



УДК 53.072; 53:004  
ГРНТИ 29.03.77

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

*Н.И. МАЙГУРОВА*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*С.В. РЯБОВ, кандидат технических наук*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

*Г.Л. ФЕДИЙ*

*ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье рассмотрена возможность имитационного моделирования физических процессов, происходящих в результате применения энергии направленного действия для идентификации фактов и масштабов ее применения. Показана возможность качественного описания основных сигналов, регистрируемых датчиками средств обнаружения физических возмущений окружающей среды.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, математические модели, физические возмущения, принятие решений, сигналы, блок-диаграммы.

## DETECTION FACILITIES SIGNALS MODELING OF THE DIRECTIONAL ACTION ENERGY APPLYING

*N.I. MAYGUROVA*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*S.V. RYABOV, Candidate of Technical Sciences*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

*G.L. FEDIY*

*MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article considers the possibility of physical processes simulation occurring as a result of the directional energy applying to identify the facts and the extent of its application. The possibility of a qualitative description of the main signals detected by sensors for detecting physical disturbances of the environment is shown.

*Keywords:* simulation models, mathematical models, physical disturbances, decision making, signals, block diagrams.

**Введение.** В настоящее время уделяется большое внимание работам по созданию нетрадиционного оружия или оружия на новых физических принципах. Поражающее действие такого оружия основано на ранее не использовавшихся в оружии процессах и явлениях, в частности на выработке различных видов энергии направленного действия. Исследования в данной области заставляют решать задачи регистрации, предупреждения и защиты от новых видов угроз. Данная задача может быть решена с помощью создания многофункциональных модулей регистрации и определения физических возмущений окружающей среды в задачах оповещения, защиты и прогноза поражающего воздействия их источников.

В конструкцию многофункциональных модулей регистрации физических параметров окружающей среды входят датчики различных типов.

В ходе идентификации фактов и масштабов применения некоторых видов энергии направленного действия используются датчики, регистрирующие возмущения окружающей среды различной физической природы [1].



К основным видам возмущений можно отнести следующие:

- 1) электромагнитный импульс (ЭМИ);
- 2) световое излучение (СИ);
- 3) акустический сигнал (АС);
- 4) сейсмические характеристики.

На основе анализа изменений в характере вышеперечисленных возмущений среды можно распознать и затем классифицировать тип примененного средства возмущения. Для этого должны быть разработаны алгоритмы принятия решения о характере, типе средства, а также необходимости оповещения всех соответствующих служб.

**Актуальность.** Ввиду трудоемкости, дороговизны, и зачастую невозможности проведения натуральных экспериментов возникает задача разработки математических моделей, позволяющих адекватно и с приемлемой погрешностью имитировать сигналы, регистрируемые приёмной аппаратурой. Это создаст условия для проведения численных экспериментов, позволяющих отладить процедуры идентификации, обработки сигналов, их интеллектуального анализа, параметризации, классификации и т. д.

Математическое моделирование всех физических процессов, происходящих в результате применения энергии направленного действия от источника к приемнику сигнала станции засечки представляет собой крайне сложную задачу. На практике применение такого подхода неоправданно по трудозатратам.

Одним из способов имитационного моделирования может являться подход, основанный на аппроксимации экспериментальных данных полученных в ходе испытаний или взятых из литературных источников. Такие экспериментальные данные должны представлять собой временные ряды (характеристики) регистрируемой физической величины во времени. При этом аппроксимирующие модели должны иметь возможность параметризации, которая позволит после процедуры параметрической идентификации сигнала заменить его временную характеристику (временной ряд) на совокупность информативных признаков, позволяющих с приемлемой погрешностью распознавать и классифицировать факт применения энергии направленного действия.

В качестве среды моделирования использована интерактивная графическая среда имитационного моделирования MathWorks Simulink™, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Кроме того, среда Simulink™ имеет в своем составе инструменты построения сигналов различной формы, анализа сигналов во временных и частотных областях, что позволяет осуществлять генерирование, имитацию прохождения и всесторонний анализ сигналов в рамках одной среды моделирования [2].

