

**РАЗРАБОТКА ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, АКТУАЛЬНОСТЬ



Область применения

Программа «Моделирование Telecomm», построенная на основе объектно-ориентированного многоуровневого программирования, имеет широкий спектр применения и может быть использована для:

- выбора оптимального беспроводного протокола для различных IoT приложений на физическом уровне;
- синтеза новых, имеющих повышенную частотную эффективность и помехоустойчивость сигналов, применяемых в проводной, сотовой и спутниковой связи, а также для оптимизации приемного фильтра сигнала на физическом уровне;
- синтеза зондирующих сигналов, применяемых в системах радиолокации, а также в устройствах координатно-временного навигационного обеспечения (КВНО) беспилотных аппаратов.



Актуальность

Развитие цифровой экономики предопределяет необходимость проведения научных исследований, которые предполагают, в том числе, разработку математического обеспечения для платформы, лежащей в основе умного применения и производства оборудования средств связи.

С целью решения этой задачи ФГУП ЦНИИС разработал программу «Моделирование Telecomm» для работы пользователя через веб - приложение по модели SaaS (Software as a service). С помощью пользовательских библиотек программа настраивается на конкретную задачу клиента, который работает со своим веб - приложением через интернет.

СТРУКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ



Рис.1 Функциональная модель канала связи

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Программа «**Моделирование Telecomt**» построена на основе технологии объектно-ориентированного многоуровневого программирования. В таблицах 1, 2 и 3 представлена ее структура.

Атрибуты объектов	Библиотеки моделей объектов (данные)
Матрица алфавита выходных символов ВА – $[A_{ij}]$ Матрица условных вероятностей перехода ВА – $[P_{ij}]$	Вероятностных автоматов (ВА)
Амплитудно-частотная характеристика ИП – $ P(i\omega) $ Фазо- частотная характеристика ИП – $\varphi(\omega)$	Импульсных помех (ИП)
Амплитудно-частотная характеристика СП – $ F(i\omega) $ Фазо- частотная характеристика СП – $\varphi(\omega)$	Сред передачи (СП)
Амплитудно-частотная характеристика КП – $ H(i\omega) $ Фазо- частотная характеристика КП – $\varphi(\omega)$	Каналов передачи с нулевой межсимвольной помехой (КП)
Амплитудно-частотная характеристика КУ – $ K(i\omega) $ Фазо- частотная характеристика КУ – $\varphi(\omega)$	Приемных устройств (корректирующих усилителей) (КУ)
Амплитудно-частотная характеристика ФС – $ S(i\omega) $ Фазо- частотная характеристика ФС – $\varphi(\omega)$	Формирователей импульсных сигналов (ФС)

Таблица 1 Библиотека объектно-ориентированных моделей

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Программы	Библиотеки моделей объектов (Данные)					
	ВА	ИП	СП	КП	КУ	ФС
Энергетический спектр $G(\omega)$	X					
Амплитудно-частотная характеристика ИП – $ P(i\omega) $		X				
Фазо-частотная характеристика ИП – $\varphi(\omega)$						
Амплитудно-частотная характеристика СП – $ F(i\omega) $			X			
Фазо-частотная характеристика СП – $\varphi(\omega)$						
Амплитудно-частотная характеристика КП – $ H(i\omega) $				X		
Фазо-частотная характеристика КП – $\varphi(\omega)$						
Амплитудно-частотная характеристика КУ – $ K(i\omega) $					X	
Фазо-частотная характеристика КУ – $\varphi(\omega)$						
Амплитудно-частотная характеристика ФС – $ S(i\omega) $						X
Фазо-частотная характеристика ФС – $\varphi(\omega)$						

Таблица 2 Взаимодействие библиотек и программ

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Каждой программе присвоен соответствующий ранг. Взаимодействие программ в процессе работы осуществляется с учетом их ранжирования.

