

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС И АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ЯЭУ

Н.В. Шукин, А.А. Семенов, С.М. Гололобов

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

Введение

Целью значительного количества нейтронно-физических расчетов является обоснование безопасности ядерной энергетической установки, а также анализ надежности установки в аварийных ситуациях.

Для повышения надёжности, эффективности моделирования РУ и проведения аттестации необходимо производить оценку погрешностей рассчитываемых нейтронно-физических параметров и динамических характеристик, а также анализ влияния неопределенностей некоторых параметров на надежность установки при протекании аварийных процессов.

Была разработана методика оценки неопределенностей рассчитываемых нейтронно-физических параметров и анализа надежности ЯЭУ. Методика также содержит алгоритм для анализа влияния неопределенностей некоторых параметров на надежность установки при протекании аварийных процессов, в том числе при протекании маловероятных аварийных процессов. Данное средство также может повысить качество результатов аттестации и упростить процесс аттестации программных средств.

1. Анализ надежности ЯЭУ и оценки неопределенностей расчетных параметров безопасности АЭС.

Обобщая опыт проведения работ по обоснованию безопасности (и другие), можно выделить следующие этапы моделирования различных процессов и режимов эксплуатации ЯЭУ с целью анализа надежности:

1. создаётся математическая модель установки, достаточная для описания определенного процесса;
2. для математической модели создается сценарий протекания аварийного процесса;
3. выделяются переменные, погрешности которых существенны для исследуемого процесса;
4. определяются критерии надежности (выделяются выходные параметры, при превышении критических значений которых происходит отказ установки, и задаются их предельных значений);
5. проводится многократное моделирование аварийного процесса;
6. по результатам моделирования получаются функционалы, характеризующие надежность установки в данном режиме при наличии неопределенностей во входных параметрах. В итоге делаются выводы о надежности установки при протекании выбранного процесса.

На Рисунке 1.1 представлены два подхода к анализу надежности. Традиционные алгоритмы оценки функционалов, характеризующих безотказную работу ЯЭУ, состоят из 4 этапов и включают в себя оценку распределения выходных параметров $\vec{\rho}_y$, где \vec{y} – вектор выходных рассчитываемых параметров. Вместо этого будем использовать упрощенный подход, основанный на семействе RM-алгоритмов, в котором исключена оценка плотности

распределения выходных параметров. Данный подход продемонстрирован на Рисунке 1.1. Это позволяет значительно упростить получение оценок функционалов, важных с точки зрения проектирования и обоснования безопасности ЯЭУ.

