

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Анализ надежности радиоэлектронных устройств методом моментов и методом Монте-Карло

© Кандырин Ю.В.

Цель работы

Целью работы является изучение методов анализа надежности узлов РЭС по постепенным отказам методом моментов и методом Монте-Карло. Лабораторная работа выполняется в компьютерном классе или индивидуально (при дистанционном обучении) в среде Windows XP с использованием обучающего программного обеспечения (ПО). *“Methodizer”*.*)

1. Домашнее задание

- 1.1. Изучить описание лабораторной работы и рекомендованную литературу.
- 1.2. Для заданного радиоэлектронного устройства (табл.1, табл.2) рассчитать вероятность безотказной работы $P(t)$ методом моментов, используя при этом справочные данные приведенные в Приложениях 2, 3, 4 и 5.
- 1.3. Продумать порядок выполнения лабораторной работы на компьютере и сформировать стратегию интерактивного изменения первичных параметров элементов, направленную на получение минимальных отклонений выходного параметра от требуемых значений по техническому заданию.
- 1.4. Проверить свою подготовку к выполнению работы по контрольным вопросам.

2. Лабораторное задание

- 2.1. Запустите приложение *“Methodizer”*
- 2.2. Выберите одну из предложенных схем радиоэлектронного устройства в соответствии с заданием преподавателя для вашей бригады.
- 2.3. Для этого радиоэлектронного устройства, введите или выберите из выпадающих списков в окне программы номиналы элементов схемы, определенные в исходных данных, условия окружающей среды и требуемое значение выходного параметра схемы с допусками, указанными в задании (Приложение 3).
- 2.4. В меню *Расчет* выберите команду *Параметры* и в появившемся окне установите необходимые параметры расчета.
- 2.5. Минимизируйте систематическую ошибку выходного параметра устройства, рассчитанную для каждого метода (рассчитанные величины отображаются в окне результатов расчета). Минимизация проводится изменением номиналов отдельных элементов схемы.

*) (Авторы программного продукта: руководитель разработки проф. Кандырин Ю.В., ответственный исполнитель студент Ильичев И.Ю.)

2.6. В меню *Схема* вызовите окно диалога *Свойства элементов* и по указанию преподавателя установите необходимый порог исключения из дальнейшего рассмотрения отдельных элементов схемы с наименьшими значениями коэффициентов влияния.

2.7. Изменяя номиналы элементов схемы, минимизируйте вероятность постепенного отказа. При изменении номиналов и типов элементов следует также учитывать влияние номинальной интенсивности внезапных отказов на конечный результат расчета полной вероятности отказа схемы.

2.8. Сравните результаты расчета для каждого метода с домашними расчетами.

2.9. Оцените результаты оценки согласованности выравнивания построенной гистограммы для метода Монте-Карло по критерию χ^2 и критерию Колмогорова. При необходимости измените число разрядов гистограммы и повторно проведите оценку согласованности. Сделайте выводы о соответствии теоретического и экспериментального распределений выходного параметра.

2.10. Рассчитанные величины занесите в отчет и сделайте выводы по проведенной работе в соответствии с п.4 настоящего пособия.

3. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- Результаты выполнения домашнего задания;
- Описание внесенных в схему изменений (записанную стратегию изменений параметров), предпринятых для минимизации систематической ошибки выходного параметра и обеспечения минимальной вероятности отказа радиоэлектронного устройства;
- Результаты расчета в компьютерном классе на ПЭВМ:
 - Характеристики распределения выходного параметра устройства;
 - оценки согласованности теоретического и экспериментального распределений по критерию χ^2 и критерию Колмогорова;
 - вероятности постепенного и внезапного (для заданного времени наработки) отказов;
 - полные вероятности отказов с учетом постепенных и внезапных отказов.
- Анализ полученных результатов и сравнение их с домашним расчетом;
- Сборник скриншотов окон по лабораторной работе;
- Развернутые выводы по проведенной работе.

4. Контрольные вопросы

- Что такое точность выходных параметров и как она связана с надежностью по постепенным отказам? От каких факторов зависит надежность РЭС?

- Что такое отказ и как он количественно описывается? Перечислите виды отказов РЭУ. Дайте графическую интерпретацию проблемы.
- Какие показатели надежности используются при количественной оценке надежности?
- Какие факторы определяют уровень надежности РЭУ по внезапным отказам?
- От чего зависит надежность РЭС по постепенным отказам?
- Какова цель метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и как он реализуется на ЭВМ? Перечислите известные Вам достоинства и недостатки этого метода.
- Какова потенциальная точность метода статистических испытаний?
- В чем цель и существо метода моментов? Перечислите известные Вам достоинства и недостатки этого метода?
- Какова потенциальная точность метода моментов и от чего она зависит?
- Какова причина необходимости оценки согласованности теоретического и экспериментального распределений выходного параметра?
- Какие методы оценки согласованности распределений Вам известны?
- В чем смысл и каково количественное описание критерия согласия Пирсона χ^2 ?
- В чем различие оценок согласованности гистограммы и гипотезы о виде теоретического распределения, полученных с помощью критерия Пирсона χ^2 и критерия Колмогорова?