Ранг	Программы	Взаимодействие программ				
		1	2	3	4	5
0	Энергетический спектр $G(\omega)$		X	X		
0	Характеристика ИП – $ P(i\omega) , \varphi(\omega)$			X		
0	Характеристика СП – $ F(i\omega) , \varphi(\omega)$	X				X
0	Характеристика КП – $ H(i\omega) , \varphi(\omega)$	X				
1	Характеристика КУ – $ K(i\omega) , \varphi(\omega)$	X	X	X		
0	Характеристика ФС – $ S(i\omega) , \varphi(\omega)$				X	X
2	Дисперсия шума – $\delta_{ш}$		X		X	X
3	Дисперсия помехи – $\delta_{п}$			X	X	
4	Расчет вероятности ошибки – $P_{ош}$				X	
5	Оптимизация КУ					X

Таблица 3 Взаимодействие программ

ПРОГРАММА «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»

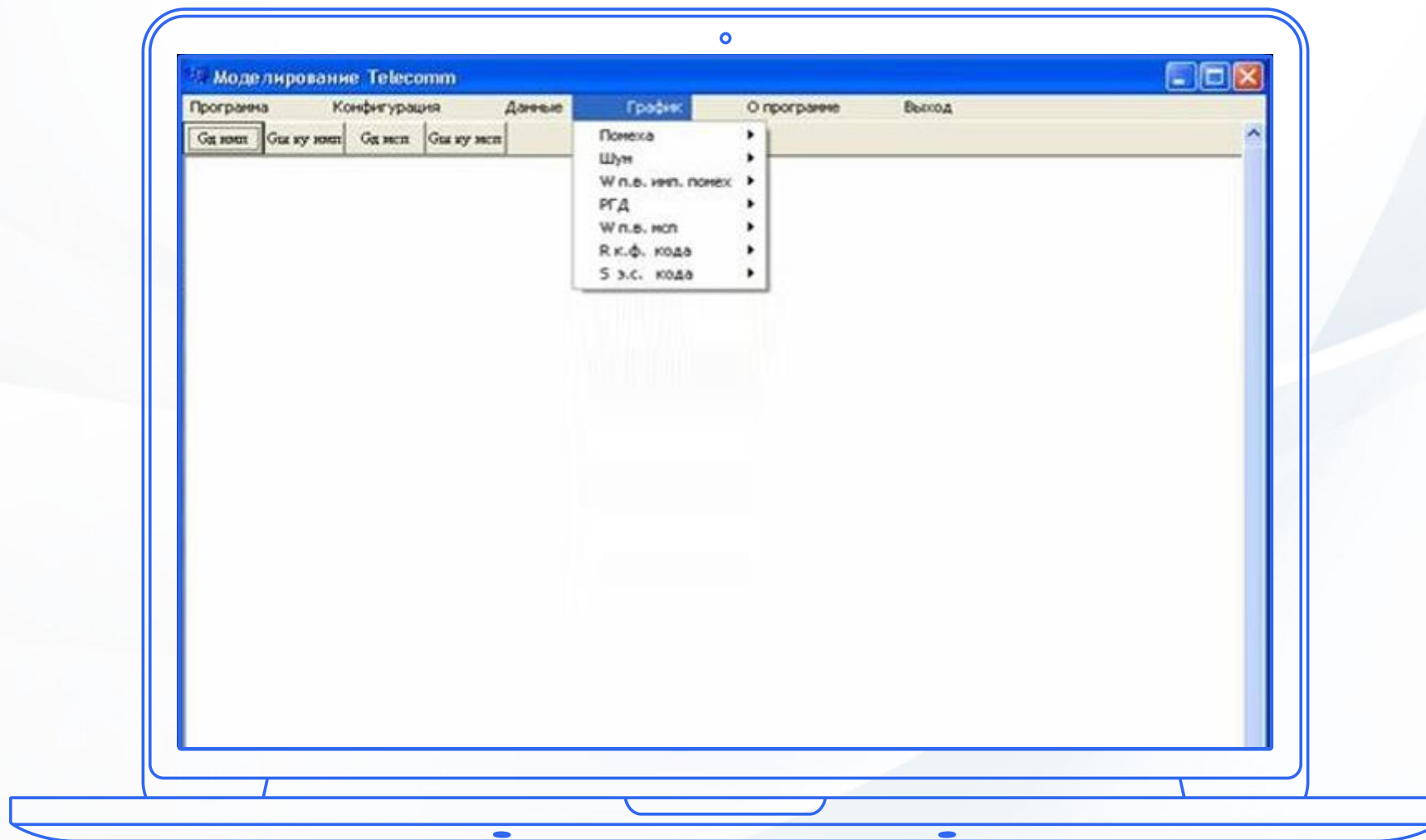


Рис. 2 Панель задач программы «Моделирование Telecom»

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА)

Расчет энергетического спектра.