Рассмотрим построение типовых сигналов, принимаемых устройствами фиксации в системе Matlab Simulink. Например, типовой электромагнитный импульс представляет собой функцию времени, которую можно описать как гармонический сигнал, модулированный огибающей в виде (рис. 1):

$$E_{\text{огиб}}(t) = A_E t e^{-\nu_E(t-\tau)}, \quad (1)$$

где  $A_E$  – начальная амплитуда;  $t$  – время;  $\nu_E$  – коэффициент затухания;  $\tau$  – запаздывание или время прихода импульса с момента времени начала регистрации.

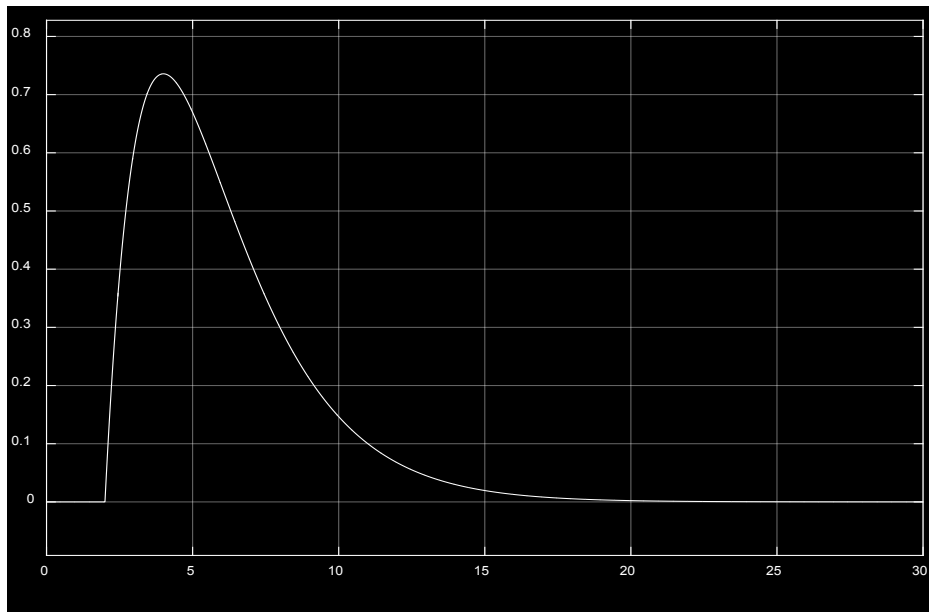


Рисунок 1 – Огибающая импульса

Тогда наложение модулирующего сигнала на гармоническую составляющую позволит получить простейшую имитационную модель сигнала в виде (рис. 2):

$$E(t) = A_E t e^{-\nu_E(t-\tau)} \sin(\omega_E(t-\tau) + \varphi_E), \quad (2)$$

где  $\omega_E$  – частота несущей;  $\varphi_E$  – фаза несущей.

