



В
НИ
И
А

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ "РОСАТОМ"

ФГУП "ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ им. Н.Л.Духова"

Современный подход к комплексному определению время-амплитудных параметров импульсного нейтронного излучения

М.Е. Кирсанов, О.И. Суслин, В.А. Янюшкин

Актуальность проблемы и ее современное состояние

Теоретические подходы к решению задачи определения параметров импульсного нейтронного излучения методом непосредственной регистрации остались на уровне 70-х – 80-х годов прошлого века. Разработанные на их основе измерительные методики сильно устарели и не отвечают запросам современной измерительной практики;

Существующая в этой сфере терминология не имеет достаточной корректности и полноты, допуская неоднозначное толкование и вступая в противоречие с понятиями, давно сложившимися в ряде фундаментальных научных дисциплин.

Постановка задачи

1. Исчерпывающая информация о параметрах импульсного нейтронного излучения заложена во временном законе изменения мгновенной плотности потока нейтронов в импульсе в пределах его полной длительности. Определить напрямую этот закон невозможно, поэтому для суждения о нем используют линейный электронный преобразователь прямого аналогового действия, переводящего этот закон в осциллограмму его собственного выходного тока.

2. Такую осциллограмму выходного отклика преобразователя часто отождествляют с самим законом изменения мгновенной плотности потока нейтронов в регистрируемом нейтронном импульсе в смысле их полного временного подобия и связывают между собой через некий постоянный коэффициент пропорциональности.

Постановка задачи (продолжение)

При таком подходе возникает две потенциальные проблемы, связанные с возникновением:

1. динамической ошибки преобразования нейтронного импульса в его электрический отклик, возникающей за счет инерционности используемого измерительного тракта;
2. дополнительной случайной погрешности преобразования, возникающей за счет случайного характера самой динамики преобразования нейтронного импульса в его электрический отклик.

Неучет этих факторов приводит к следующему.

1. Динамической ошибка: истинные значения временных параметров нейтронного импульса могут отличаться от реальности на десятки и даже на сотни процентов.
2. Случайность динамики преобразования: реальная относительная статистическая погрешность преобразования может отличаться от ожидаемой на 15-20%.

ПРИНЯТАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Основные определения.

1. Если существует любое целое число непересекающихся отрезков на оси времени, вне объединения которых количество испущенных нейтронов с вероятностью единица составляет пустое множество, то такой тип нейтронного излучения называется **многократным импульсным нейтронным излучением**. Если при этом промежуток времени между такими соседними отрезками есть величина постоянная, то такой тип импульсного нейтронного излучения называется **частотным**. Если же такой отрезок вообще окажется единственным на всей оси времени, то такой тип импульсного нейтронного излучения называется **однократным**. Если не существует ни одного отрезка конечной длительности на всей оси времени, вне которого количество испущенных нейтронов с вероятностью единица составляет пустое множество, то такой тип нейтронного излучения называется **непрерывным**.
2. **Формой** нейтронного импульса называется плотность распределения случайных полуинтервалов времени, начало которых всегда совпадает с началом нейтронного импульса, а конец – с моментом попадания его отдельных нейтронов в рабочую апертуру детектора.
3. **Нейтронным импульсом** называется его форма, умноженная на флюенс нейтронов в нем.

Подавление динамической ошибки. Восстановление формы нейтронного импульса

Известная
мгновенная
плотность потока
нейтронов

Прямой алгоритм преобразования (интеграл свертки)

$$\psi(t) \xrightarrow{\bar{g}(t)} \bar{i}(t)$$

Неизвестный
выходной отклик

$$\bar{i}(t) = S_{eff} \int_0^t \psi(t_1) \bar{g}(t-t_1) dt_1$$

Эффективная
площадь
детектора

Известная
импульсная
характеристика
преобразователя

Обратный алгоритм преобразования (интегральное уравнение свертки)

