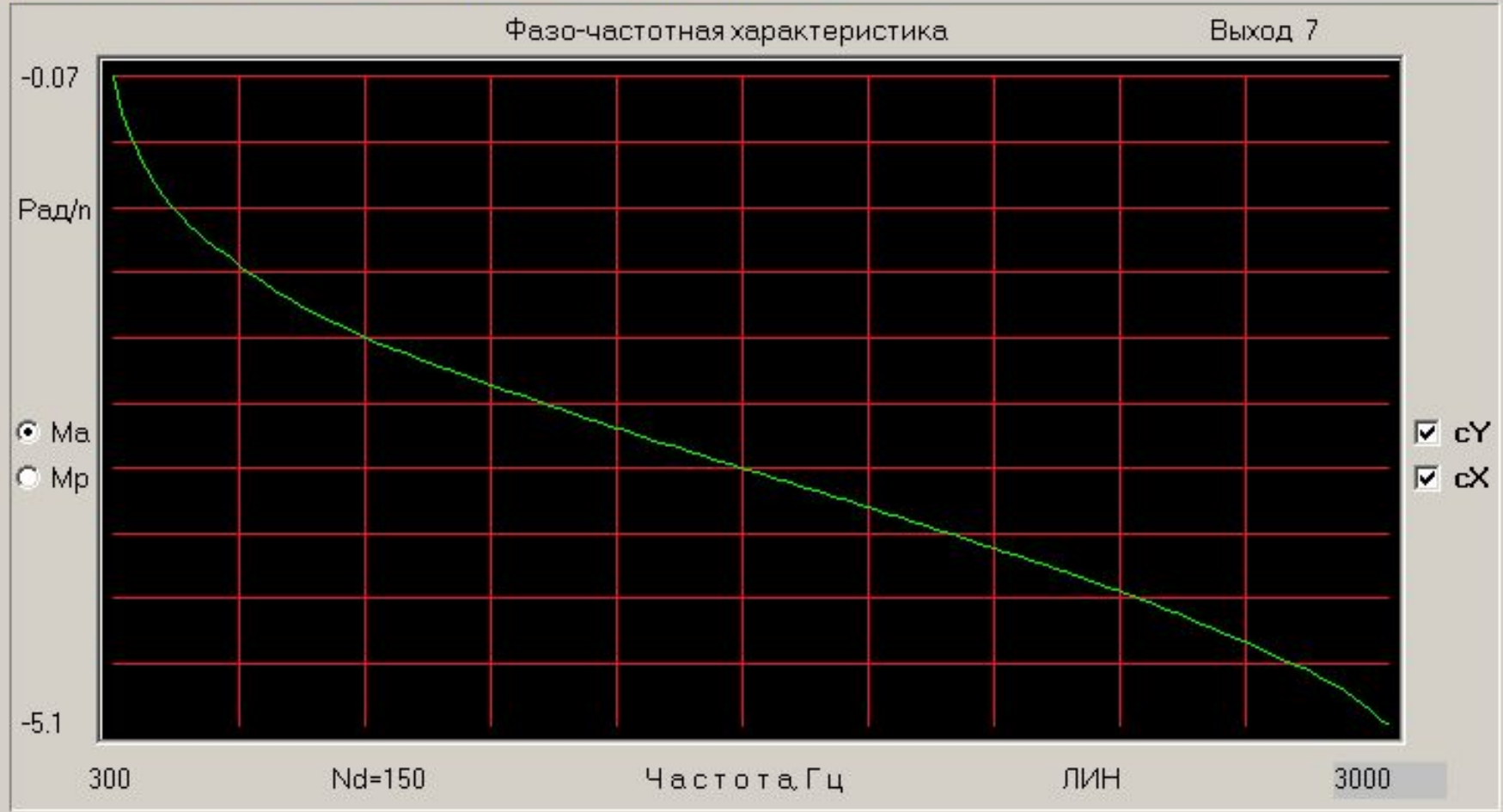
Индикация

Модуль Ki: **6.709**

Частота: **2998**

Закрыть

Анализ допусков



Параметры схемы

параметр	значение
R1 600	600
C1 8.385e-08	волн.сопр
C2 7.462e-07	50.00
R2 194.3	

Анализ Протокол  