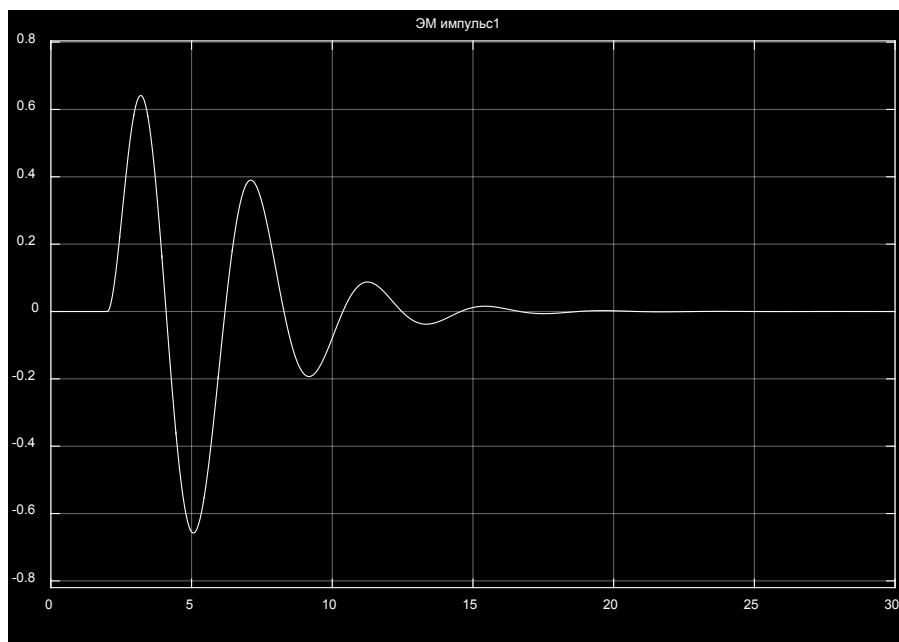


Рисунок 2 – Временная характеристика импульса

Структурная модель в среде Simulink представлена на рис. 3. Запозывание реализовано блоком Transport Delay.

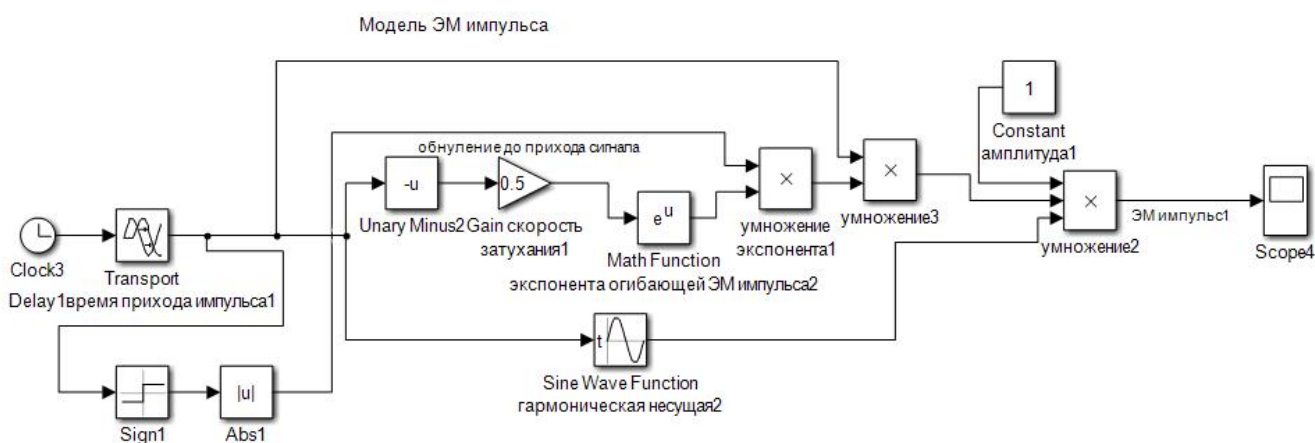


Рисунок 3 – Структурная модель в среде Simulink

Используя различные параметры модели получают набор реализаций сигналов с заданными характеристиками (рис. 4).

Каждый сигнал представляет собой множество параметров математической модели, по которым можно реализовать классификацию сигнала. Например, для рассмотренной модели набор параметров – множество  $\{A_E, \nu_E, \tau, \omega_E, \varphi_E\}$ . Кроме того, с помощью простейших вычислений рассчитываются дополнительные характеристики: максимальная амплитуда колебаний, время затухания сигнала и т. д. Таким образом, полученные параметры являются основой для построения системы распознавания и классификации фактов применения энергии направленного действия.