Процесс кодирования сигнала может быть представлен в виде вероятностного автомата (ВА) с N – начальными состояниями Q_i , который задается с помощью матриц входных $-B_{ij}$ и выходных $-A_{ij}$ символов ВА, а также матрицей условных вероятностей перехода P_{ij} . ВА может быть определен следующим выражением:

$$A = \{[B_{ij}], [A_{ij}], [P_{ij}], Q_i\}$$

Выражение A должно удовлетворять следующим условиям:

$$\sum_i P_{ij} = 1, P_{ij} \geq 0, \sum_i Q_i = 1$$

Матрица вероятностей переходов P_{ij} задается в виде регулярной стохастической матрицы, для которой выполняется соотношение:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} [P_{ij}]^m = Q_i$$

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА)

Корреляционная функция ВА, в свою очередь, может быть представлена следующим выражением:

$$R(0) = \sum_{i=1}^N Q_i \left(\sum_{j=1}^N P_{ij} A_{ij}^2 \right)$$

$$R(1) = \sum_{i=1}^N Q_i \left[\sum_{j=1}^N P_{ij} A_{ij} \left(\sum_{l=1}^N P_{jl} A_{jl} \right) \right]$$

$$R(n+1) = \sum_{i=1}^N Q_i \left[\sum_{j=1}^N P_{ij} A_{ij} \left[\sum_{k=1}^N P_{jk}^n \left(\sum_{l=1}^N P_{kl} A_{kl} \right) \right] \right]$$

а, энергетический спектр выражением:

$$G(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R(n) \cos \omega n T$$

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА)