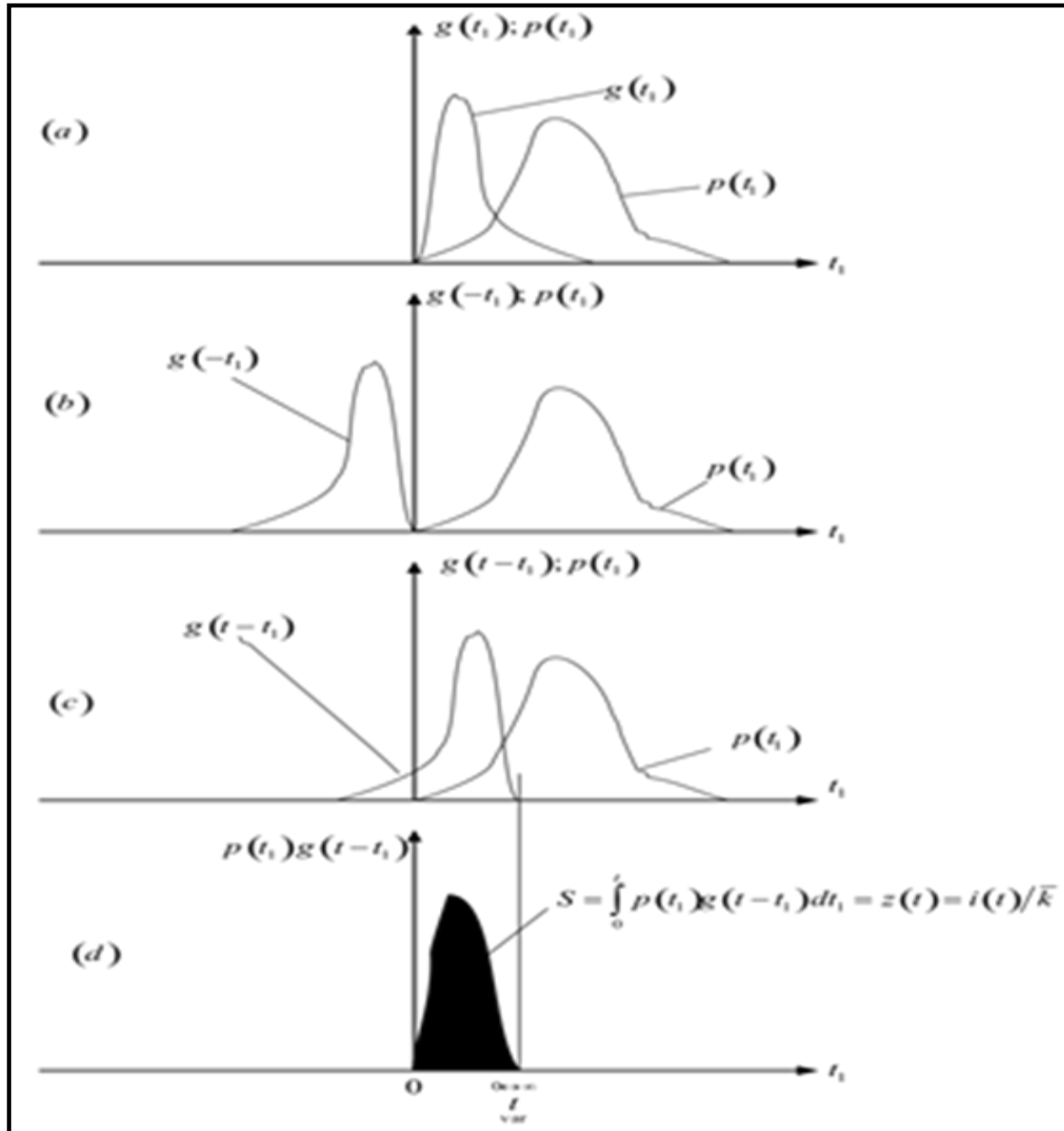
$$\bar{i}(t) \xrightarrow{\bar{g}(t)} \psi(t)$$

Искомый корень
интегрального
уравнения

Измеренный
выходной
отклик

$$\bar{i}(t) = S_{eff} \int_0^t \psi(t_1) \bar{g}(t-t_1) dt_1$$

Известное
разностное ядро
интегрального
уравнения



Геометрический смысл интеграла свертки

Подавление динамической ошибки. Восстановление формы нейтронного импульса (продолжение)

Формализм матричного метода решения задачи восстановления нейтронного импульса.