Рекомендуемая литература

- 4.1. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств. – М., Радио и Связь, 1991. – 360 с.
- 4.2. Фролов А.Д. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М., Высшая школа, 1970. – 480 с.
- 4.3. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. – М., Энергия, 1977. – 536 с.
- 4.4. Сахаров Ю.С. Особенности проектирования высоконадежных радиоэлектронных устройств. – М., МЭИ, 1983. – 56 с.
- 4.5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480с.
- 4.6. Кандырин Ю.В., Покровский Ф.Н., Сазонова Л.Т. Основы конструирования и технологии РЭС. Электронный конспект лекций. 2012г. 20 п.л. Библиотека каф. ФОРС. Лаб. КИР.

Приложение 1.

П.1. Описание исследуемых схем РЭУ

- Двухкаскадный усилитель низкой частоты

Схема усилителя низкой частоты (УНЧ) приведена на Рис.П.1.

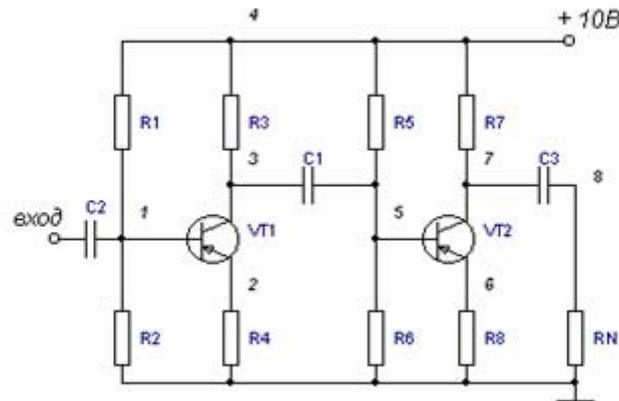


Рис. 1. Принципиальная схема УНЧ

В качестве выходного параметра рассматривается коэффициент усиления усилителя $K = K_1 \cdot K_2$, где K_1 и K_2 - коэффициенты усиления первого и второго каскадов усилителя НЧ.

При выполнении задания дома и в компьютерном классе используется следующая математическая модель усилительного каскада:

$$K_i = \frac{\beta_i R_{H_i}}{r_{\delta_i} + \beta_i (r_{\varepsilon_i} + R_{OC_i})}, i = \overline{1, 2},$$

где R_{H_i} - эквивалентное сопротивление нагрузки i -го каскада,

R_{OC_i} - сопротивление обратной связи i -го каскада,

$\beta_i = h_{21_{\beta_i}}$ - коэффициент передачи тока i -го транзистора в схеме с общим эмиттером,

$r_{\delta_i}, r_{\varepsilon_i}$ - параметры гибридной малосигнальной модели i -го транзистора по переменному току.

Для рассматриваемого УНЧ

$$R_{H_1} = R_3 \parallel R_5 \parallel R_6 \parallel r_{\varepsilon_2} \text{ (параллельное соединение)}$$

$r_{\varepsilon_2} = r_{\delta_2} + \beta_2 (r_{\varepsilon_2} + R_{OC_2})$ - входное сопротивление второго каскада.

$$R_{H_2} = R_7 \parallel R_N \cdot R_{OC_1} = R_4; R_{OC_2} = R_8.$$

В схеме по умолчанию применены следующие радиоэлементы:

- Транзисторы типа КТ315А, для которых в рабочих режимах $\beta_1 = \beta_2 = 56 \pm 20\%$;
 $r_{\beta_1} = r_{\beta_2} = 400\text{М} \pm 20\%$;
 $r_{\beta_1} = 400\text{М} \pm 20\%$;
 $r_{\beta_2} = 500\text{М} \pm 20\%$.
- Конденсаторы типа МБМ, 160В, $C_1 = C_2 = C_3 = 2\text{мкФ} \pm 20\%$
- Резисторы типа МЛТ-0.125:
 $R_1 = R_5 = 47\text{кОм} \pm 20\%$;
 $R_2 = R_6 = 5.1\text{кОм} \pm 20\%$;
 $R_N = 10\text{кОм} \pm 20\%$
 (сопротивления резисторов R_3, R_4, R_7, R_8 имеют допуски $\pm 10\%$.

