

```
//Основная процедура
MakeCourseGraph(F)
1 SRes ← MakeCover(F)
2 S ← {0}
3 Gs ← MakeBranch(S,F,SRes)
4 return Gs
```

Таким образом, предложенный подход позволит решать ряд задач, являющихся традиционными для разработчиков электронных учебных курсов, таких как: отобрать подмножество учебных объектов, обеспечивающих максимально высокий уровень изложения заданной системы понятий, при условии ограничения времени на изучение курса  $t_{общ}$  некоторым значением  $t_{крит}$ ; построить индивидуальную траекторию и определить время, необходимое для изучения некоторого подмножества понятий на заданном уровне.

Предложенная модель может быть применена для постановки и решения задачи проектирования иерархии классов учебных объектов, содержание которых ориентировано на заранее заданные уровни изучения отдельных понятий и курса в целом. На данный момент такая задача является актуальной в связи с переходом к многоуровневому образованию в условиях поэтапного формирования системы компетенций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Draft Standard for Learning Object Metadata. IEEE Standard 1484.12.1. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.
2. Захарова И.Г., Ланг Я.В., Охотникова Е.С. Математические модели вариативных электронных учебных курсов // Вестник ТюмГУ. 2008. № 6.
3. Норенков И.П. Управление знаниями в информационно-образовательной среде // Научно-образовательный портал ИНЖЕНЕР, 2009. [http://engineer.bmstu.ru/journal/publications/norenkov\\_men\\_know.phtml](http://engineer.bmstu.ru/journal/publications/norenkov_men_know.phtml).

*Алексей Владимирович МАЕР —  
преподаватель кафедры программного обеспечения  
и автоматизированных систем  
Курганского государственного университета  
[alex\\_povt@mail.ru](mailto:alex_povt@mail.ru)*

УДК 519.248

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ AUTOMATED PROGRAM COMPLEX FOR MODELLING OF THE RELIABILITY OF COMPLEX SYSTEMS**

**АННОТАЦИЯ.** В работе рассматривается автоматизированный программный комплекс для моделирования надежности сложных технических систем. Для статистического моделирования результатов испытаний в условиях ограниченных выборочных данных используется бутстреп-процедура, а при расчете показателей надежности — методы непараметрической статистики.

**SUMMARY.** In the present work, an automated program complex for modelling the reliability of complex technical systems is described. A bootstrap procedure is used for statistical modelling of test results under conditions of limited sample data, and methods of non-parametric statistics are used to calculate the reliability characteristics.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Надежность, сложные системы, точечные и интервальные оценки показателей

**KEY WORDS.** Reliability, complex systems, point and interval estimation of parameters

### Введение

В теории надежности сложных систем и ее приложениях одной из важных и трудных задач является задача точечного и интервального оценивания показателей надежности по результатам автономных испытаний элементов.

Как известно, оценка данных показателей и их доверительных интервалов даже для типовых распределений с простейшим последовательным соединением элементов зачастую не имеет теоретического решения для многих практических задач. В связи с этим для решения данных задач в основном используются системы статистического моделирования, например, RELEX. В таких системах пользователь, исходя из физических априорных соображений или критериев согласия, подбирает параметрический датчик, имитирующий работу элемента системы. Нетрудно понять, что от выбора модели датчика во многом будет зависеть процесс верификации имитируемой модели и реального изделия. Но именно этот момент является наиболее трудно формализуемым. Объем испытаний элементов, как правило, ограничен, что затрудняет верификацию априорных распределений по критериям согласия. В этом случае мы имеем дело с непараметрической постановкой задачи, особенно при анализе выхода моделируемой системы, где необходимо пользоваться методами непараметрической статистики. Таким образом, сам процесс моделирования должен быть основан на бутстреп-моделировании [1], должны использоваться развитые алгоритмы непараметрических датчиков, учитывающих априорную информацию [2-3] и методы анализа выхода моделируемой системы должны основываться на методах непараметрической статистики [4], [5].

Разрабатываемый программный комплекс (ПК) призван решать описанные выше задачи.

### Архитектура ПК

Программный комплекс осуществляет статистическое моделирование результатов испытания в условиях ограниченных выборочных данных на основе бутстреп-процедур, основанных на параметрических и непараметрических датчиках с учетом априорной информации [2-3].