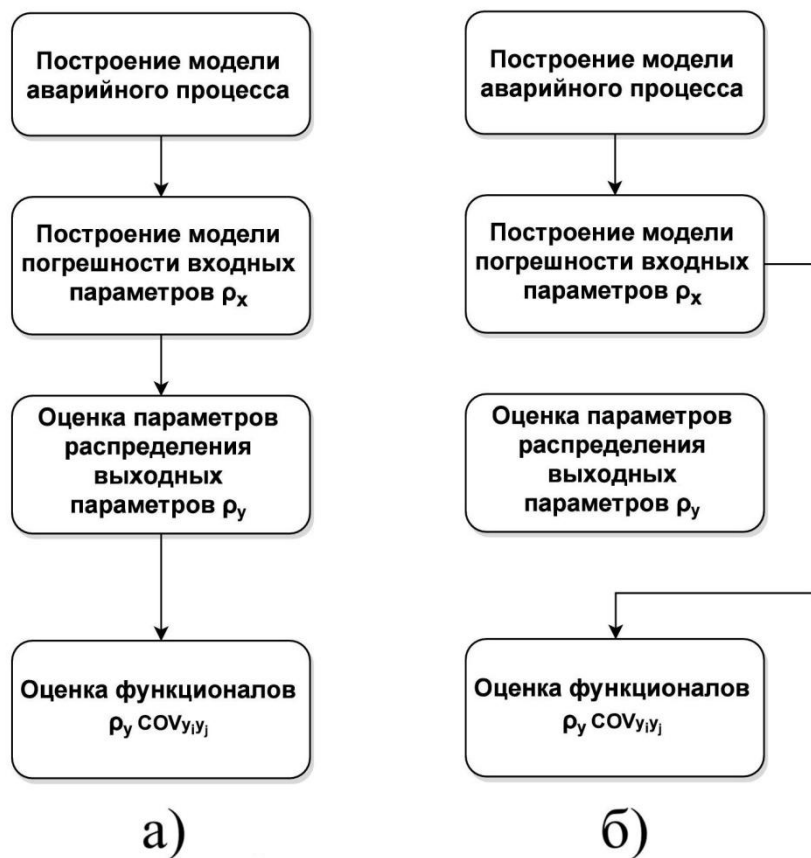


Рисунок 1.1. Традиционный а) и предлагаемый б) алгоритмы оценки функционалов выходных параметров нейтронно-физических расчетов.

Сегодня задачи анализа надежности решаются в основном чрезвычайно трудоемким методом прямого расчета Monte Carlo Sampling (MCS). К тому же методом Монте-Карло нельзя получить адекватную оценку вероятностей близких к нулю. Нарушение критериев безопасности при протекании аварийного процесса в реакторной установке - маловероятное событие. Так же на сегодняшний день в области реакторных расчетов широко применяется (как в России, так и в других странах) метод GRS [1], [2]. Но метод GRS также не может давать достоверные результаты при рассмотрении маловероятных событий.

Предлагаемый в статье алгоритм Ray Tracing Reliability Method (RTRM) основан на активно развивающихся аппроксимационных методах First Order Reliability Method и Second Order Reliability Method (FORM/SORM) [3]. Алгоритм позволяет получать функционалы, характеризующие надежность установки, и в то же время не имеет такой проблемы с трудоемкостью как метод Монте-Карло и способен оценивать вероятности близкие к нулю.

В FORM/SORM и RTRM лежит аппроксимация предельной поверхности Γ в пространстве W (фазовое пространство входных параметров \vec{w}), распределенных нормально с нулевым матожиданием, гиперплоскостью или поверхностью второго порядка. Эта идея проиллюстрирована на Рисунке 1.2. Область Ω – область нормальной эксплуатации, Γ – область отказов.

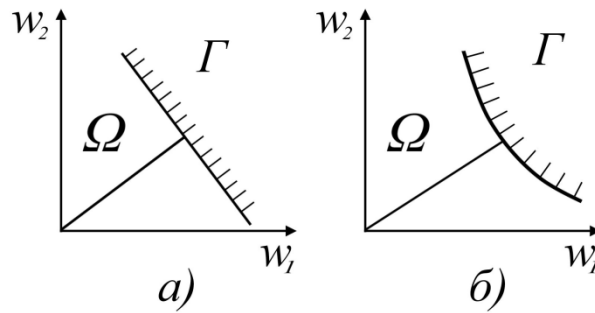


Рисунок 1.2. Иллюстрация методов FORM и SORM. а) – аппроксимация плоскостью; б) – поверхностью второго порядка.

2. Постановка задачи

Далее будем придерживаться следующих обозначений:

\vec{x} – входные данные, погрешности которых наиболее значимы в данном процессе (например, расход теплоносителя через активную зону, геометрические параметры элементов активной зоны, обогащение топлива, макросечения нейтронных реакций);

\vec{y} – результаты расчета (выходные данные) – параметры, определяющие конструкционную целостность активной зоны (например, минимальный запас до кризиса теплообмена в активной зоне, максимальная температура топлива и оболочки);

\vec{y}_{krit} – предельные значения выходных данных;

\vec{p} – параметры модели;

$\vec{y} = A(\vec{p}, \vec{x})$ – модель протекания аварийного процесса – совокупность математической модели реактора и сценария воспроизведения процесса;

ρ_x – модель погрешности входных данных;

ρ_y – модель погрешности выходных данных.

Предположим, что ЯЭУ может находиться в двух состояниях:

$\forall i: y_i < y_i^{\text{krit}}$ — установка в исправном состоянии;

$\exists i: y_i \geq y_i^{\text{krit}}$ — установка в состоянии отказа.