□ Усилитель с автоматической регулировкой усиления

Схема усилителя с автоматической регулировкой усиления (АРУ) приведена на Рис.2.

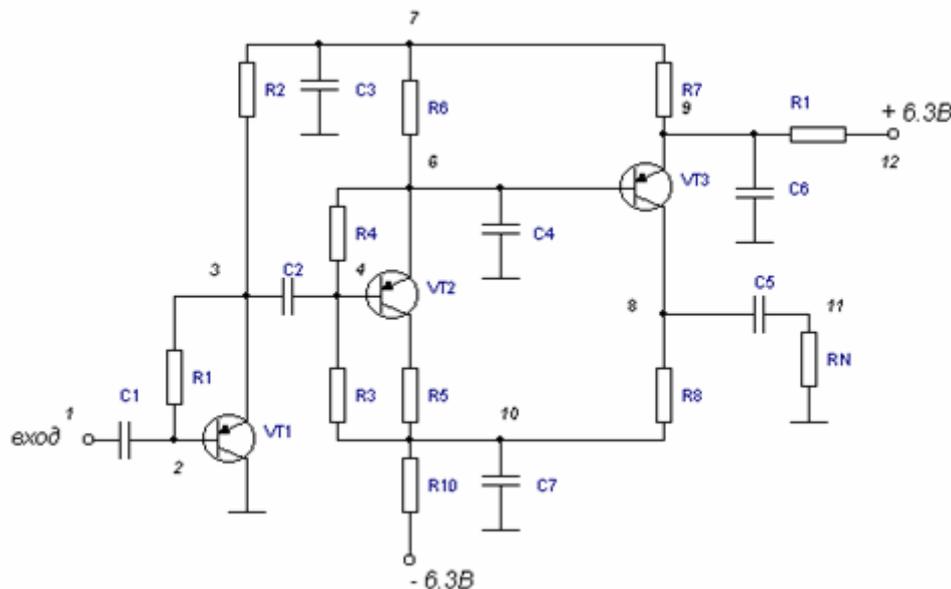


Рис.2. Принципиальная схема усилителя с АРУ

В качестве выходного параметра рассматривается коэффициент усиления усилителя. При выполнении задания дома и в классе используется полиномиальная математическая модель вида

$$K = 43 - 4.23R_2 + 4.7R_4 - 24.4R_5 - R_6 + 1.5R_2R_4 + \\ + 3.7R_2R_5 - 0.1R_2R_6 - 10R_4R_5 + 0.7R_4R_6 + 0.67R_5R_6'$$

где сопротивления R_2, R_4, R_5, R_6 в кОм.

В схеме по умолчанию применены следующие радиоэлементы:

Транзисторы типа КТ315А.

- Конденсаторы типа МБМ, 160В,
 $C_1 = C_2 = C_3 = C_5 = C_6 = C_7 = 0.47 \text{ мкФ} \pm 20\%$;
 $C_4 = 150 \text{ нФ} \pm 20\%$
- Резисторы типа МЛТ-0.125:
 $R_1 = 100 \text{ кОм} \pm 20\%$;
 $R_3 = 22 \text{ кОм} \pm 20\%$;
 $R_7 = R_9 = R_{10} = 100 \text{ Ом} \pm 20\%$;
 $R_8 = 1 \text{ кОм} \pm 20\%$;
 $R_N = 10 \text{ кОм} \pm 20\%$.

(сопротивления резисторов R_3, R_4, R_7, R_8 имеют допуски $\pm 10\%$).

Приложение 2

Исходные данные для домашнего расчета

В ходе лабораторной работы бригады 1, 3, 5, 7 изучают двухкаскадный усилитель низких частот, бригады 2, 4, 6, 8 изучают усилитель с АРУ.

Данные для выполнения домашнего задания и задания в классе сведены в таблицы – Таблица 1 соответствует заданию первой группы бригад, Таблица 2 – второй группы.

Таблица П.1а

Данные для выполнения домашнего задания для бригад 1, 3, 5, 7

№ бригады	R3, кОм	R4, кОм	R7, кОм	R8, Ом	Время наработки, час	T, °C	К _к □□□
1	2.7	100	3.0	120	3000	75	145□12%
3	2.4	120	2.7	180	2500	60	85□10%
5	2.2	150	2.4	200	2000	70	58□8%
7	2.0	200	2.4	240	1500	65	38□10%

Таблица П.1б

Данные для выполнения домашнего задания для бригад 2, 4, 6, 8

№ бригады	R2, кОм	R4, кОм	R5, Ом	R6, кОм	Время наработки, час	T, °C	К _к □□□
2	2.7	10	390	5.1	1500	75	110□10%
4	2.2	8.2	470	4.3	2500	65	70□8%
6	2.4	10	360	5.6	3000	55	100□12%
8	3.3	12	300	6.3	2000	60	140□10%

При проведении расчета первичные параметры считать распределенными по нормальному закону.