Пусть $\{\bar{g}_1 \dots \bar{g}_k\}$ и $\{\psi_1 \dots \psi_n\}$ - дискретные массивы импульсной характеристики и искомой мгновенной плотности потока нейтронов в импульсе соответственно. Тогда:

$$\bar{i}_1 = S_{eff} \psi_1 \bar{g}_1 \Delta t \quad - \text{значение выходного тока на 1-м шаге временного квантования}$$

$$\bar{i}_2 = S_{eff} (\psi_1 \bar{g}_2 + \psi_2 \bar{g}_1) \Delta t \quad - \text{значение выходного тока на 2-м шаге временного квантования}$$

$$\bar{i}_3 = S_{eff} (\psi_1 \bar{g}_3 + \psi_2 \bar{g}_2 + \psi_3 \bar{g}_1) \Delta t \quad - \text{значение выходного тока на 3-м шаге временного квантования}$$

и так далее ровно $m = k + n - 1$ раз.

Задача восстановления нейтронного импульса сводится к решению следующей системы линейных уравнений:

Переходная матрица системы

$$S_{eff} \Delta t \begin{pmatrix} \bar{g}_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \bar{g}_1 & \ddots & \dots & \vdots \\ \bar{g}_k & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \bar{g}_k & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \bar{g}_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \bar{g}_k \end{pmatrix}_{(k+n-1) \times n = m \times n}$$

Шаг временного квантования

$$\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \psi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{i}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{i}_{m=k+n-1} \end{pmatrix}$$

Измеренный вектор-столбец выходного тока

Дискретные значения восстановленного нейтронного импульса

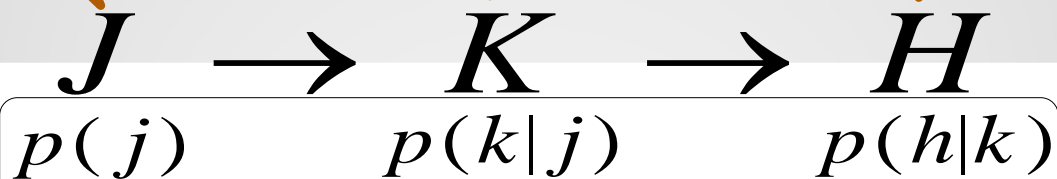
Преобразователь, как линейное звено со случайной динамикой преобразования.

Общая вероятностная схема преобразования прямого аналогового действия

Случайное число нейтронов, попавших в рабочую апертуру детектора

Случайное число зарегистрированных при этом нейтронов

Случайный выходной отклик преобразователя, образованный отдельными зарегистрированными нейтронами.



Вероятности соответствующих событий

Статистическая погрешность восстановления нейтронного импульса

$$\|D_i\| = \|(\bar{g})^2\| \times S_{eff} \Delta t \left(1 + \frac{D(G_{max})}{(\bar{g}_{max})^2} \right) \|\psi\| = \|(\bar{g})^2\| \times S_{eff} \Delta t \|\gamma^2 \psi\|$$

$$где \quad \gamma = \sqrt{1 + \frac{D(G_{max})}{(\bar{g}_{max})^2}} = \sqrt{1 + \frac{D(\Phi)}{(\bar{\phi})^2}}$$

Вектор-столбец дисперсий дискретных значений полного импульса выходного тока

С другой стороны, формально справедливо:

$$\|D_i\| = \|(\bar{g})^2\| \times \|(S_{eff} \Delta t)^2 D_\psi\|$$

Отсюда:

$$\|D_\psi\| = \frac{1}{S_{eff} \Delta t} \|\gamma^2 \psi\|$$

Дисперсия и среднее значение случайной амплитуды элементарного импульса выходного тока

Вектор-столбец дисперсий результата восстановления мгновенной плотности потока нейтронного импульса

Результат восстановления мгновенной плотности потока нейтронного импульса

Статистическая погрешность определения флюенса нейтронного импульса

Случайная оценка флюенса нейтронов в импульсе

$$\tilde{\Psi} \stackrel{W}{\leftrightarrow} Q$$

Случайный выходной заряд

$$\tilde{\Psi} = \frac{Q}{W} = \frac{Q}{S_{eff} \bar{\phi}}$$

Интегральный коэффициент преобразования

Среднее значение и дисперсия случайной оценки флюенса нейтронов за импульс:

$$M(\tilde{\Psi}) = \frac{M(Q)}{S_{eff} \bar{\phi}} = \frac{M(Q)}{W} = \bar{\Psi} \quad D(\tilde{\Psi}) = \frac{D(Q)}{(S_{eff} \bar{\phi})^2} = \frac{S_{eff} \bar{\Psi} [D(\Phi) + (\bar{\phi})^2]}{(S_{eff} \bar{\phi})^2} = \frac{\bar{\Psi}}{S_{eff}} \left[\frac{D(\Phi)}{(\bar{\phi})^2} + 1 \right]$$