ПК состоит из 6 функциональных блоков (рис. 1): графический блок, блок настройки моделируемой системы, блок-преобразователь в дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ), блок моделирования системы, блок анализа и блок генерации отчетов.

Графический блок позволяет отобразить структуру моделируемой на надежность системы в интерактивном режиме. Каждый элемент системы отображается в виде специального графического обозначения. Наличие связи между элементами отображается в виде направленной стрелки. Направление стрелки показывает зависимость между элементами системы. Если  $A \rightarrow B$ , то это значит, что  $B$  зависит от  $A$ . Если между элементами существует связь без направления, то эти элементы независимы. Существует возможность динамического изменения (добавление и удаление элементов и связей между ними к уже имеющейся схеме) структуры системы. Для создания модели с «нуля» можно воспользоваться панелью инструментов, которая расположена в верхней части главного окна программы (рис. 2). Существует возможность

перемещения элемента модели в окне редактирования. Это позволяет располагать элементы модели в удобном для восприятия виде. Графический редактор не допускает наложения элементов.

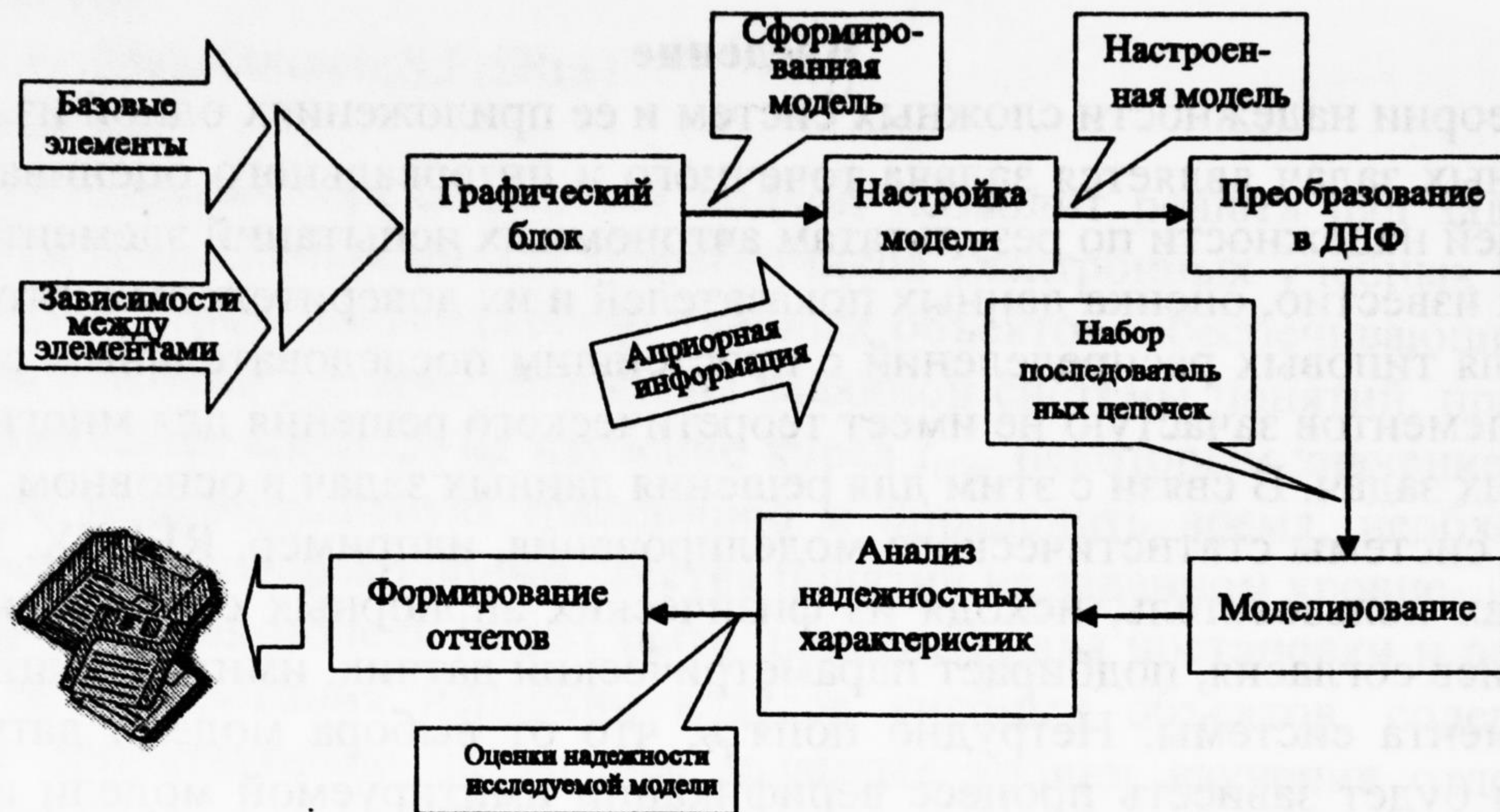


Рис. 1. Структура программного комплекса

В блоке настройки (рис. 2) для каждого элемента существует возможность задать тот или иной датчик. Каждый датчик принадлежит к одному из двух типов: параметрический и непараметрический. Для первого типа датчиков реализованы следующие распределения: экспоненциальное, распределение Коши, нормальное, хи-квадрат, логнормальное, логистическое, распределение Парето, распределение Вейбула, гамма-распределение, распределение Стьюдента с возможностью автоматического нахождения параметров распределения [10]. Если выбран непараметрический тип датчиков, то смоделировать работу элемента можно двумя способами: с помощью одномерного непараметрического датчика [12] или с помощью многомерного непараметрического датчика [11]. Установив элемент модели в режим редактирования, можно задать для него датчик нужного типа. Также в блоке настройки можно задавать следующие компоненты: вид распределения, параметры для распределения, ввод экспериментальной выборки и дополнительную информацию.