Приложение 3

Основные предпосылки проведения расчетов

Под надежностью, как правило, понимают способность системы работать исправно (сохранять свои параметры в пределах заданных допусков) в течение заданного промежутка времени.

Одна из основных характеристик надежности – вероятность безотказной работы. Вероятность безотказной работы РЭУ в течение периода эксплуатации t определяется как $P_{РЭУ}(t) = P_{пост}(t) \cdot P_{вн}(t)$, (1)

где $P_{пост}(t)$ - вероятность отсутствия постепенных отказов;

$P_{вн}(t)$ - вероятность отсутствия внезапных отказов.

Постепенный отказ РЭУ представляет собой выход некоторого параметра y за пределы диапазона работоспособности, устанавливаемые технической документацией или заданием. Таким образом, вероятность отсутствия постепенных отказов оценивается как $P_{пост}(t) = P(y_n \leq y \leq y_g)$, (2)

где y_n и y_g - нижняя и верхняя границы диапазона работоспособности РЭУ.

Выходной параметр y может рассматриваться как случайная величина со своим законом распределения и его числовыми характеристиками – моментами.

Погрешность выходного параметра есть композиция систематической и случайной составляющих: $\Delta y = \Delta y_{сист} + \Delta y_{сл}$. Математическое ожидание выходного параметра можно представить как сумму номинального значения параметра и его систематической ошибки: $m_y = y_{ном} + \Delta y_{сист}$, так как систематическая величина детерминирована. Систематическая погрешность выходного параметра – следствие влияния систематических погрешностей первичных параметров, а случайная погрешность – соответственно случайных погрешностей первичных параметров.

Основные источники систематических погрешностей первичных параметров:

- Отличие расчетного значения первичного параметра от значений, предусмотренных шкалой номиналов;
- Тепловое воздействие;
- Старение элемента.

Основные источники случайных погрешностей первичных параметров:

- Технологический (производственный разброс) – допуск на значения параметра;
- Тепловое воздействие, если температурный коэффициент данного параметра имеет случайную составляющую;
- Старение, если коэффициент старения имеет случайный разброс.

В часто встречающихся ситуациях (но не повсеместно) y – величина распределенная нормально. Это легко объяснить тем, что число первичных параметров, влияющих на выходной параметр РЭУ, достаточно велико (следствие Центральной Предельной теоремы). В этом случае случайная составляющая погрешности выходного параметра может быть представлена как $\Delta y_{сл} = 3\sigma_y$, где σ_y - с.к.о – параметр нормального закона распределения:

$$w(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(y - m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\}.$$

Вероятность постепенного отказа для этого закона легко рассчитать как

$$P_{пост}(t) = P(y_n \leq y \leq y_с) = \Phi\left(\frac{y_с - m_y}{\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{m_y - y_n}{\sigma_y}\right),$$

$\Phi(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^c \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ - функция Лапласа, значение легко найти численным интегрированием или, в крайнем случае, по таблицам.

Вероятность отсутствия внезапных отказов определяется как $P_{вн}(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$,

(3)

где $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ - интенсивность отказов РЭУ, складывающихся из интенсивностей отказов каждого элемента λ_i . Значения интенсивностей отказов отдельных элементов РЭУ определяются по справочным данным: $\lambda_i = \lambda_{i0} \cdot \prod_{j=1}^m K_j$,

где λ_{i0} - значение интенсивности отказов элемента в номинальных условиях эксплуатации;

$K_j, j = \overline{1, m}$ - поправочные коэффициенты позволяющие учитывать реальные режимы работы элементов.

Для транзисторов $\lambda_i = \lambda_{i0} \cdot K_1 \cdot K_5$,

где K_1 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние электрической нагрузки и температуры окружающей среды;

K_5 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние условий эксплуатации.

Для резисторов $\lambda_i = \lambda_{i_0} \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot K_5$,

где K_1 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние электрической нагрузки и температуры окружающей среды;

K_3 - поправочный коэффициент, зависящий от номинального значения сопротивления резистора;

K_5 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние условий эксплуатации.