Где:

$$D(Q) = S_{eff} \bar{\Psi} [D(\Phi) + (\bar{\phi})^2]$$

Дисперсия и среднее значение элементарного выходного заряда от одиночного нейтрона

Тесты проверки достоверности решения задачи восстановления

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt \stackrel{???}{=} \frac{1}{W} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) dt$$

Интегральный тест

Дифференциальный тест

Производящие функции
восстановленного
нейтронного импульса и
импульсной
характеристики

$$i(t) = P_{\psi} \square P_g$$

Временной тест (средняя длительность)

Временной тест (дисперсионная
длительность)

$$\int_{-\infty}^{\infty} t \frac{\psi(t)}{\Psi} dt \stackrel{???}{=} \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{i(t)}{\bar{q}} dt - \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{g(t)}{\bar{\phi}} dt;$$

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} t^2 \frac{\psi(t)}{\Psi} dt - \left(\int_{-\infty}^{\infty} t \frac{\psi(t)}{\Psi} dt \right)^2 \right] \stackrel{???}{=} \left[\int_{-\infty}^{\infty} t^2 \frac{i(t)}{\bar{q}} dt - \left(\int_{-\infty}^{\infty} t \frac{i(t)}{\bar{q}} dt \right)^2 \right] - \left[\int_{-\infty}^{\infty} t^2 \frac{g(t)}{\bar{\phi}} dt - \left(\int_{-\infty}^{\infty} t \frac{g(t)}{\bar{\phi}} dt \right)^2 \right]$$

Практическое программное обеспечение

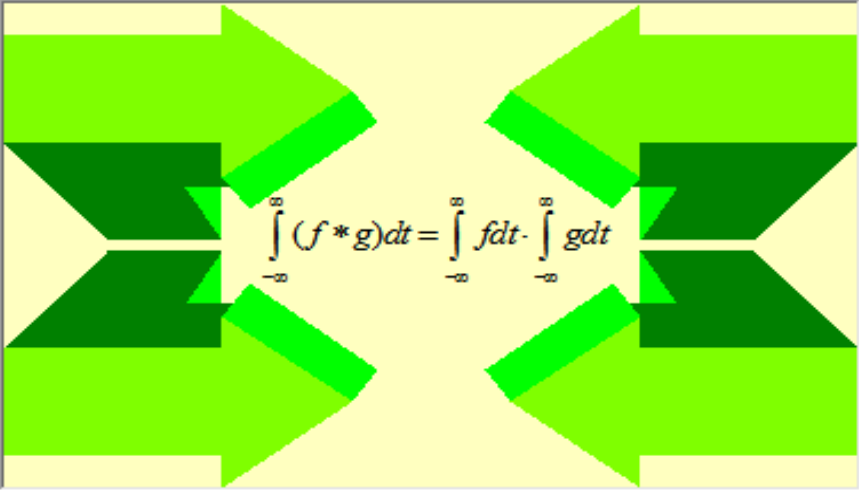
Главное окно программного продукта RNP 2010.

Restorer of Neutron Pulse

Главная Анализатор Моделирование

Программные продукты специального назначения от ВНИИА

Добро пожаловать!


$$\int_{-\infty}^{\infty} (f * g) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} g dt$$

Серия: Программно-математическое и метрологическое обеспечение для контроля параметров импульсного нейтронного излучения

Определение истинных физических характеристик нейтронного импульса

(Версия "Full")

Turbo режим

Полное решение (с восстановлением формы импульса)

Частное решение (флюенс в импульсе)