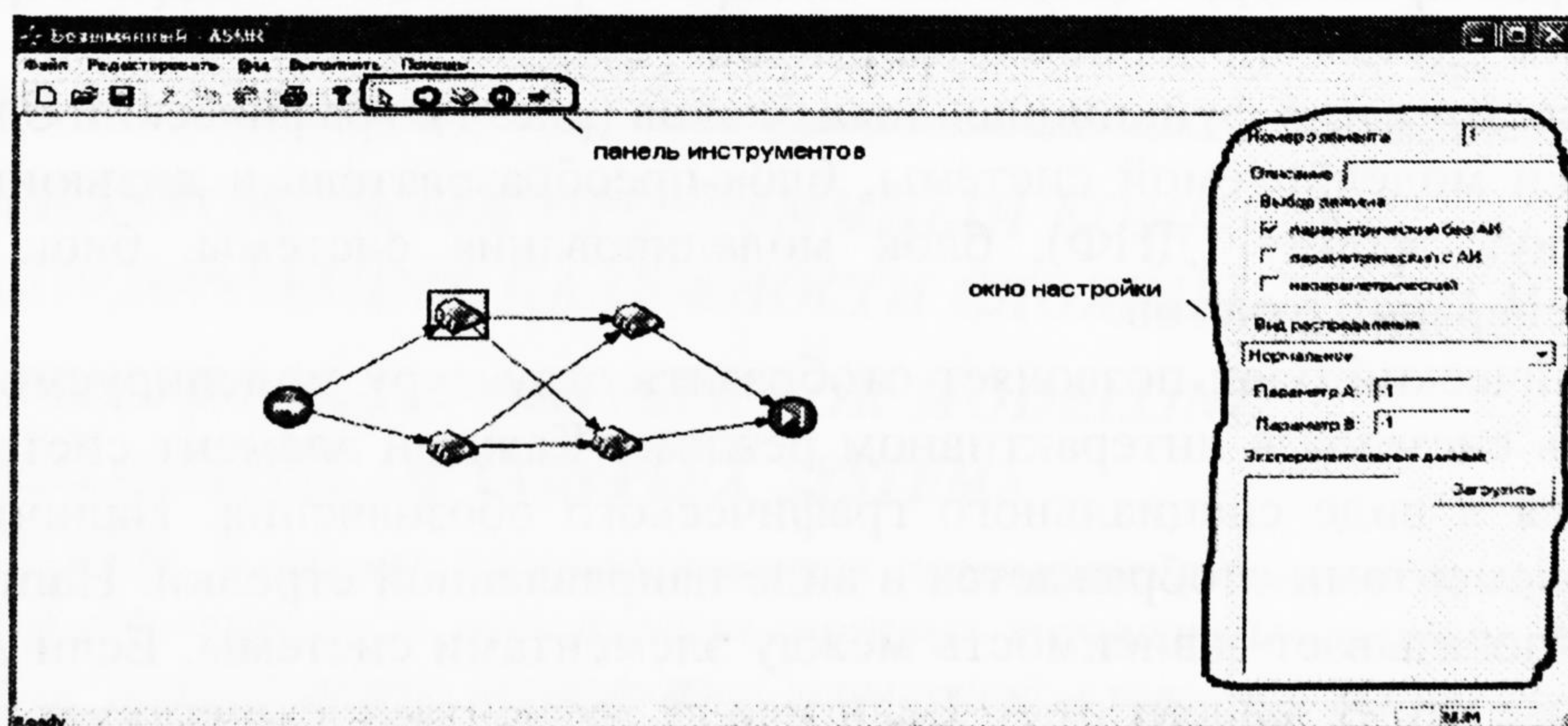


Рис. 2. Панель инструментов и окно блока настройки

Блок-преобразователь в ДНФ. На выходе блока-преобразователя получаем структуру моделируемой системы в виде параллельно-последовательных цепочек. Каждый элемент в последовательной цепочке связан конъюнкцией, а все последовательные цепочки — дизъюнкцией.

В блоке моделирования выполняется статистическое моделирование системы. Считается, что каждая последовательная цепочка работает столько, сколько работает ее минимальный элемент. Моделируемая система как целое будет работать столько, сколько будет работать самая максимальная цепочка. После  $N$  тактов моделирования получаем файл данных для блока анализа.

Блок анализа — центральный модуль ПК, рассчитывающий следующие показатели надежности: точечную и интервальную оценку средней наработки до отказа, дисперсию, медиану, моду, точечную и интервальную оценку гамма-процентной наработки до отказа, точечную и интервальную оценку вероятности безотказной работы. Модуль анализа также строит непараметрическую оценку плотности Розенבלата-Парзена всей системы в целом и каждой последовательной цепочки в отдельности. Это позволяет увидеть зависимость надежности системы от ее отдельных элементов. На основе последней оценки строится график, который позволяет определять элементы, надежность которых резко отличается от надежности остальных. Расчет непараметрической оценки плотности Розенבלата-Парзена осуществляется следующим образом:

$$F_n(x) = \frac{1}{n * H_n} \sum_{i=1}^n q\left(\frac{x - x_i}{H_n}\right) \quad (1)$$

где  $q$  — ядро функции Розенבלата-Парзена.

В зависимости от поставленной задачи используются различные ядра. В программном комплексе используется нормальное ядро:

$$q(u) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{1}{2}u^2}, \quad u = \frac{x - x_i}{H_n} \quad (2)$$

Параметр  $H_n$  вычисляется либо на основе информационного функционала [5], либо задается оператором.

Вычисление моды осуществляется на основе (1). Чаще всего построенная плотность не является унимодальной, поэтому при поиске моды необходимо найти все возможные решения (рис. 3). Алгоритм нахождения моды заключается в следующем:

1) интервал, на котором функция плотности отлична от нуля, разбивается на части  $t_1, \dots, t_n$  в соответствии с шагом (начальное значение для шага должно быть достаточным, чтобы найти все решения и чтобы скорость сходимости при этом была высокая);

2) последовательно рассматривается каждый  $t_i$ -интервал, в крайних точках вычисляется значение функции плотности;

3) в этих точках выполняется проверка на принадлежность к моде (антимоде), результаты запоминаются;

4) интервал  $t_i$  разбивается на части в соответствии с шагом, уменьшенным в  $k$  раз  $t_{i1}, \dots, t_{ik}$ ;

5) если проверка на существование моды (антимоды) на всех интервалах  $t_{ij}$  не дала результатов, то переходим к следующему  $t_i$ -интервалу;

6) если на интервале  $t_{ij}$  в крайних точках существует мода (антимода), то результаты сохраняются и выполняются п.п. 4 и 5;