Для конденсаторов $\lambda_i = \lambda_{i_0} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_4 \cdot K_5$,

где K_1 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние электрической нагрузки и температуры окружающей среды;

K_2 - поправочный коэффициент, учитывающий номинальную емкость конденсатора;

K_4 - поправочный коэффициент, зависящий от номинального напряжения конденсатора;

K_5 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние условий эксплуатации.

Определение закона распределения выходного параметра может быть проведено различными методами, два из них рассмотрены ниже.

□ *Метод моментов*

Суть метода: поиск характеристик закона распределения выходного параметра – моментов по известным моментам первичных параметров.

Запишем выражение для ошибки выходного параметра, рассчитанной методом моментов, с учетом систематической и случайной составляющих:

$$\alpha y = \underbrace{\sum_{i=1}^m K_{\theta_i} \cdot \alpha x_{i_{\text{сист}}}}_{\text{систематическая составляющая}} \pm \underbrace{\sqrt{\sum_{j=1}^n K_{\theta_j}^2 \cdot K_{\phi_j}^2 \cdot \alpha x_{i_{\text{сл}}}^2}}_{\text{случайная составляющая}},$$

где $K_{\theta_i} = \left. \frac{\partial y}{\partial x_{i(j)}} \right|_{x_{i(j)}=x_{i(j)_0}} \cdot \frac{x_{i(j)_0}}{y}$ - относительный коэффициент влияния i -го

(j -го) первичного параметра;

$\alpha x_{i(j)_{\text{сист}}}$ - систематическая ошибка первичного параметра;

K_{ϕ_j} - коэффициент формы закона распределения первичного параметра;

$\alpha x_{i_{\text{сл}}}$ - случайная ошибка первичного параметра.

Приведенное соотношение учитывает, что некоторые параметры могут не иметь систематической или случайной составляющей.

Расчеты можно значительно упростить, если учитывать только те, первичные параметры, коэффициент влияния которых выше некоторого заданного порога.

Достоинство метода – простота расчета. Однако точность метода невысока, если РЭУ имеет нелинейный характер.

□ **Метод Монте-Карло (метод статистических испытаний)**

Суть метода: статистическое моделирование законов распределения первичных параметров, расчет и анализ закона распределения выходного параметра на основании статистического эксперимента.

Для выходного параметра строится гистограмма – эквивалент функциональной зависимости плотности вероятности. Число интервалов разбиения гистограммы (разрядов) выбирается исходя из требования наличия в каждом разряде не менее 5-10 наблюдений.

Расчет вероятности постепенного отказа или безотказной работы желательно при этом проводить по зависимости закона распределения выходного параметра, полученной выравниванием гистограммы. Выравнивание гистограммы проводят, выбрав в качестве моментов теоретического распределения статистические оценки тех же величин. Как бы хорошо ни была подобрана теоретическая кривая, между ней и статистическим распределением неизбежны некоторые расхождения. Естественно возникает вопрос: объясняются ли эти расхождения только случайными обстоятельствами, связанными с ограниченным числом наблюдений, или они являются существенными и связаны с тем, что подобранная кривая плохо выравнивает данное статистическое распределение. Для ответа на такой вопрос служат критерии согласия

Критерий согласия χ^2 (хи-квадрат) и критерий Колмогорова рассмотрены подробно в [5.5].

Решение задачи оценки согласия не следует недооценивать, т.к. результаты, полученные в результате принятия заведомо неправдоподобной гипотезы, скорее всего, окажутся неверны.

Приложение 4

Описание программного обеспечения

Программное обеспечение лабораторной работы представлено приложением *Methodizer*. Внешний вид главного окна приложения представлен на Рис.П.3.

При запуске приложения  мастер предлагает выбрать одну из двух схем РЭУ (Рис.П.4).