Только чтение

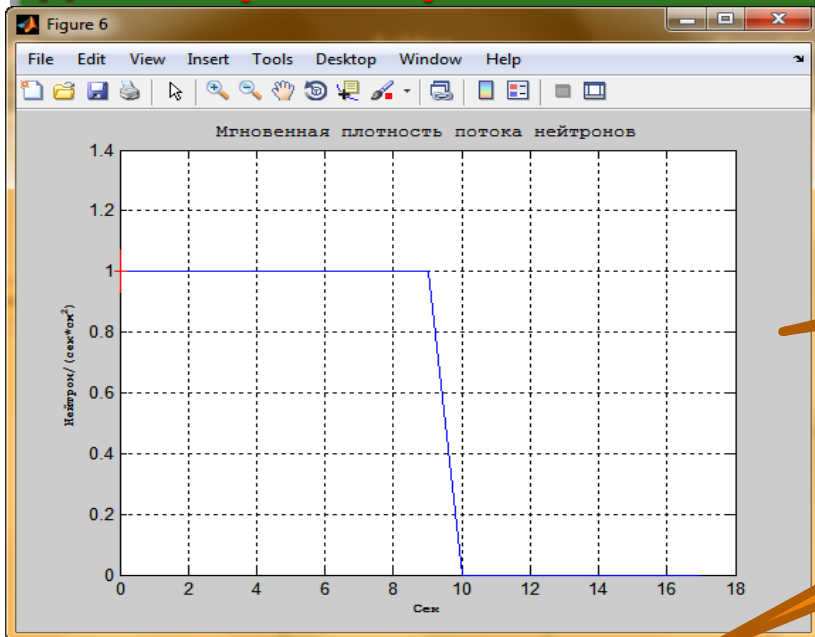
Калибровка:

Интегральный коэффициент преобразования

Умолчания: $\mu: 0.5$

Автор математического алгоритма и разработчик ПО:
ст. научный сотр. ВНИИА Янюшкин Владимир Алексеевич

Достоверность решения тестовой задачи

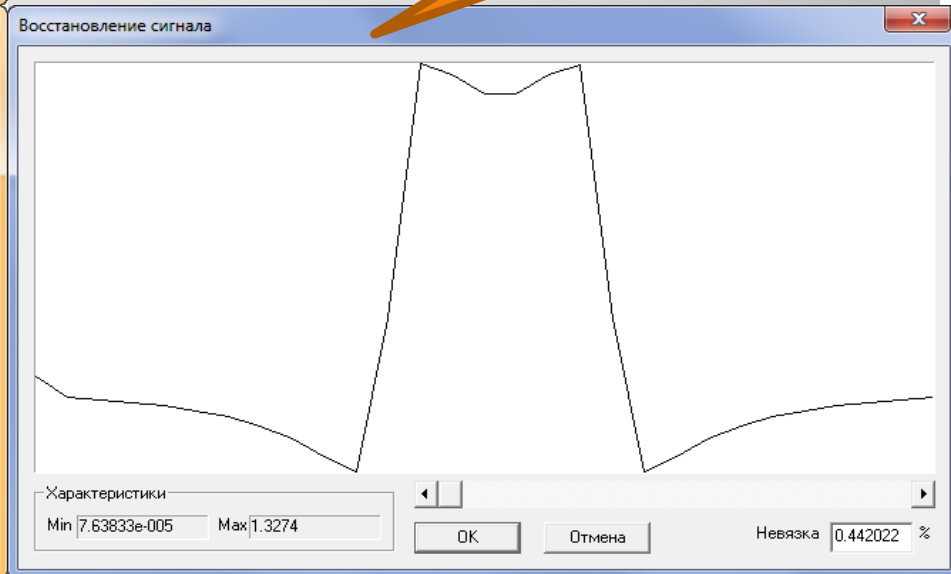
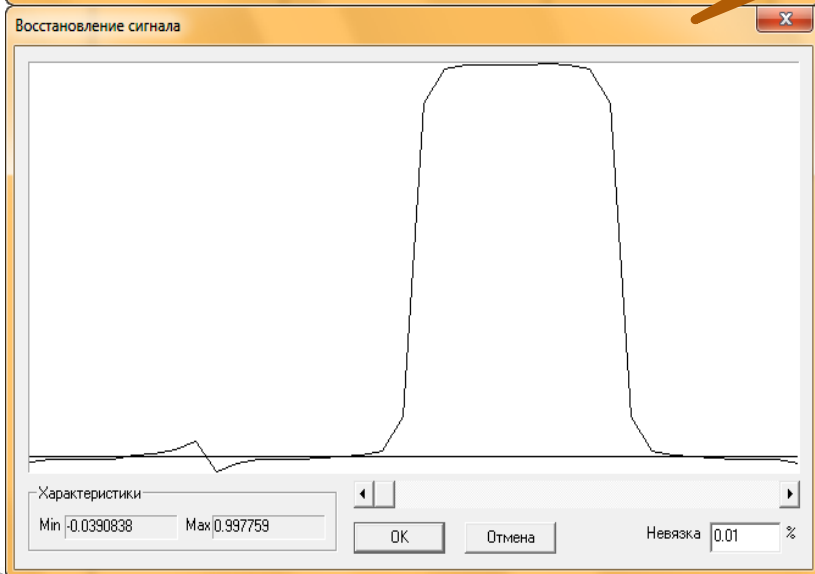