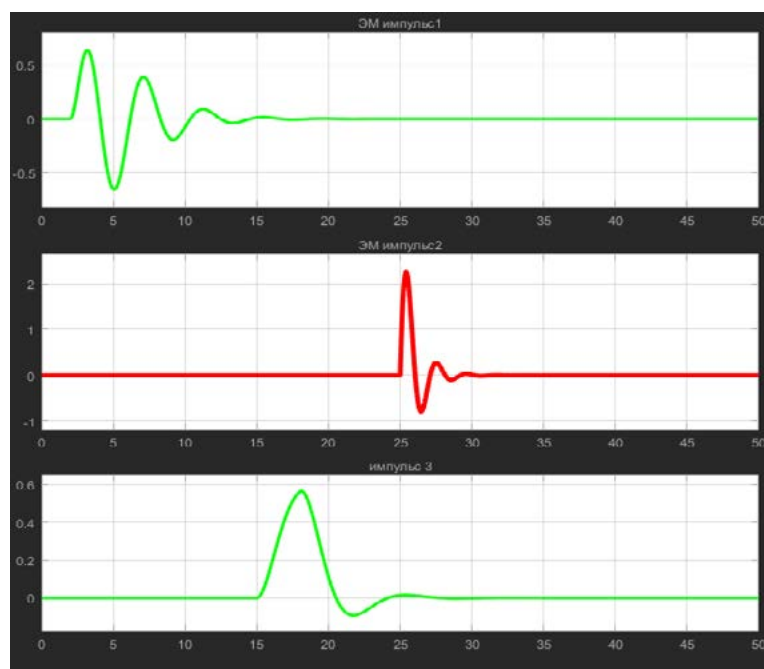


Рисунок 4 – Временные диаграммы группы импульсов, имитирующие акустические импульсы

В случае, когда достаточно сложно формализовать временную характеристику сигнала с помощью элементарных математических функций возможно представление имитационной модели сигнала в виде реакции линейной динамической системы на возмущение. В этом случае



возможно использование различных комбинаций динамических звеньев и возмущающего импульса. При таком подходе пространство характерных признаков сигнала образуется множеством параметров динамического звена или их комбинации. Например, зададим объект с помощью колебательного звена 2-го порядка, задаваемого передаточной функцией:

$$F(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент усиления,  $T$  – постоянная времени,  $\zeta$  – коэффициент затухания.

По параметрам  $k$ ,  $T$ ,  $\zeta$ , характеризующим свойства поглощения (усиления) энергии, инерционности и динамики затухания сигнала, дополнительно можно вычислить еще ряд параметров [3]. Например, такие физические характеристики сигнала как угловая частота колебаний:

$$\omega = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T}, \quad (4)$$

показатель затухания:

$$\lambda = \frac{\zeta}{T}, \quad (5)$$

время прихода импульса:

$$t \Big|_{|E(t)| \geq \varepsilon}, \quad (6)$$

длительность, максимальная амплитуда и т. д.

Таким образом, одно звено 2-го порядка дает как минимум 8 признаков, позволяющих осуществить классификацию сигнала.

Типовая подсистема, реализованная в среде Simulink представлена на рис. 5 и включает в себя блок Transfer Function (передаточная функция).

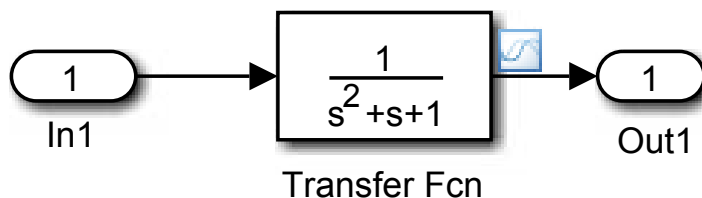


Рисунок 5 – Подсистема, реализующая колебательное звено второго порядка

На более высоком уровне иерархии моделей реализуются функции нанесения возмущения (прямоугольный импульс с помощью блока Pulse Generator) и блоков регистрации сигналов и их экспорта в вычислительную среду Matlab (блоки Scope и ToWorkspace на рис. 6).