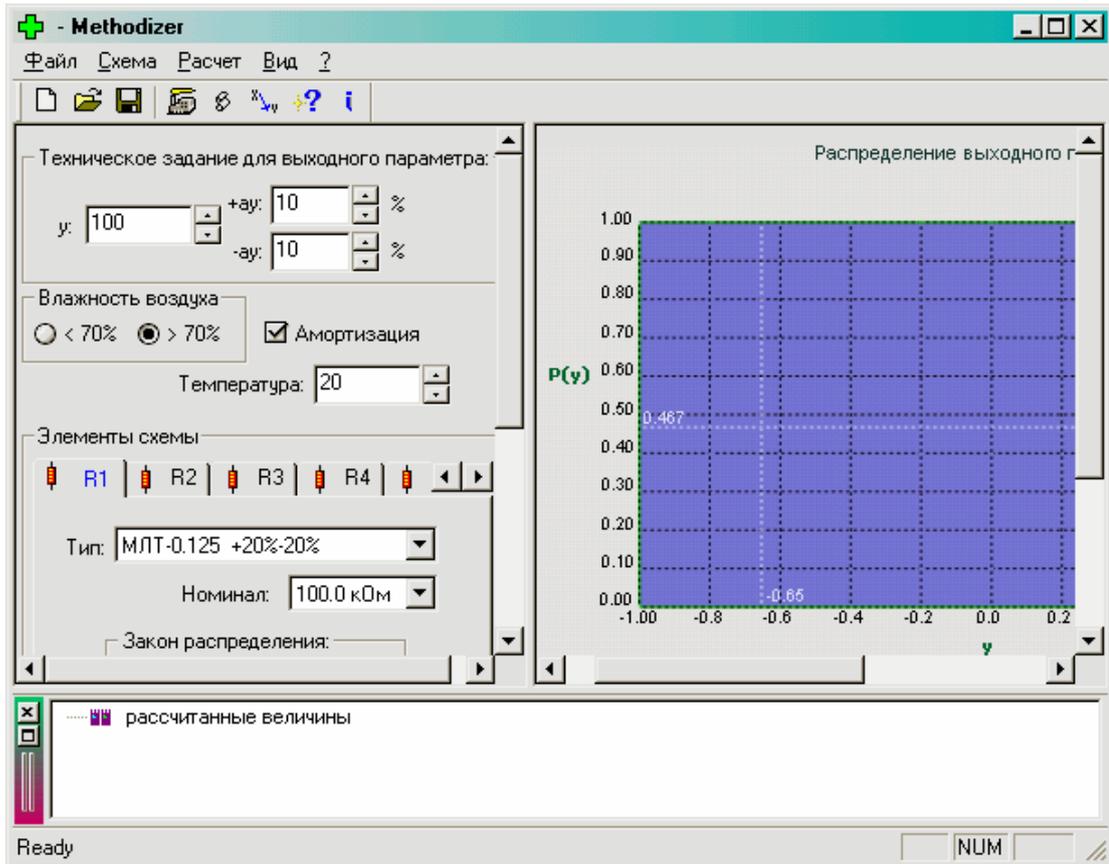


Рис. П.3. Внешний вид главного окна приложения *Methodizer*

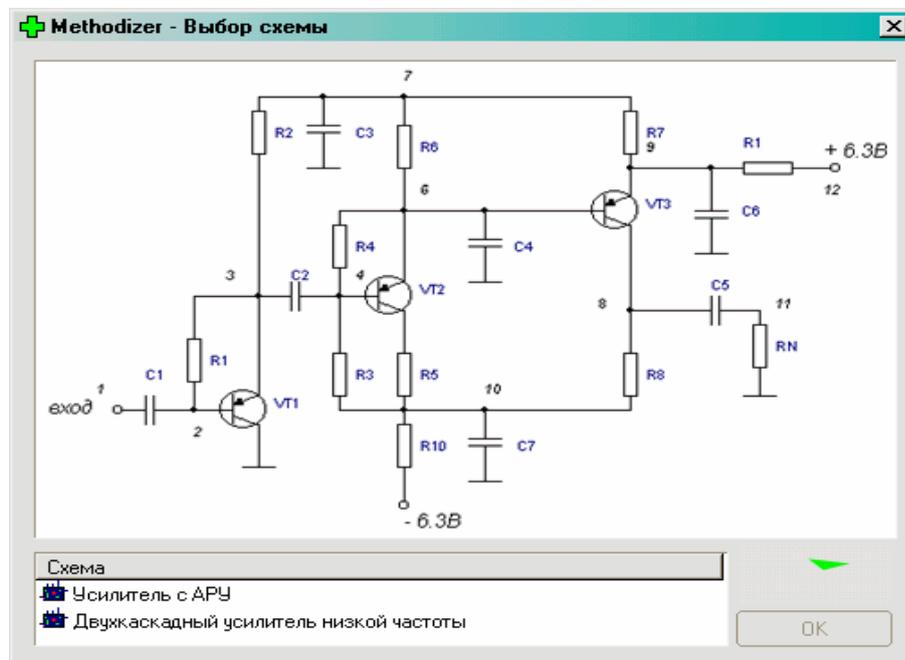


Рис. П.4. Мастер выбора схемы РЭУ

Левая панель главного окна позволяет выбрать номиналы элементов схемы, задать условия эксплуатации РЭУ и техническое задание для выходного параметра РЭУ (Рис.П.5).