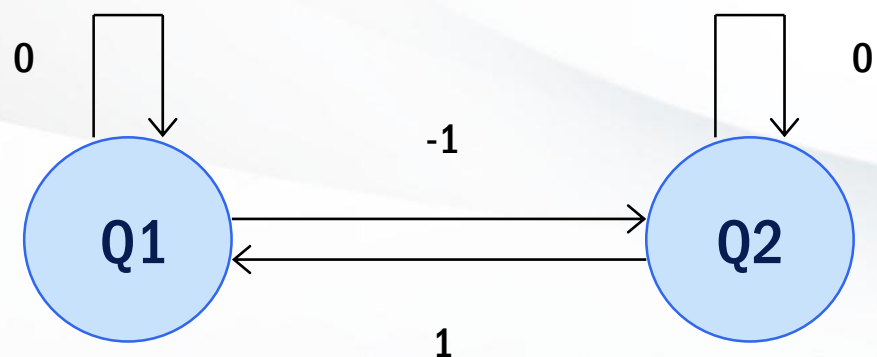


Рис. 3 Граф ВА кода AMI

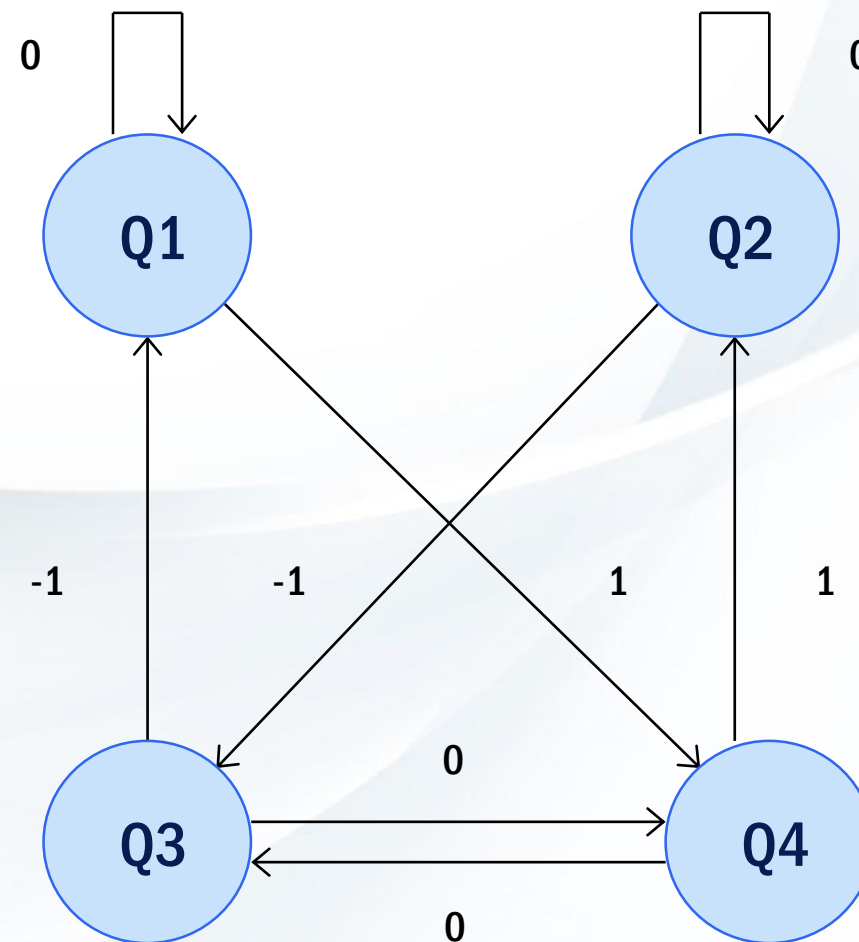


Рис. 4 Граф ВА кода MDBH

ПРОГРАММА «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»

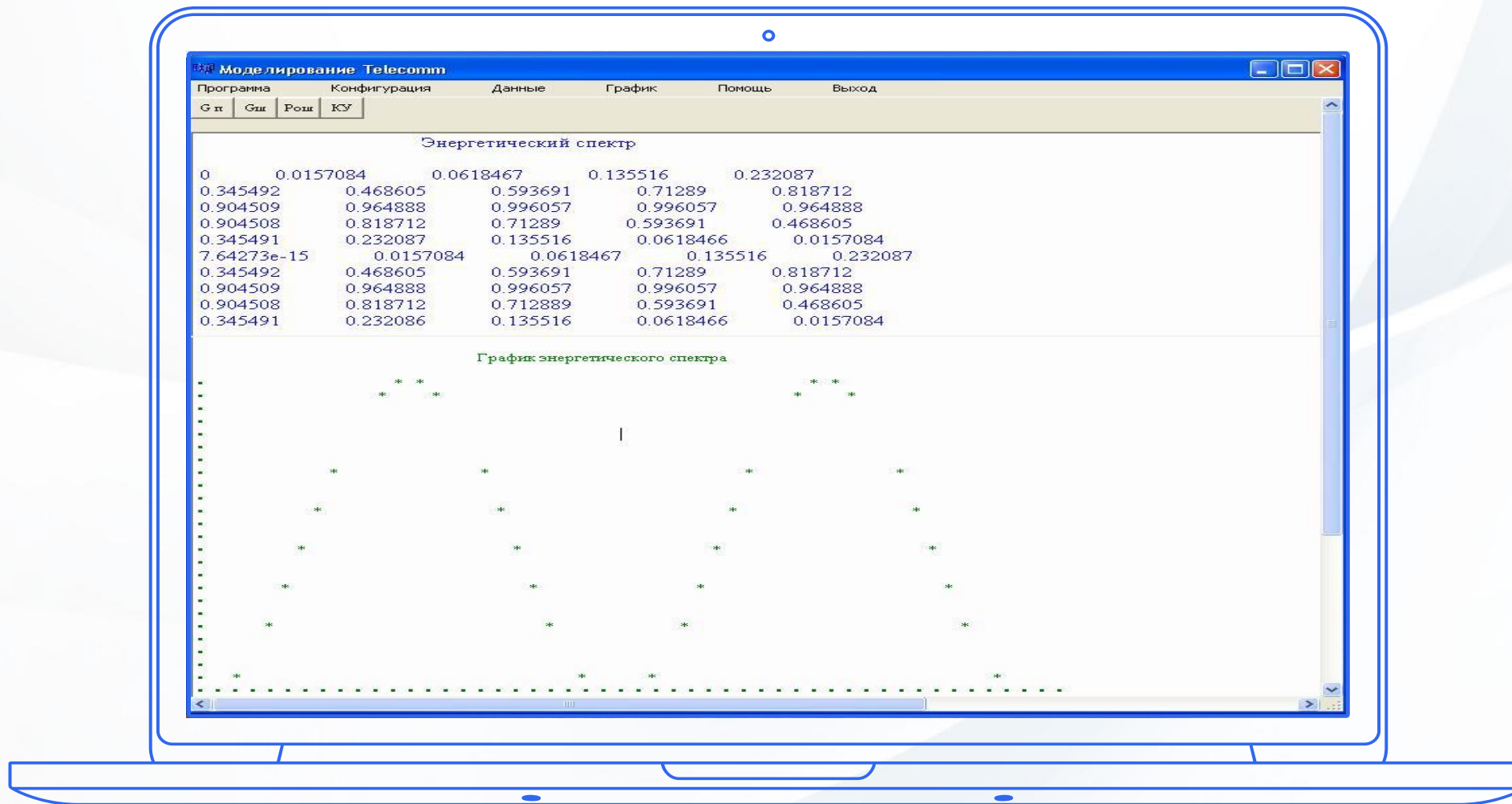


Рис. 5 Пример расчета энергетического спектра кода MDBH

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ)