 Panel Восстан  
 View Print

Допуски

Анализ допусков

Допуск, % 15.0

Качество 100.00

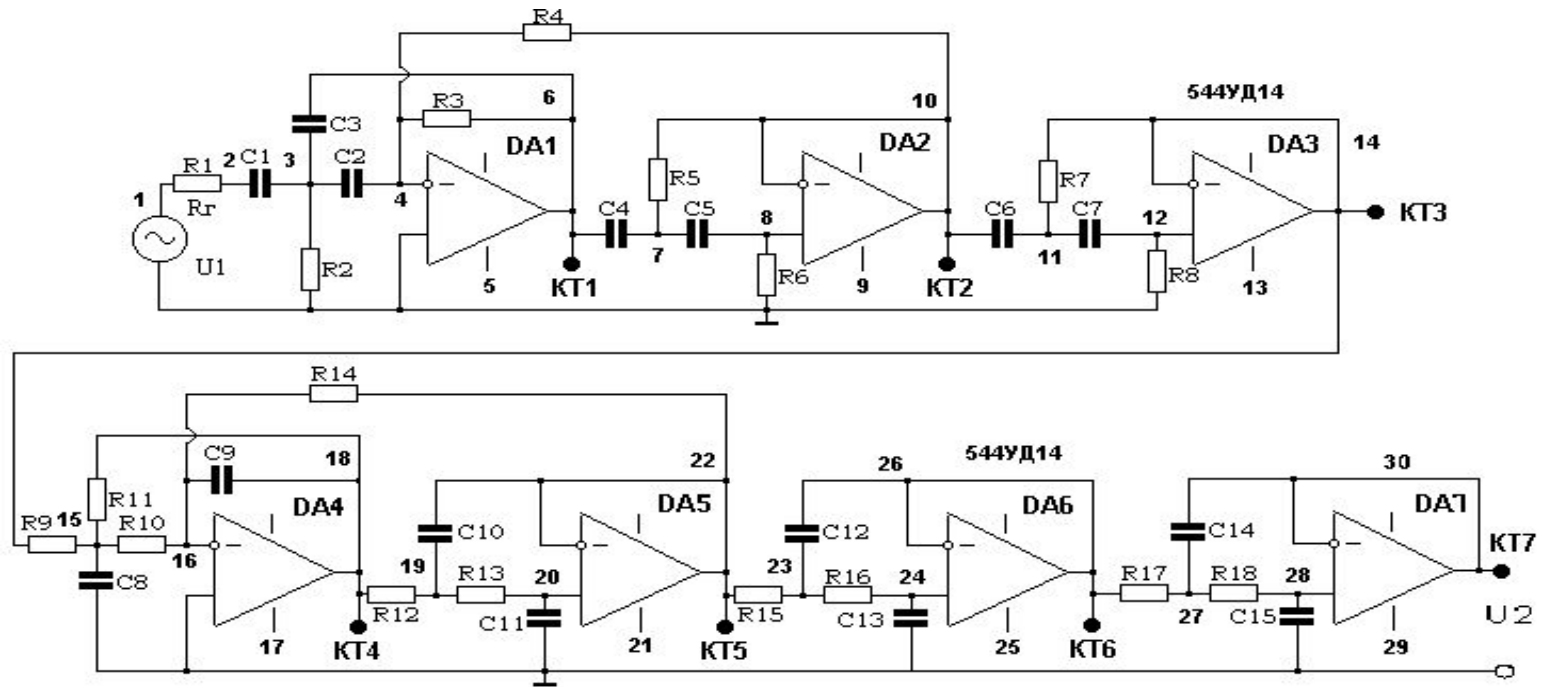
Индикация

Фаза Кн: -7.902

Частота: 442

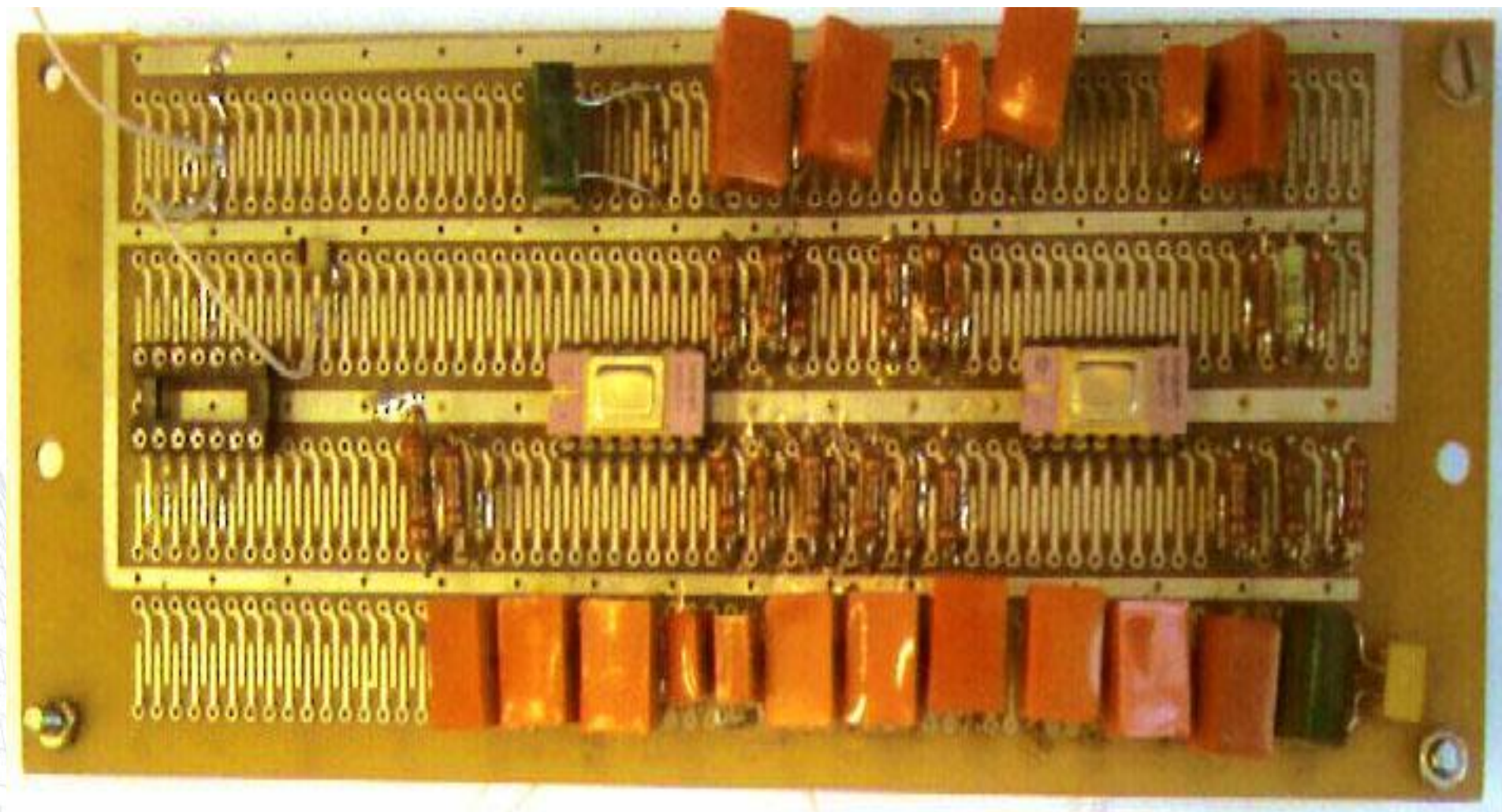
Закрыть