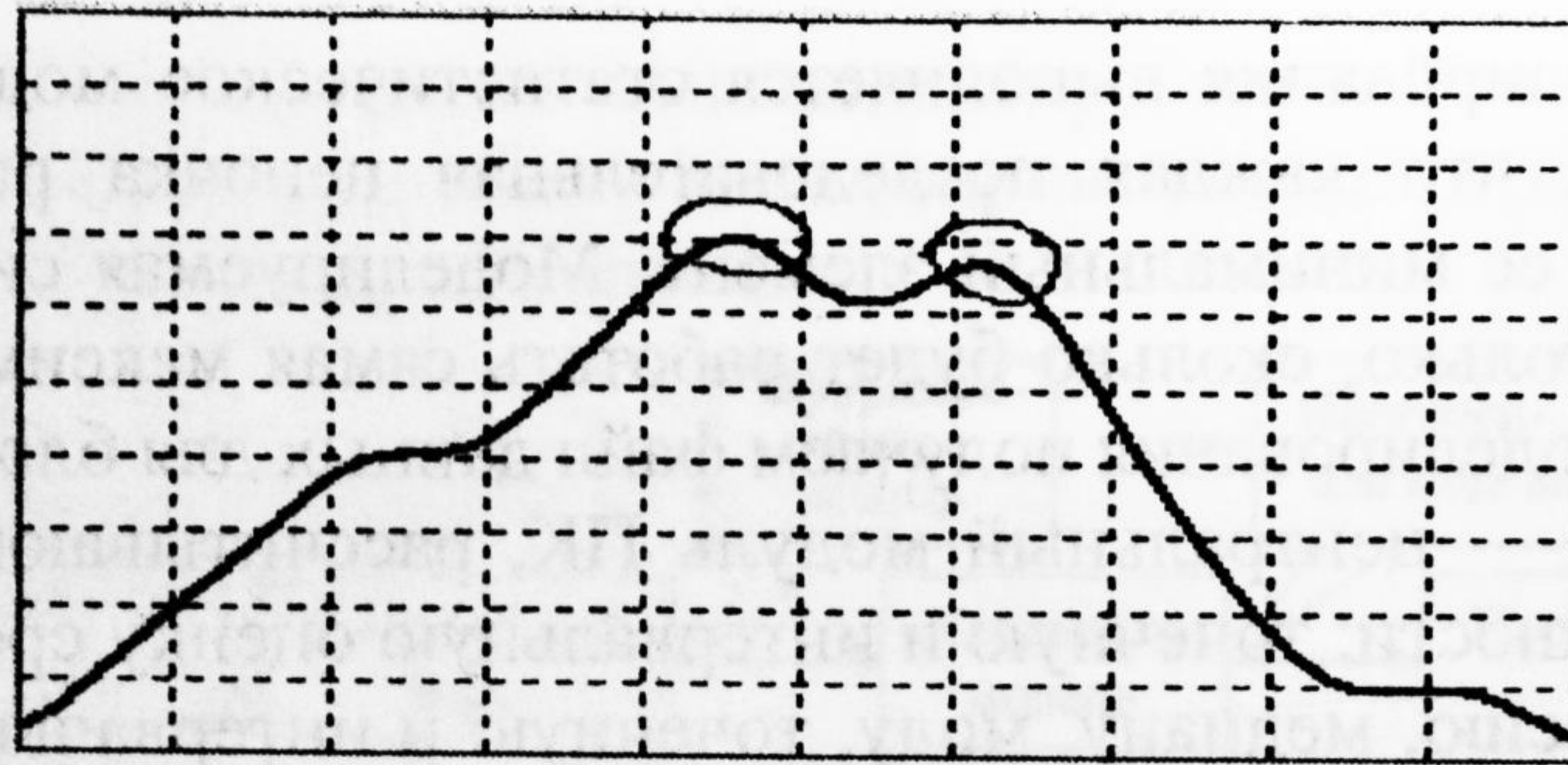


Рис. 3. Непараметрическая плотность исследуемой модели

Формулы для расчета точечных и интервальных оценок [9] приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Формулы для вычисления точечных оценок показателей безотказности непараметрическим методом