В статье предлагается универсальный алгоритм RTRM оценки неопределенностей результатов расчетов по ПС и оценки функционалов, характеризующих надежность установки при протекании различных аварийных процессов и при наличии неопределенностей в параметрах оборудования ЯЭУ. Алгоритм не имеет проблем с эффективностью в отличие от MCS. RTRM дает надежные результаты при рассмотрении маловероятных событий.

3. Описание алгоритма

Предположим, что входные параметры \vec{x} нормально распределены с нулевым математическим ожиданием. В предположении отсутствия частичных отказов вероятность отказа может быть вычислена по формуле:

$$P = \int_{\Gamma} \rho(\vec{x}) d\vec{x}, \quad (1)$$

где: Γ – область фазового пространства входных параметров, в которой установка будет находиться в состоянии отказа.

Предлагаемый алгоритм Ray Tracing Reliability Method (RTRM) состоит из следующих этапов:

1. выбрать случайное направление (луч) \vec{e}_i в фазовом пространстве E_x .

Плотности распределения относительных отклонений входных параметров:

$$\vec{\delta x} = (\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n)$$

где n – размерность фазового пространства E_x .

Математическое ожидание каждого компонента вектора $\vec{\delta x}$, и дисперсии входных параметров:

$$\vec{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n),$$

$$m_i = 0, \forall i;$$

$$\vec{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n),$$

$$\sigma_i \neq 0, \forall i.$$

2. Пользуясь математической моделью процесса найти критическое значение радиус вектора \vec{r}_i , т.е. такую точку в фазовом пространстве входных параметров, которая принадлежит построенному лучу и в которой система переходит в состояние отказа. Таким образом, задача поиска границы области отказа в фазовом пространстве входных параметров любой размерностью сводится к одномерной задаче поиска точки отказа в определенном направлении фазового пространства.

Критерий нарушения работоспособности установки:

$$\exists i, r_{\text{crit}}: f_i(r_{\text{crit}}) = 0;$$

где: r_{crit} – критическое значение радиус-вектора по выбранному направлению; f_i – запас i -ому критерию безопасности;

Поиск точки отказа на выбранном направлении проводится методом Брента [4]. Метод Брента – наиболее часто используемый метод поиска решения одномерного уравнения.

3. Уточнить значение искомой вероятности по формуле (1).

4. Повторяем процесс с другими направлениями. По достижении необходимой точности выходим из итерационного процесса.

В результате находим область, в которой происходят отказы РУ при протекании аварийного процесса. Для большего понимания рассмотрим задачу с двумя входными параметрами. На Рисунке 3.1 представлено совместное распределение отклонения входных параметров в задаче с двумя независимыми нормально распределенными параметрами на входе. На Рисунке 3.2 представлен пример результата набора решений по разным направлениям в задаче с двумя независимыми нормально распределенными параметрами на входе. Затененной областью изображено то множество входных параметров, при которых происходит отказ РУ. Граница изображена в виде ломанной, поскольку отказ может

возникнуть по причине нарушения различных критериев безопасности. Концентрическими окружностями изображена плотность распределения входных параметров. Искомая вероятность отказа - это интеграл этой функции по затененной области.