# Оптимальные дискретные параметры фильтра

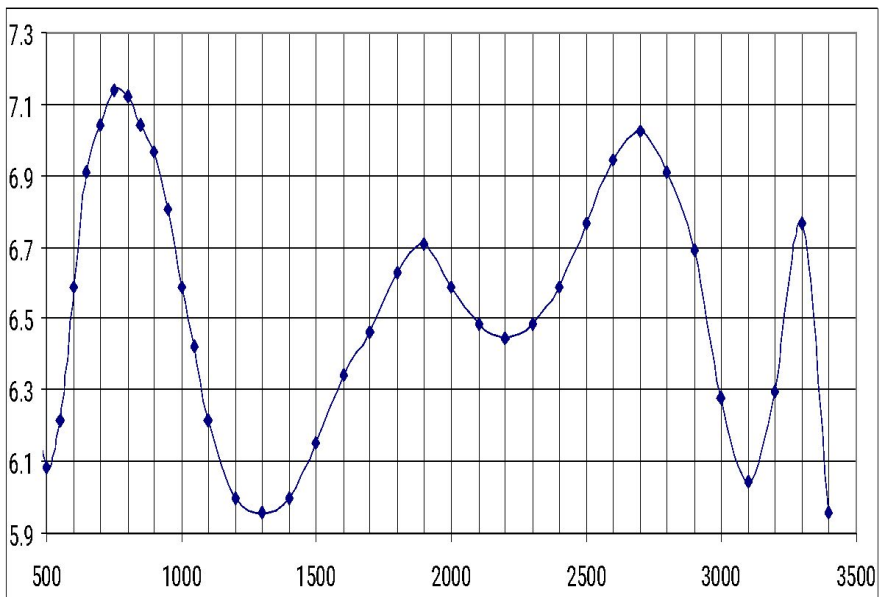


Резисторы				Конденсаторы			
R1	600 Ом	R10	6650 Ом	C1	44,2 нФ	C10	118 пФ
R2	1320 Ом	R11	3240 Ом	C2	41,7 нФ	C11	3,83 нФ
R3	19300 Ом	R12	51100 Ом	C3	44,2 нФ	C12	768 пФ
R4	412000 Ом	R13	8870 Ом	C4	2,67 нФ	C13	44,2 нФ
R5	39700 Ом	R14	50500 Ом	C5	39,2 нФ	C14	1,37 нФ
R6	732000 Ом	R15	15400 Ом	C6	44,2 нФ	C15	44,2 нФ
R7	294000 Ом	R16	5690 Ом	C7	27,4 нФ		
R8	845 Ом	R17	32800 Ом	C8	44,2 нФ		
R9	1870 Ом	R18	3160 Ом	C9	13,8 нФ		