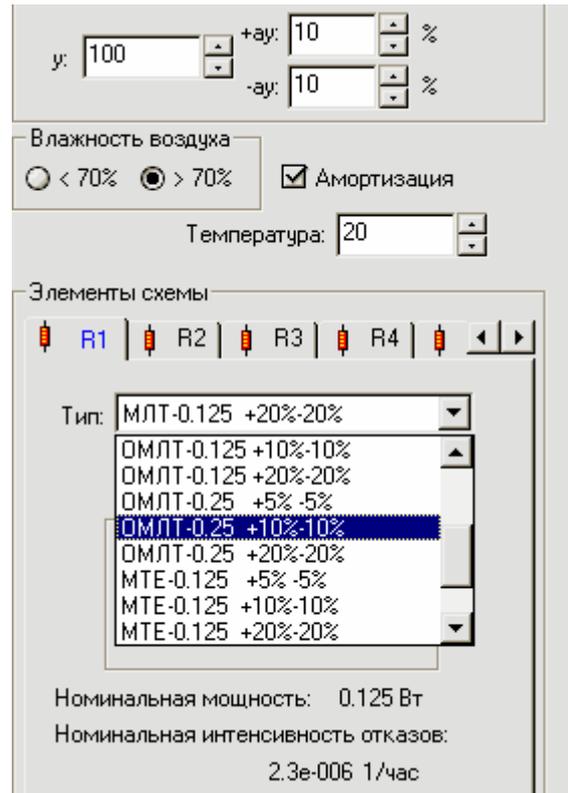


Рис. П.5. Выбор номиналов элементов и определение условий эксплуатации

Окно *Параметры расчета* (Рис. П.6) позволяет включить или исключить из расчета отдельные методы и функции.

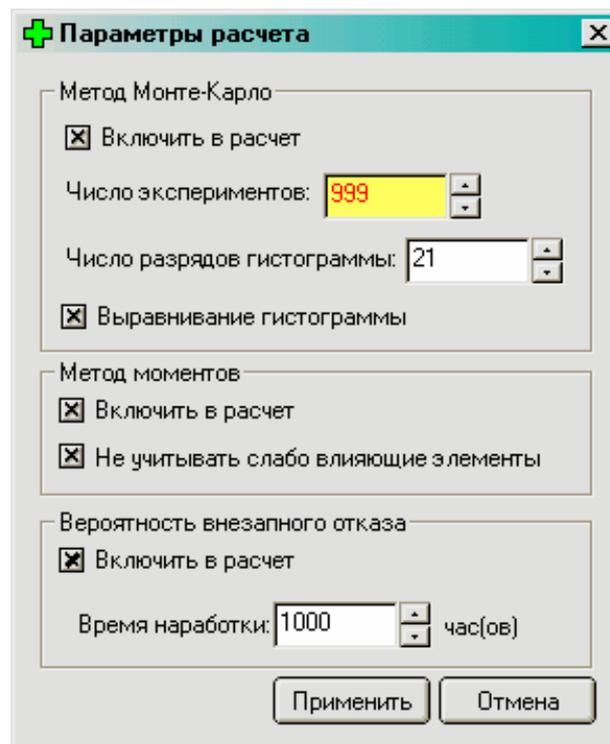


Рис. П.6. Окно параметров расчета

Расчет проводится исходя из заданных параметров в процессе моделирования с динамическим изменением первичных параметров. Расчет включает анализ схемы РЭУ также по постоянному току, причем каждый из пассивных элементов схемы включается в худших условиях для определенного случая отказа активных элементов. Это позволяет считать отказы независимыми. Таким образом, определяется верхняя граница интенсивности отказов. Такой подход представляется наиболее верным. Интенсивности отказов и коэффициенты влияния отдельных элементов схемы можно просмотреть в окне *Свойства элементов* (меню *Схема* Рис. П.7).

Элемент схемы	Коэффициент влияния	Коэффициент влияния
R1	0.00	4.15e-015
R2	0.30	0.00e+000
R3	0.00	0.00e+000
R4	0.80	0.00e+000
R5	-0.41	0.00e+000
R6	0.44	0.00e+000
R7	0.00	0.00e+000
R8	0.00	0.00e+000
R9	0.00	0.00e+000
R10	0.00	0.00e+000
RN	0.00	0.00e+000
C1	0.00	0.00e+000

Порог исключения элемента: 0.01

OK

Рис. П.7. Окно *Свойства элементов*

В окне *Свойства элементов* можно задать порог исключения элемента (точнее соответствующего ему первичного параметра) из рассмотрения при расчете методом моментов (для этого должна быть включена соответствующая опция в окне *Параметры расчета*). Результаты расчета графически отображаются на правой панели главного окна (Рис. П.8). Рассчитанные величины отображаются в окне *Результаты расчета* (Рис.П.9).