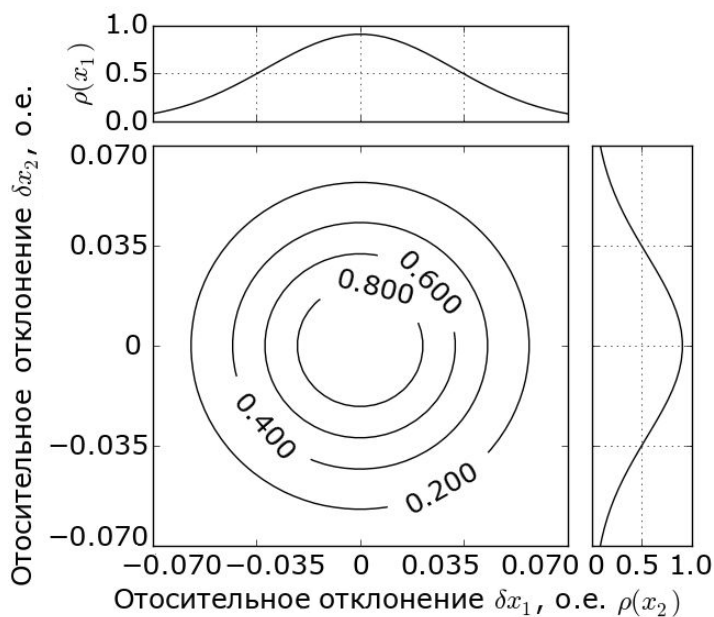


Рисунок 3.1. Модель неопределенности входных параметров.

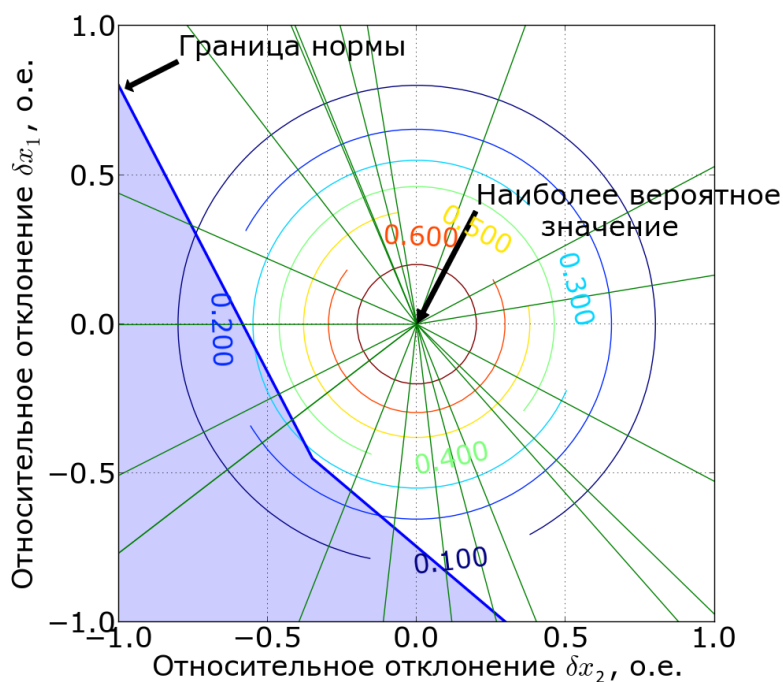


Рисунок 3.2. Пример результата набора решений по разным направлениям в задаче с двумя независимыми нормально распределенными параметрами на входе.

Данная методика позволяет не только рассчитать вероятность отказа, но и оценить доли вероятностей отказов, вызываемых разными причинами. Кроме того, при определении области безотказной работы могут быть определены производные по параметрам положения границы области безотказной работы.

4. Апробация алгоритма на задаче «самохода стержня ОР СУЗ»

Рассмотрим пример работы алгоритма на процессе самохода одного кластера стержней СУЗ (далее - стержень СУЗ) вверх с рабочей скоростью.

В качестве математической модели используется верифицированный программный комплекс <<ПРОСТОР>>.

Модель пространственной нейтронной кинетики в составе программного комплекса «ПРОСТОР» предназначена для расчета трёхмерного распределения нейтронного поля в рамках двухгруппового диффузионного приближения нестационарного уравнения переноса нейтронов и функционалов на его основе. Расчет проводится в замкнутой трехмерной области, образованной набором однородных прямоугольных или гексагональных призм (элементарных расчетных ячеек или нодов). В ПК используется нелинейная итерационная процедура расчета потока нейтронов в объеме всей активной зоны. Модель использует библиотеку двухгрупповых нейтронно-физических сечений, зависящих от выгорания, температуры топлива, температуры теплоносителя, плотности теплоносителя, концентрации борной кислоты в теплоносителе. Теплофизические параметры являются внешними параметрами и индивидуальны для каждого нода. В модели выгорания топлива учитывается спектральная история выгорания в каждом ноде. Библиотечные значения двухгрупповых констант корректируются с учетом полученных значений спектральной истории. В модели рассчитываются нестационарные значения концентрации йода, ксенона, прометия и самария. Моделируется нестационарное запаздывающее энерговыделение. Для решения системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится задача расчета распределения потока нейтронов, используется двухстадийный метод Чебышевских итераций.