Расчет вероятности ошибки. Будем считать, что закон плотности вероятности (ПВ) импульсной помехи, являющийся воздействием случайного процесса ξ^i , от i -влияющих систем передачи неизвестен. Однако известно, что он является усеченным на конечном интервале. Тогда в соответствии с центральной предельной теоремой одномерная ПВ переходной помехи, полученная в результате ее суммирования от i -влияющих систем передачи, аппроксимируется усеченным нормальным законом распределения:

$$W(\xi^i) = \begin{cases} 1/[(2\pi)^{1/2} \sigma_{\xi^i} \cdot N_H] \cdot \exp\{- (\xi^i)^2 / 2 \cdot (\sigma_{\xi^i})^2\} & \xi^i \leq (\xi_{\max})^i \\ 0 & \xi^i > (\xi_{\max})^i \end{cases}$$

$(\xi_{\max})^i$ – максимальное значение импульсной помехи,

σ_{ξ^i} – дисперсия импульсной помехи,

N_H – нормирующий коэффициент $N_H = \text{erf}\{(\xi_{\max})^i / (2^{1/2} \sigma_{\xi^i})\}$

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ)

В результате вероятность ошибки сигнала на приеме при воздействии импульсной помехи будет определяться следующим выражением:

$$P_{\text{ош}} = 1/2 * \sum_{k=1}^K P_i * \int_{\zeta_{\text{min}}}^{\zeta_{\text{max}}} W(\zeta^i) * \text{erfc}\{(S_k - \zeta^i) / (2^{1/2} * \sigma_{\text{ш}})\} d\zeta^i$$

$W(\xi^i)$ – закон распределения плотности вероятности импульсной помехи,

$\sigma_{\text{ш}}$ – дисперсия шума,

$\text{erfc}\{\}$ – дополнительная функция ошибок,

K – число уровней сигнала

ПРОГРАММА «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»