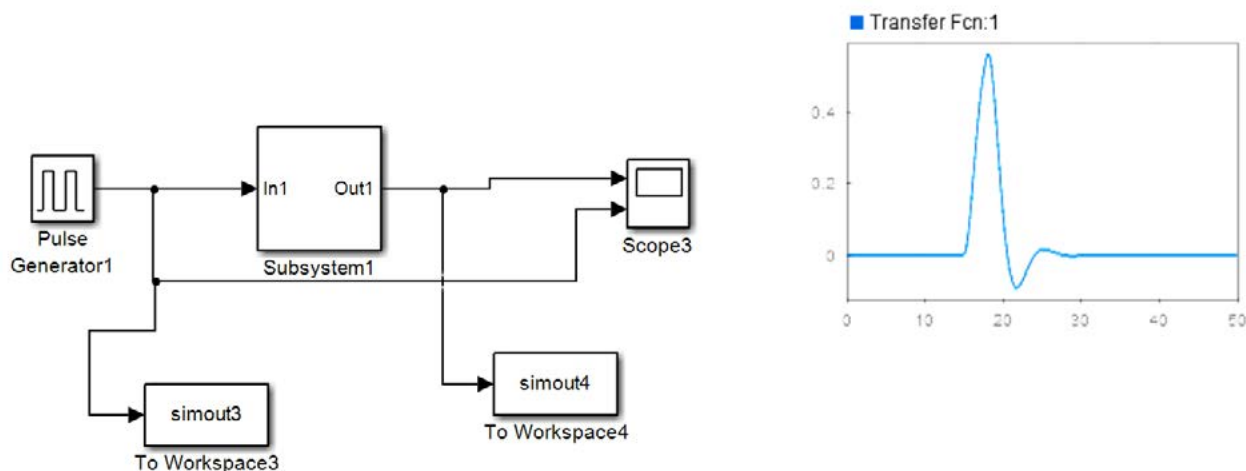


Рисунок 6 – Модель импульса на основе подсистемы звена 2 порядка

Для решения обратной задачи (идентификации параметров объекта), реакция которого на возмущающий прямоугольный импульс регистрируется, возможно использование тулбокса системы Matlab System Identification Toolbox. С помощью System Identification Toolbox создается библиотека параметров сигналов, полученная в результате параметрической идентификации сигналов, полученных в результате эксперимента (рис. 7).

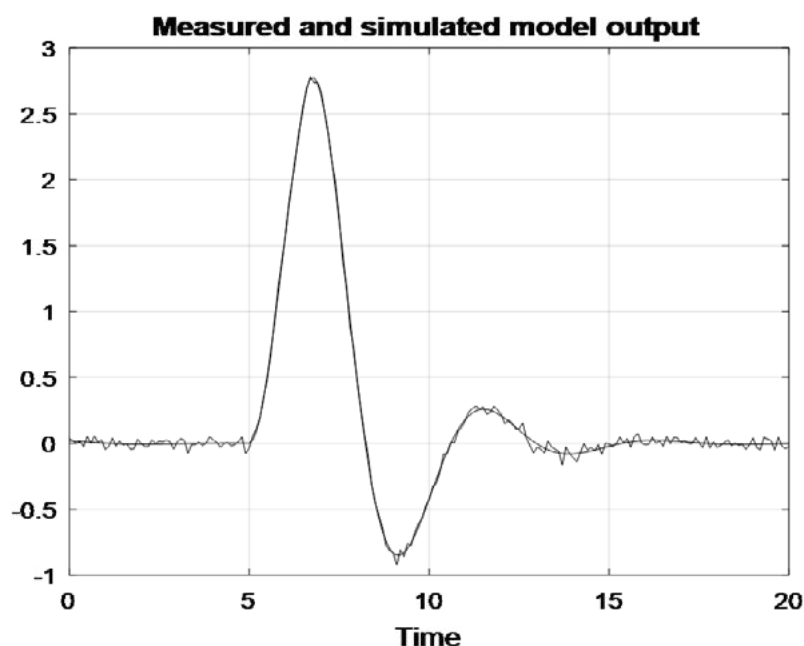


Рисунок 7 – Аппроксимация экспериментального сигнала с помощью имитационной модели в виде колебательного звена второго порядка