Анализируется аварийная ситуация на реакторе ВВЭР-1200 типа «самоход стержня вверх». Модель реактора воспроизводит 6-ой блок Нововоронежской АЭС. В этом примере задается движение ОР СУЗ вверх при условии отсутствия сигнала для сброса аварийной защиты.

Для определенности положим, что входными параметрами являются расход теплоносителя через активную зону и эффективность ОР СУЗ. Расход теплоносителя определяется техническими характеристиками главных циркуляционных насосов (ГЦН). Из опыта эксплуатации можно ожидать неизменности расчетного и фактического расхода при протекании переходного процесса. Эффективность ОР СУЗ в значительной степени определяется загрузкой активной зоны и распределением выгорания ядерного топлива. Она может изменяться на значительных интервалах времени, но практически неизменна в течение рассматриваемого переходного процесса. Неопределенность эффективности ОР СУЗ является совокупностью неопределенностей многих величин (в первую очередь неопределенности сечений).

Отклонения эффективности ОР СУЗ и расхода в данном случае являются компонентами входного вектора \vec{x} .

$$\vec{\Delta x} = (\Delta G, \Delta \rho)$$

Для модельной задачи зададим дисперсию распределения расхода теплоносителя в активной зоне равную 4.5%, исходя из паспортной погрешности ГЦН. Неопределенность эффективности ОР СУЗ зададим той же величиной.

Далее следует выбрать параметры, определяющие конструкционную целостность активной зоны: коэффициент запаса до кризиса теплообмена, максимальная линейная нагрузка в АЗ, максимальные температуры топлива и оболочки твэл. Превышение хотя бы одним параметром заданного порогового значения приводит к отказу установки. Эти величины составляют вектор выходных параметров \vec{y} :

$$\vec{y} = (K_{cr}, q_l, T_{fuel}, T_{cl})$$

В результате работы алгоритма была получена область отказов в фазовом пространстве входных параметров - расхода теплоносителя через АЗ и эффективности стержня СУЗ, испытывающего самоход вверх.

Результат работы алгоритма представлен на Рисунке 4.1.