В окне П.9 отображаются все полученные результаты с помощью метода статистических испытаний и метода моментов.

Полученные данные позволяют провести количественное сравнение характеристик проведения математического моделирования оценок точностных и надежностных характеристик.

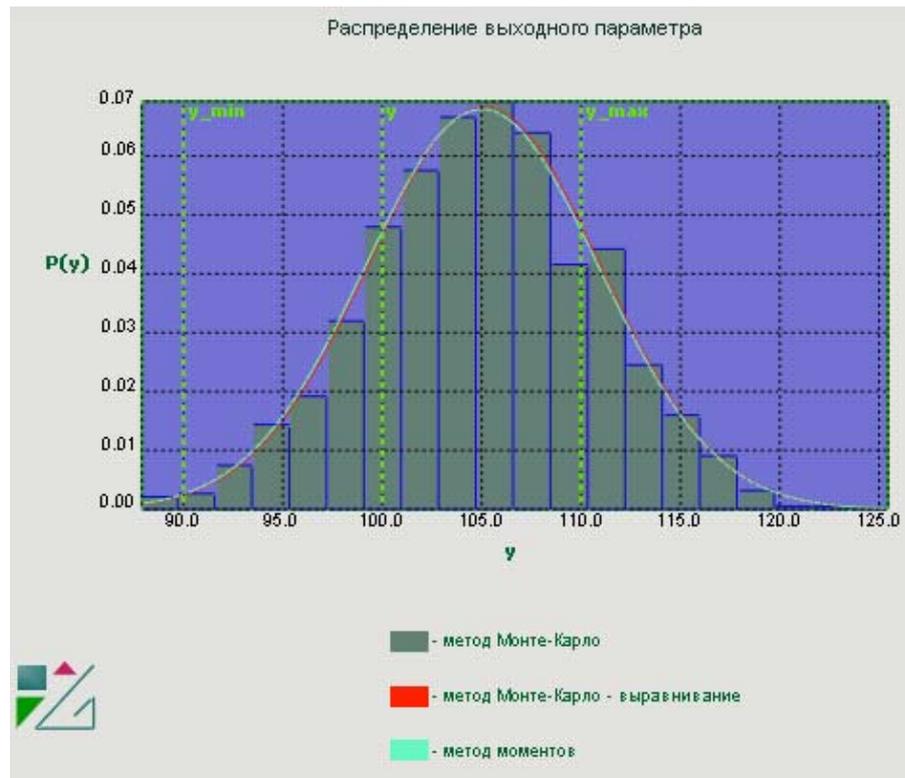


Рис. П.8. Гистограмма распределения выходного параметра

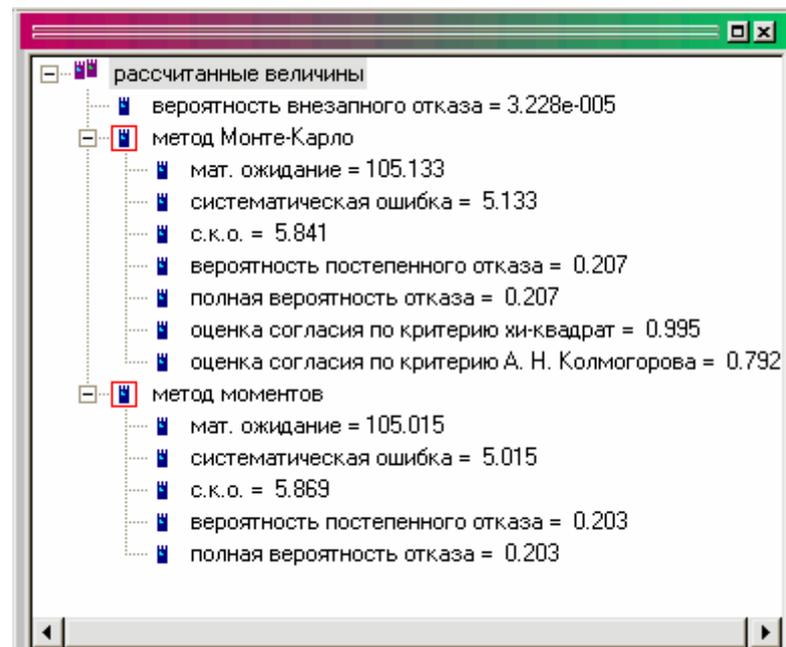


Рис.П.9. Окно результаты расчета

Приложение *Methodizer* позволяет сохранить результаты расчета в файл. Таким образом, результаты расчета в классе могут быть использованы при оформлении отчета дома (после обязательного согласования с преподавателем). Рекомендуется к расчету приложить скриншоты окон выполнения работы.