- Типы алгоритмов восстановления нейтронного импульса

Алгоритм ВНИИА «RNP-2010»

Алгоритм ВНИИЭФ «ConvLab»
(по Тихонову)

Алгоритм ВНИИЭФ
«ConvLab» (по
Тараско)

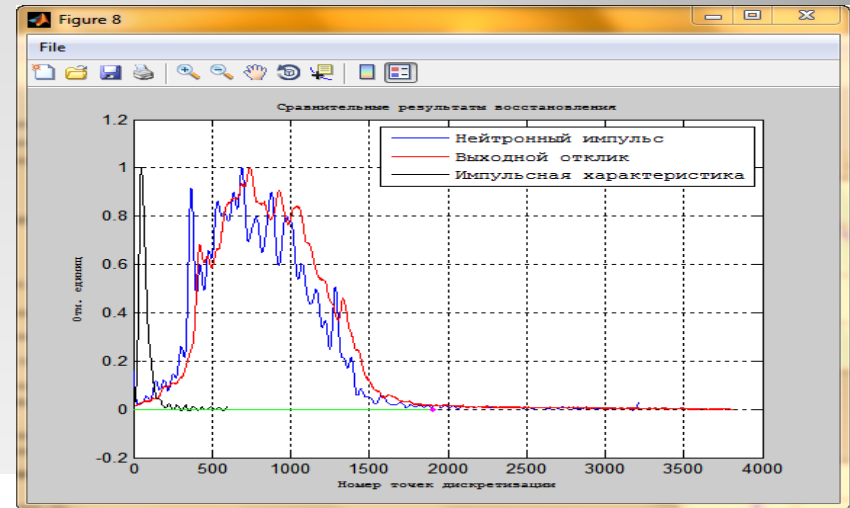
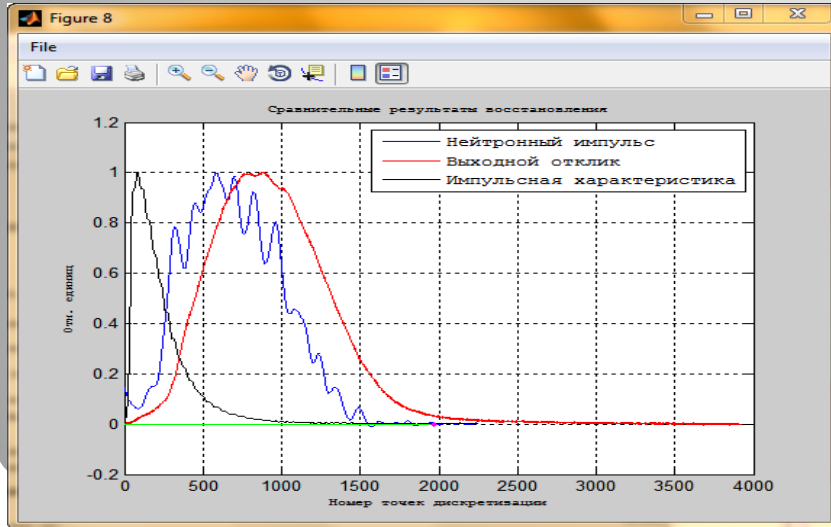