Показатель надежности	Точечная оценка	Примечание
Средняя наработка $T_{cp}$ до отказа	$\sum_{i=1}^r t_i * [\Delta F(t_i)] + [1 - F(t_r)] * z_n, t_0 = 0$	$z_n = \max(t_r, \tau_n)$ $\Delta F(t_i) = F(t_i) - F(t_{i-1})$
Гамма-процентная наработка $T_\gamma$ до отказа	$d_1 * t_i + (1 - d_1) * t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$	$F(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq F(t_i)$ $d_1 = \frac{1 - \gamma - F(t_{i-1})}{F(t_i) - F(t_{i-1})}$
Вероятность $P(t)$ безотказной работы	$d_2 * P(t_i) + (1 - d_2) * P(t_{i-1})$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$	$t_{i-1} \leq t \leq t_i, t \leq t_r$ $d_2 = \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$

Таблица 2

Формулы для вычисления интервальных оценок показателей безотказности непараметрическим методом

Показатель надежности	НДГ уровня q	ВДГ уровня q
Средняя наработка $T_{cp}$ до отказа	$\overline{T}_{cp} - u_q \sqrt{\frac{1}{r} * \sum_{i=1}^r \Delta F(t_i) * \sqrt{(t_i - \overline{T}_{cp})^2}}$	$\overline{T}_{cp} + u_q \sqrt{\frac{1}{r} * \sum_{i=1}^r \Delta F(t_i) * \sqrt{(t_i - \overline{T}_{cp})^2}}$
Гамма-процентная наработка $T_\gamma$ до отказа	$d'_1 * t_i + (1 - d'_1) * t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$ $\overline{F}(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq \overline{F}(t_i)$	$d''_1 * t_i + (1 - d''_1) * t_{i-1}$ $i = \overline{1, r}, t_0 = 0$ $\underline{F}(t_{i-1}) \leq 1 - \gamma \leq \underline{F}(t_i)$
Вероятность $P(t)$ безотказной работы	$d_2 * \underline{P}(t_i) + (1 - d_2) * \underline{P}(t_{i-1})$ $t_{i-1} \leq t \leq t_i$	$d_2 * \overline{P}(t_i) + (1 - d_2) * \overline{P}(t_{i-1})$ $t_{i-1} \leq t \leq t_i, t \leq t_r$

Значения  $d_1'$  и  $d_1''$  вычисляются по следующим формулам:

$$d_1' = \frac{1 - \gamma - \overline{F}(t_{i-1})}{\overline{F}(t_i) - \overline{F}(t_{i-1})} \quad (3)$$

$$d_1'' = \frac{1 - \gamma - \underline{F}(t_{i-1})}{\underline{F}(t_i) - \underline{F}(t_{i-1})} \quad (4)$$

Блок генерации отчетов позволяет сохранить в MS Word настройки каждого элемента исследуемой модели, результаты моделирования системы в каждой серии испытаний и, наконец, расчетные значения показателей надежности.

**Результаты моделирования.** Для проведения моделирования был подготовлен пример, исследующий надежность телекоммуникационной сети, приведенный на рис. 4. Результаты моделирования надежности системы с приведением графических и табличных данных показаны на рис. 5.