Апробация проходила на экспериментальных данных, полученных в результате наложения случайной составляющей на модельный импульс.

В качестве примера были взяты формы ЭМИ, представлены на рис. 8. На рис. 8а показан фронт импульса; на рис. 8б – спад импульса.

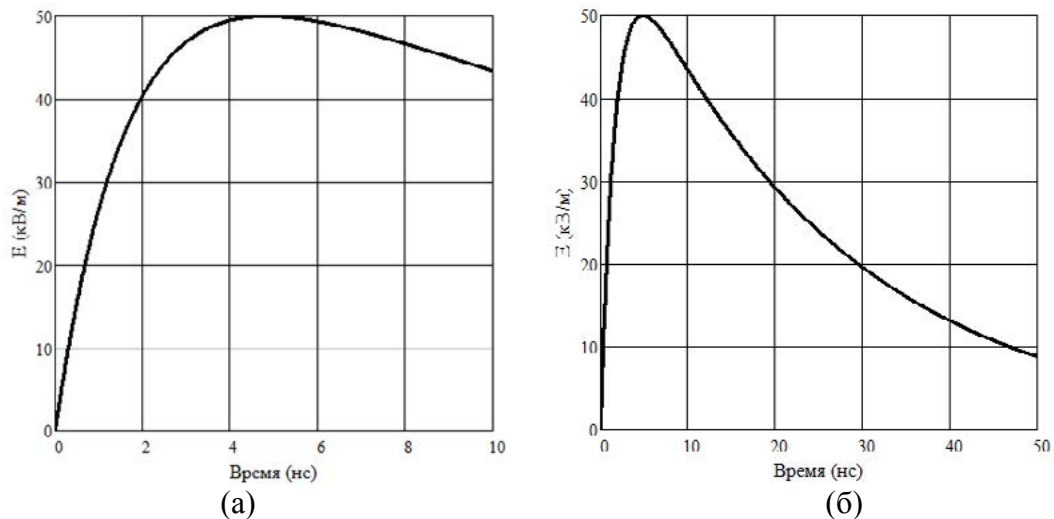


Рисунок 8 – ЭМИ на ранней стадии (электрическая составляющая): (а) 0 – 10 нс (характеристика нарастания импульса), (б) 0 – 50 нс (характеристика спада импульса)

Поскольку формы падающих сигналов изменяются очень широко, а местоположение источника не поддается прогнозированию, предложена обобщенная форма падающего сигнала для ЭМИ, в которой отражаются короткое время нарастания вблизи источника и большие напряженности ЭМИ в области максимальной амплитуды. Огибающая всех импульсов, включающая большое время спада на границе зоны прямой видимости, дана для определения наиболее жесткого случая. Более реальная форма сигнала, исходя из этих соображений, представляет собой импульс с фронтом 2,5 нс и длительностью на уровне половины амплитуды 23 нс (обозначается как 2,5/23) для исследований воздействия ЭМИ на объекты гражданского назначения.

Для всех этих случаев поведение электрического поля на раннем этапе развития импульса в свободном пространстве определяется соотношениями:

$$E(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ E_A \cdot k \cdot (e^{-at} - e^{-bt}), & \text{при } t > 0, \end{cases}$$

$$E_A = 50000, \text{ В / м,}$$

$$a = 4 \cdot 10^7, \text{ с}^{-1}$$

$$b = 6 \cdot 10^8, \text{ с}^{-1}$$

$$k = 1,3, \quad (7)$$

где  $t$  – текущее время, с,  $a$ ,  $b$  – показатели экспоненты,  $k$  – нормировочный коэффициент.