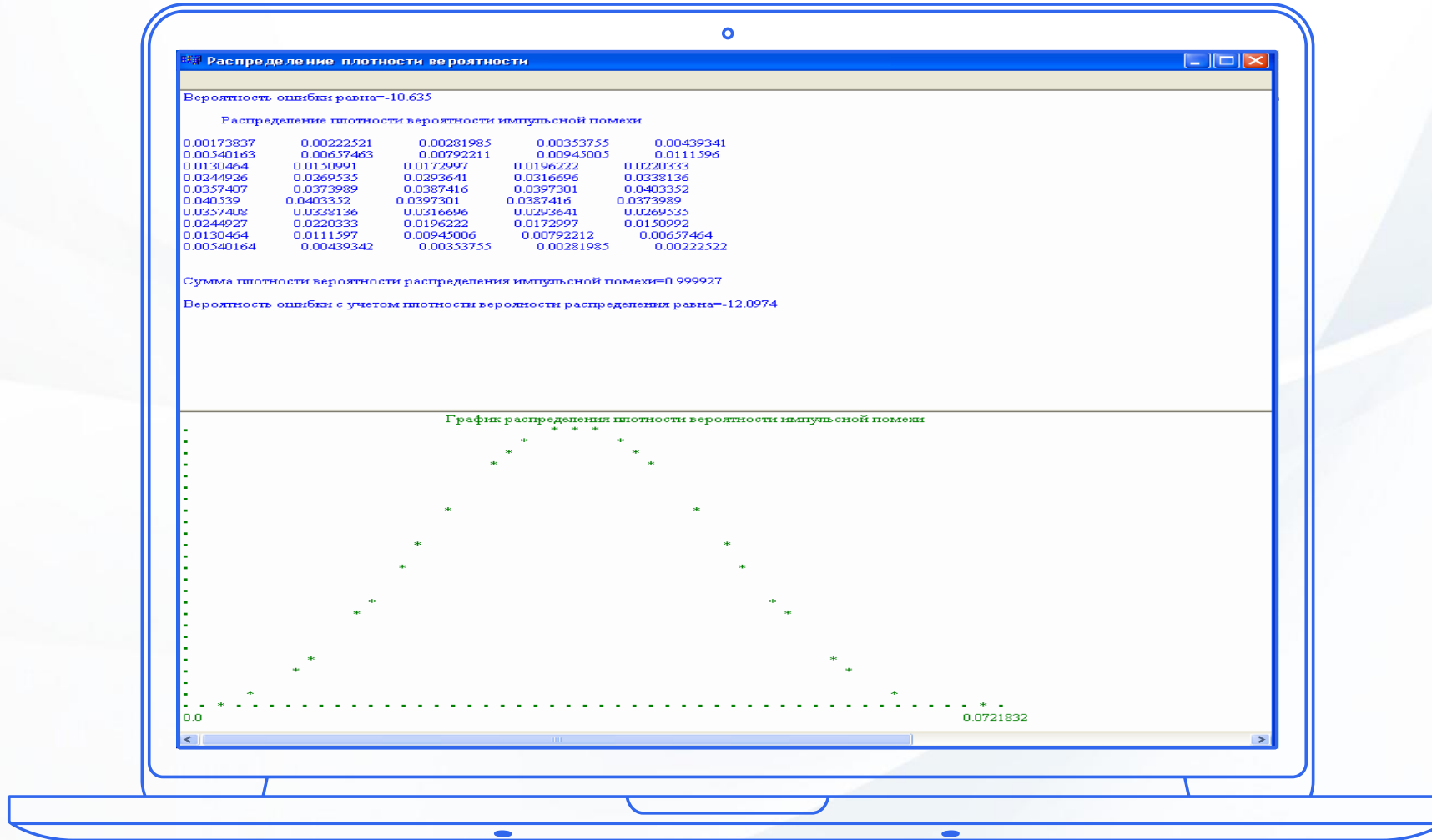


Рис. 6 Расчет распределения плотности вероятности импульсной помехи

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

(ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИЕМНОГО ФИЛЬТРА)

Оптимизация приемного фильтра.

Задачу синтеза оптимального приемного фильтра можно сформулировать следующим образом: найти передаточную функцию приемного фильтра, для которой критерий качества (целевая функция) $-Ф$ достигает своего максимального (минимального) значения. При этом в качестве целевой функции при оптимизации приемного фильтра можно воспользоваться функционалом $-Ф$, определяющим соотношение сигнал/шум.

По своему физическому смыслу определение максимального значения функционала $-Ф$ соответствует поиску максимального значения соотношения сигнал/шум с учетом ухудшающего влияния, обусловленного воздействием импульсных и межсимвольных помех. С вычислительной точки зрения эта задача эквивалентна поиску экстремума функции многих переменных. Так как целевая функция многоэкстремальна, то сходимость решения к глобальному экстремуму существенно зависит от правильно выбранного начального приближения полюсов и нулей, аппроксимирующей приемный фильтр функции.

При расчетах с помощью программы «Моделирование Telesoft» Рис. 7 в качестве начального приближения использовались характеристики фильтров Баттерворта - 2, 3 и 4 порядка.

ПРОГРАММА «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»