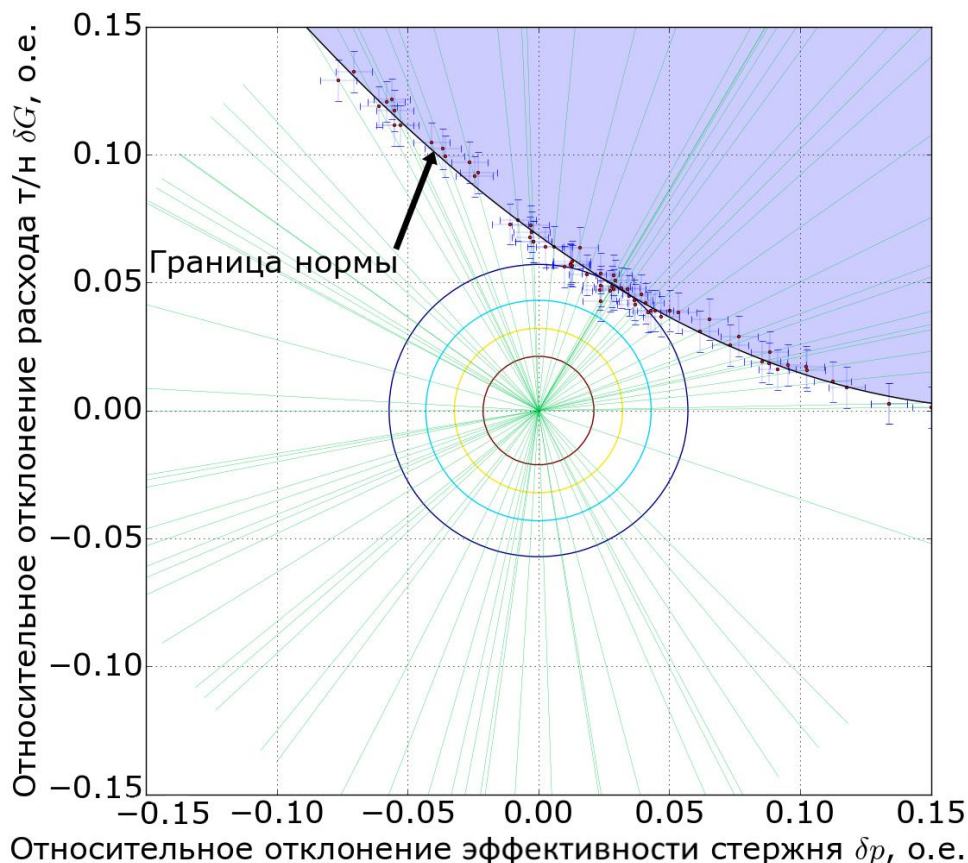


Рисунок 4.1. Результаты работы алгоритма в задаче самохода ОР СУЗ.

В результате была получена вероятность того, что по причине наличия отклонений в значениях расхода теплоносителя в АЗ и эффективности выбранного стержня СУЗ, в процессе самохода этого стержня вверх от некоторого заранее выбранного положения произойдет отказ в оборудовании ЯЭУ (будут нарушены условия эксплуатации). Эта величина составляет:

$$p = (9.2 \pm 0.3)\%$$

Приведенная выше погрешность результата – это стандартное отклонение, полученное путем проведения нескольких повторений всех расчетов.

Вероятность отказа P в данном случае будет равна:

$$P = p \cdot P_{process} \cdot P_{APMoff} \quad (2)$$

где: P – искомая вероятность; p – вероятность отказа при моделировании, полученная по приведенному в работе алгоритму RTRM; $P_{process}$ – вероятность возникновения аварийного процесса, в данном случае - самохода ОР СУЗ вверх; P_{APMoff} – вероятность того, что в процессе роста мощности при самоходе не приходит сигнал на срабатывание АРМ.

Была проведена оценка чувствительности изменения вероятности отказа от изменения дисперсий входных параметров. На Рисунке 4.2 представлены графики изменения вероятности отказа от изменения дисперсий входных параметров. Как видно из графиков, уточнение входных параметров позволяют повысить надежность РУ. Также видно, что уточнение расхода в АЗ РУ позволяет повысить надежность работы установки существенней, чем уточнение эффективности стержня СУЗ, испытывающего самоход.