Сравнение методов восстановления нейтронного импульса

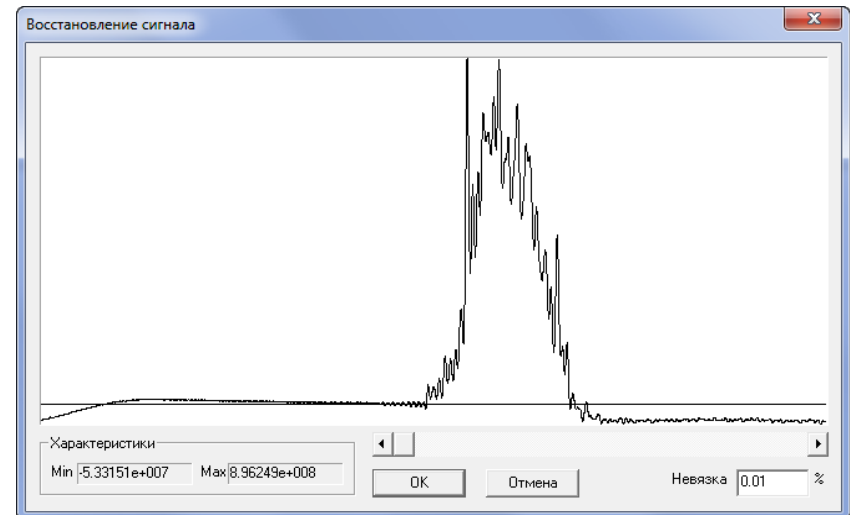
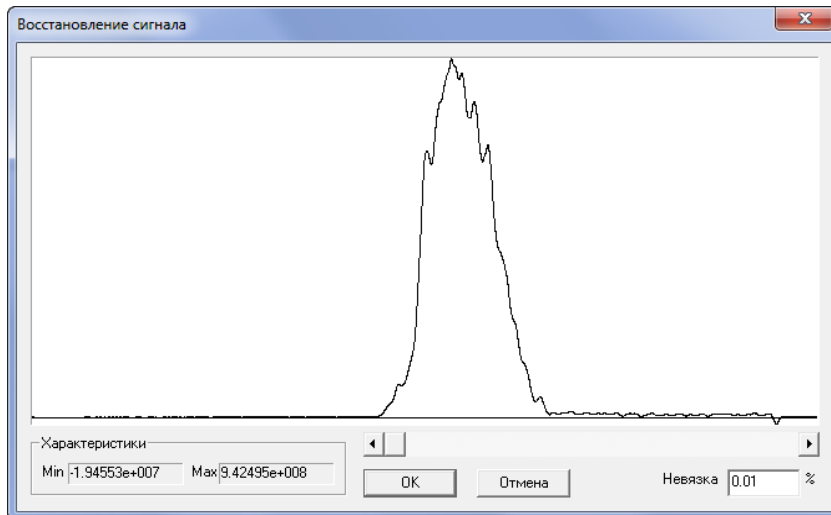
Результат восстановления нейтронного импульса ИНГ-101 (ТБФУ-561; R=500 ом)

Результат восстановления нейтронного импульса ИНГ-101 (ТБФУ-561; R=50 ом)

Восстановление нейтронного импульса по матричному методу (алгоритм «RNP-2010» из ВНИИА)



Восстановление нейтронного импульса по Тихонову (алгоритм «ConvLab» из ВНИИЭФ)



Заключение

- 1. Разработан математический аппарат восстановления нейтронного импульса, позволяющий корректно учесть случайную компоненту полной погрешности восстановления и полностью подавить инерционную динамическую ошибку преобразования нейтронного импульса в электрический отклик.**
- 2. На основе этого математического аппарата разработана полностью работоспособная бета-версия программно-математического продукта «RNP-2010», успешно прошедшая оценочную экспериментальную проверку.**
- 3. Преимущества программно-математического продукта «RNP-2010» состоят в его высокой метрологической надежности, недостижимой для других известных программных продуктов этого класса.**
- 4. Этот продукт и заложенные в него математические подходы могут быть использованы для решения подобных задач в других областях научной и технической деятельности. К таким областям можно отнести прикладную теорию вероятности, теорию сигналов, теорию анализа и синтеза линейных электрических цепей, техническую кибернетику и т.д.**