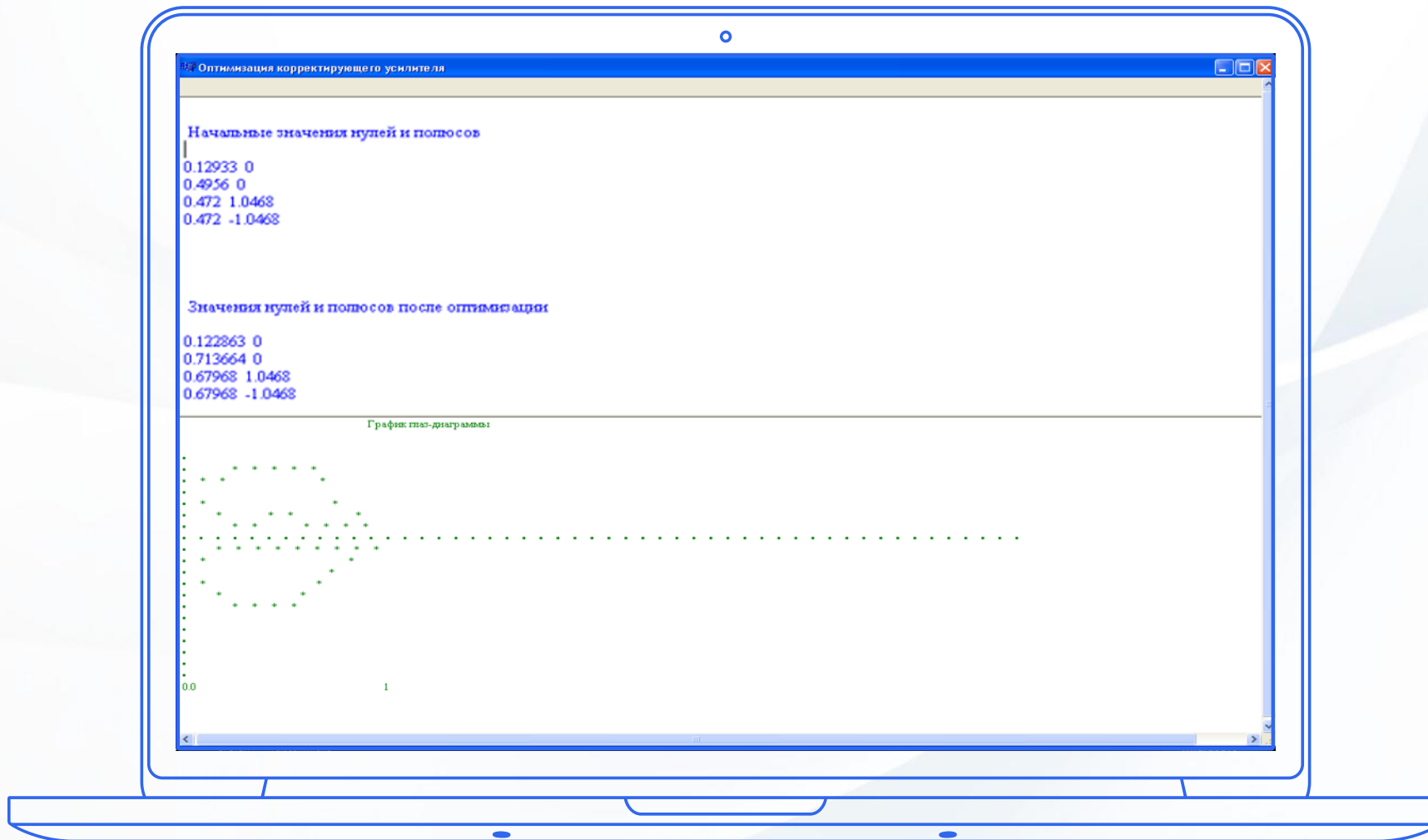


Рис. 7 Результат оптимизации приемного фильтра

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2018611321

Моделирование Telecomm

Правообладатель: *Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт связи (ФГУП ЦНИИС) (RU)*

Автор: *Мазуренко Дмитрий Константинович (RU)*

Заявка № **2017661165**
Дата поступления **31 октября 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 февраля 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



Г.П. Ивлиев

ПАРАМЕТРЫ ПРОГРАММЫ «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM»



Тип реализующей ЭВМ: **IBM PC**

Язык программирования:
C++ для Window (Borland C++Builder 6.0)

Вид и версия операционной системы: **Windows XP/7**

Объем программы для ЭВМ: **6 Мбайт**

ПРОГРАММА «МОДЕЛИРОВАНИЕ TELECOMM». ВЫВОДЫ

1

Применение при разработке программы «Моделирование Telecom» технологии объектно-ориентированного многоуровневого программирования позволяет в дальнейшем обеспечивать наращивание пользователем библиотек моделей объектов программы

2

Использованная технология объектно-ориентированного программирования допускает также применение моделей объектов, полученных с помощью прикладных программ «MATLAB» и «MathCAD»

3

Разработанный пакет прикладных программ может эффективно использоваться при проведении научных исследований, в том числе для анализа и оптимизации электромагнитного влияния и зон покрытия сотовых сетей операторов связи, синтеза новых более эффективных и помехоустойчивых кодовых сигналов

4

Разработанный пакет прикладных программ «Моделирование Telecom» является базовой версией и может быть изменен и сконфигурирован под задачи заказчика