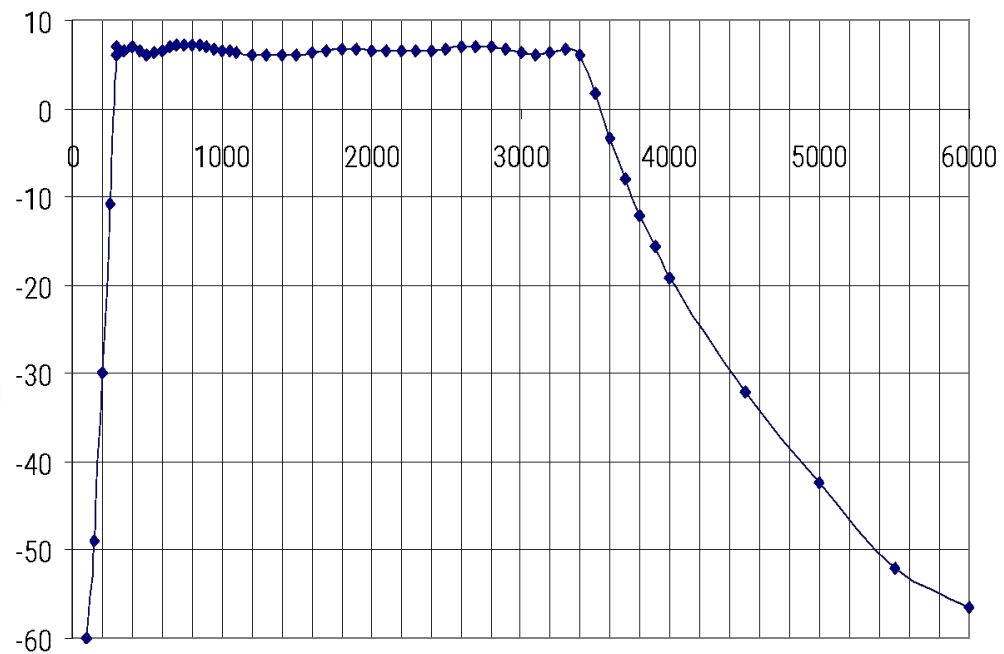
## Вид фильтра на макетной плате



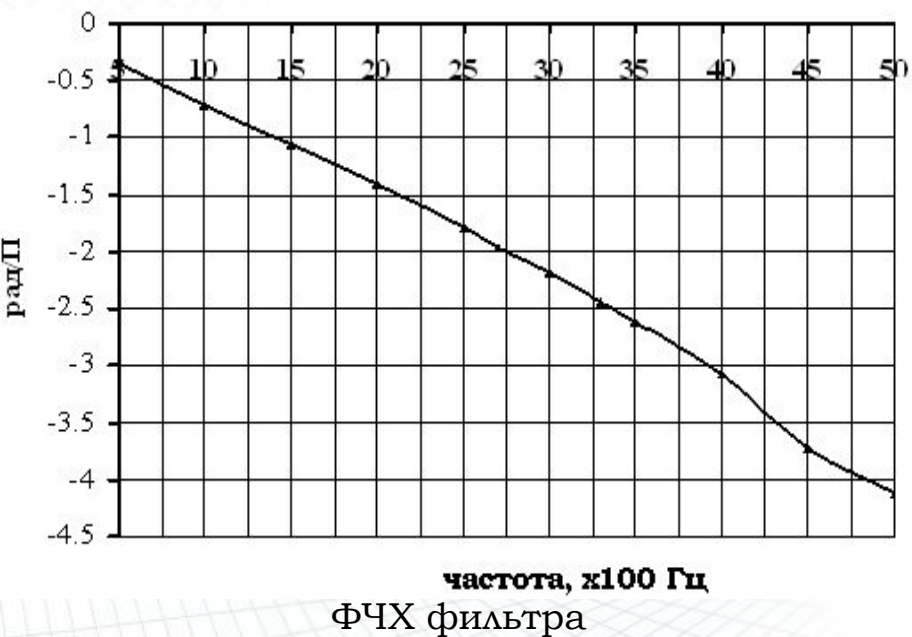
# Результат эксперимента



АЧХ фильтра в полосе

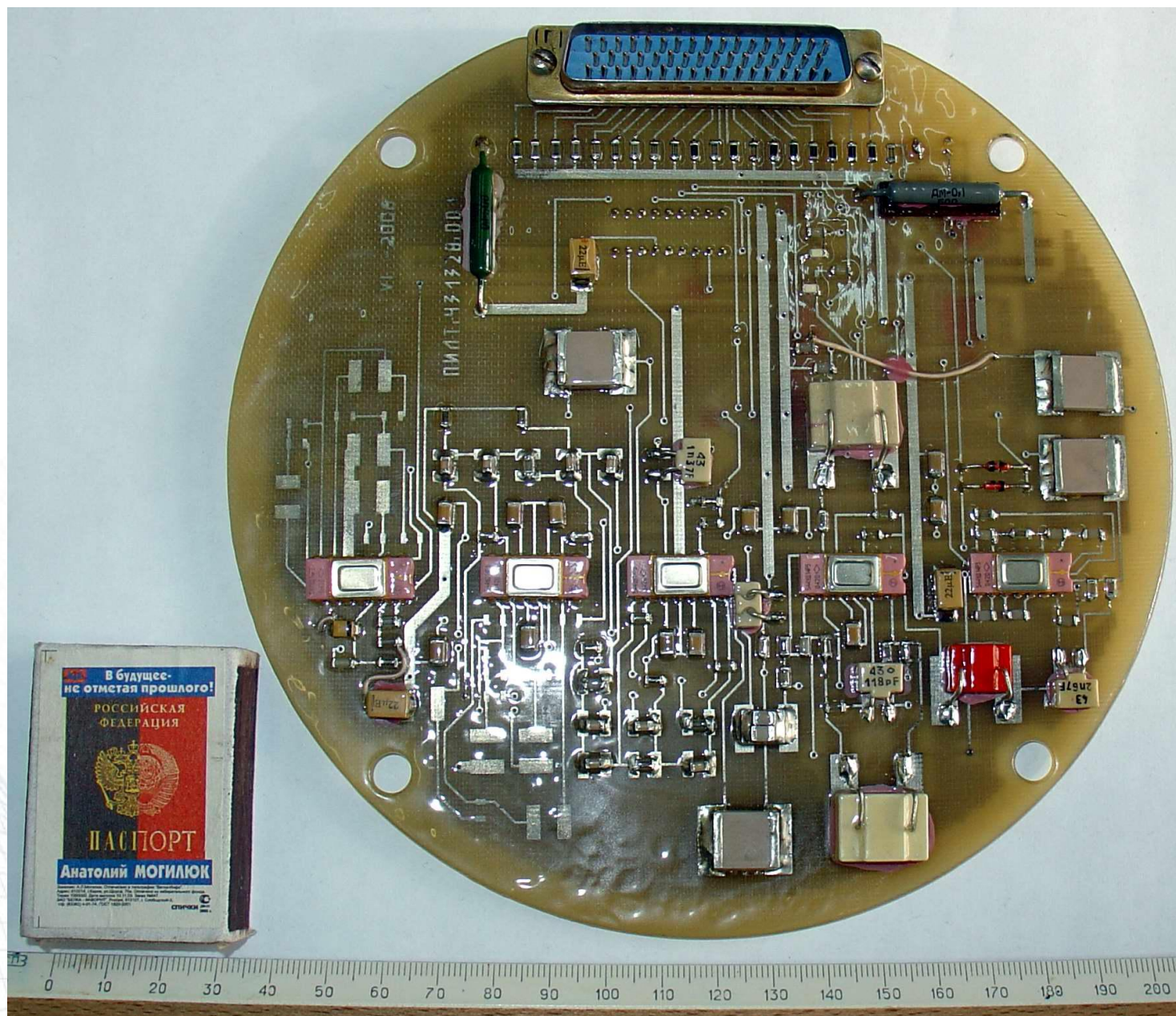


АЧХ всего фильтра



ФЧХ фильтра  
частота,  $\times 100$  Гц

# Вид фильтра в составе изделия «Весть»



## Техническое задание, результаты синтеза на ЭВМ и экспериментальные данные

Показатели фильтра	Техническое задание	Синтез на ЭВМ	Эксперимент
1. Диапазон частот, Гц	300 - 3400	294 - 3455	290 - 3410
2. Усиление в полосе, дБ	6 - 7	6,4	6,3
3. Неравномерность , дБ	0,5	0,46	0,67
4. Затухание на 150 Гц, дБ	40	58	46
5. Затухание на 5 кГц, дБ	40	56	43
6. Фазовые искажения, Град	60	51,6	57

## Лабораторный практикум

Наименование работы	Программа
1. Компьютерный анализ РЭУ в частотной области	MicroCap
2. Поисковые методы решения задач нелинейного программирования	Algorithm
3. Морфологический синтез технических решений	MORFEX
4. Оптимальное проектирование радио-электронных устройств	ЛиПС 4.0
5. Моделирование и синтез микрополосковых устройств	МИКРОПОЛ
6. Синтез и реализация цифрового ЦНП-фильтра на микроконтроллере	DDF 2.0
7. Морфологическая экспертиза в задачах управления персоналом	MORFEX
8. Компьютерный практикум по системной психологии	SPS 2.0