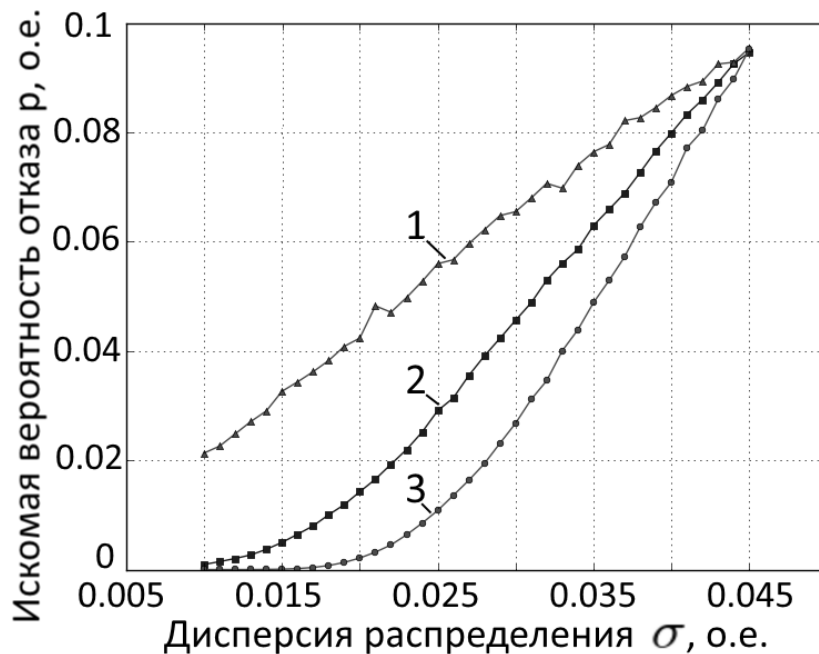


Рисунок 4.1. (1) - график изменения вероятности отказа при изменении дисперсии распределения эффективности стержня σ_p , испытывающего самоход при $\sigma_G = 0,045$. (2) - график изменения вероятности отказа при изменении дисперсии распределения расхода в активной зоне σ_G при $\sigma_p = 0,045$. (3) - график изменения вероятности отказа при изменении дисперсий σ_G и σ_p при условии, что $\sigma_p = \sigma_G$.

5. Сравнение с ММК.

Был проведен сравнительный анализ эффективности RTRM с ММК. На Рисунке 5.1 приведены графики зависимости дисперсии искомой вероятности отказа от числа проведенных расчетов.

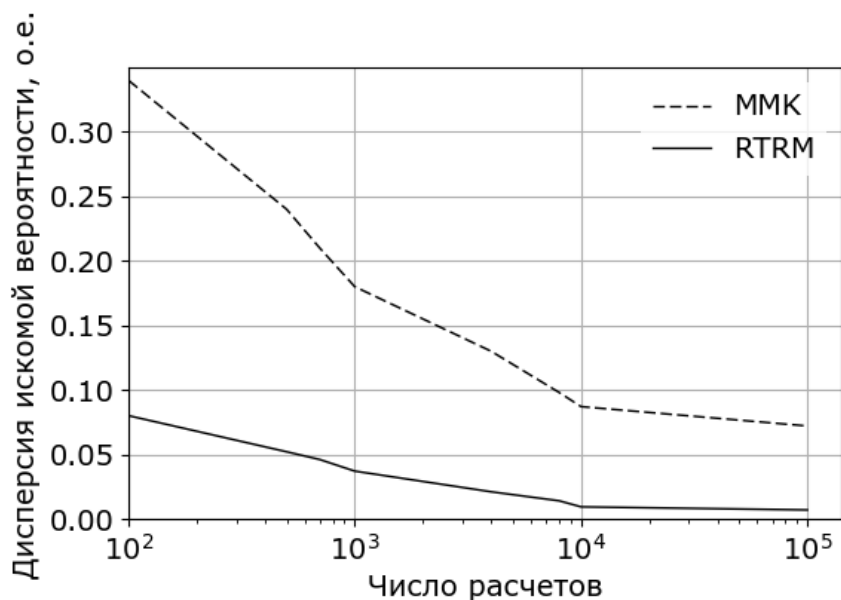


Рисунок 5.1. Графики зависимости дисперсии искомой вероятности отказа от числа проведенных расчетов для методов MMK и RTRM.

Алгоритм анализа надежности сочетает в себе простоту, характерную для вероятностных методов анализа надежности, и высокое быстродействие.

Заключение

Для программных кодов, моделирующих ядерные энергетические установки, был разработан алгоритм, который для определенных режимов эксплуатации и исходных событий позволяет определить вероятность отказа по причине отклонения параметров ЯЭУ.

Алгоритм анализа надежности RTRM сочетает в себе простоту, характерную для вероятностных методов анализа надежности, и высокое быстродействие. Предлагаемый алгоритм является прецизионным, как и MCS, однако лишен некоторых недостатков, присущих методам прямого моделирования.

Список литературы

1. GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications. — Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2008 (2008), Article ID 798901, 7 pages.
2. Best estimate safety analysis for nuclear power plants : uncertainty evaluation. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2008. p. ; 24 cm. — (Safety reports series, ISSN 1020–6450 ; no. 52).
3. A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM). — Yan-Gang Zhao, Tetsuro Ono, Department of Architecture, Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan.
4. Brent R.P. Algorithms for minimization without derivatives. – In: Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1973.