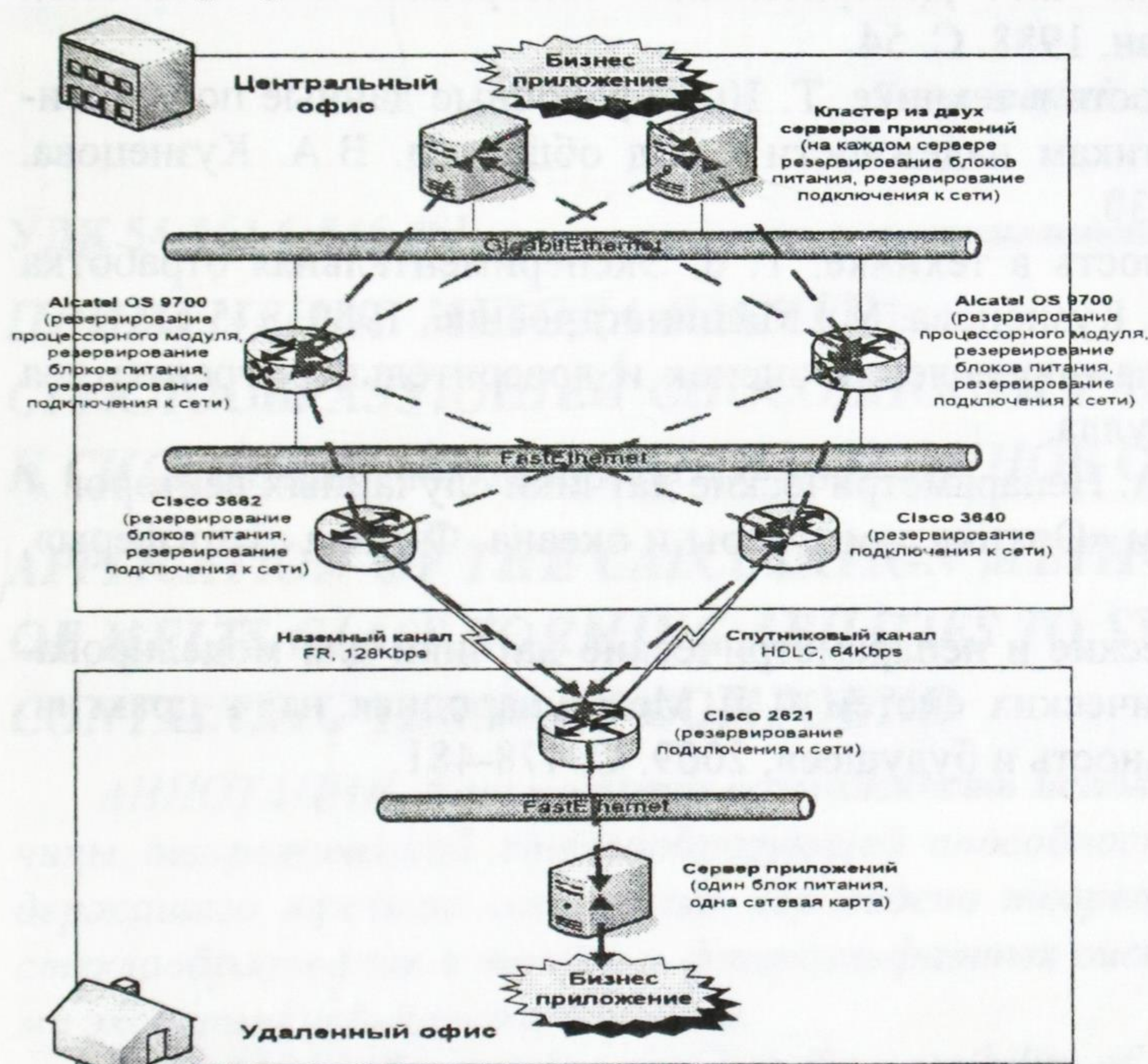


Рис. 4. Пример телекоммуникационной сети

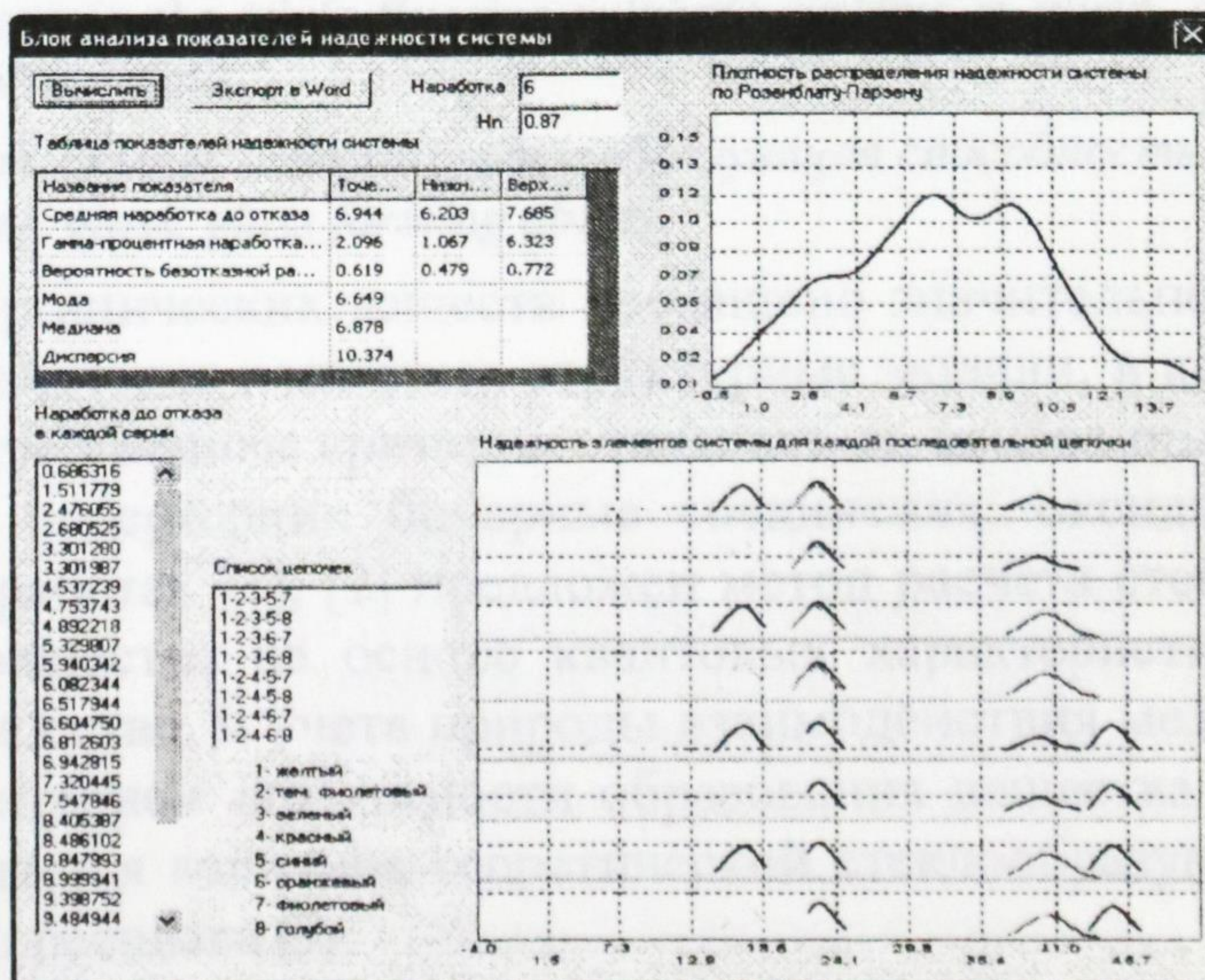


Рис. 5. Расчет надежности сети

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
2. Симахин В.А., Терещенко Е.Р. Непараметрические многомерные датчики случайных величин // Тез. докл. IV Всесоюзной конф. «Перспективы и опыт внедрения статистических методов в АСУ ТП», 1990. Ч. 1. С. 56-57.
3. Дмитриев Ю.Г., Устинов Ю.К. Статистическое оценивание распределений вероятностей с использованием дополнительной информации / Ю.Г. Дмитриев. Томск: ТГУ, 1988. 194 с.
4. Симахин В.А. Непараметрическая статистика. Ч. I. Теория оценок. Курган: КГУ, 2004. 216 с.
5. Симахин В.А. Указ. раб. Ч II. 162 с.
6. Шубинский И.Б. Топологический метод расчета надежности сложных систем // Надежность технических систем; Справочник / под ред. Ушакова И.А. М.: Радио и связь, 1985. С. 490-495.
7. Симахин В.А., Терещенко Е.Р. Доверительные интервалы для квантилей и функций распределения. Курган, 1988. С. 54.
8. Надежность и эффективность в технике. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / под общ. ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. С. 330.
9. Надежность и эффективность в технике. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания / под общ. ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1989. 375 с.
10. ГОСТ 11.007-75 Правила определения оценок и доверительных границ для параметров распределения Вейбулла.
11. Маер А.В., Симахин В.А. Непараметрические датчики случайных векторов // XVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 2009.
12. Маер А.В. Параметрические и непараметрические датчики для моделирования надежности сложных технических систем // II Международная науч.-практич. конф. «Молодежь и наука: реальность и будущее», 2009. С. 478-481.