Поскольку приведенная форма сигнала не дает полной картины формы любого раннего ЭМИ, обычно рассматривается форма сигнала для некоторого характерного случая. При этом импульс имеет максимальную амплитуду 50 кВ/м, время нарастания 2,5 нс на уровне 0,1...0,9 амплитуды; время до максимума – 4,8 нс, длительность импульса на полувывоте – 23 нс, поток энергии сигнала – 0,114 Дж/м<sup>2</sup>.

Имитация сигнала ЭМИ на ранней стадии (электрическая составляющая) осуществлялась с помощью передаточной функции  $F(S) = \frac{14,2 \cdot 10^{21}}{0,55s^2 + 64 \cdot 10^7 s + 24 \cdot 10^{15}}$ , а также набором элементарных математических функций в виде зависимости  $E(t) = 50000 \cdot 1,3 \cdot (e^{-4 \cdot 10^7 t} - e^{-6 \cdot 10^8 t})$ .





Полученная в результате идентификации экспериментальных данных сигнала с помощью System Identification Toolbox зависимость имела вид:

$$F(S) = \frac{3.140392831028899 \cdot 10^{12} s + 2.487508973684688 \cdot 10^{22}}{s^2 + 1.121773065490501 \cdot 10^9 s + 4.180305950588025 \cdot 10^{16}}. \quad (8)$$

Отклонение составило порядка 15%, что является вполне допустимым (рис. 9).

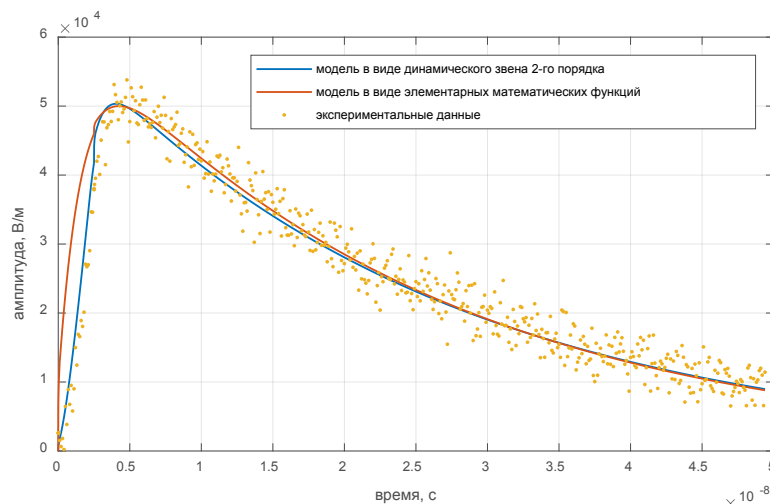


Рисунок 9 – Экспериментальные и модельные данные ЭМИ на ранней стадии (электрическая составляющая)

**Выводы.** Таким образом, сигнал, регистрируемый приемником, может быть описан множеством признаков, являющихся параметрами двух имитационных моделей: максимальное отклонение амплитуды сигнала, время прихода импульса, коэффициент затухания, частота и фаза сигнала, коэффициент усиления, инерционность, длительность импульса и т. д.

Сравнение эксперимента с имитационными моделями сигналов показало возможность качественно верного описания основных сигналов, регистрируемых датчиками средств обнаружения применения энергии направленного действия, а также приемлемой погрешности расчетов, позволяющих сформировать массив признаков, характеризующих сигнал для последующей его идентификации и классификации в задачах регистрации, предупреждения и защиты от поражающего воздействия опасного источника энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях. М.: Радио и связь, 2007. 96 с.
2. Math Works [официальный сайт]. Режим доступа: <http://matlab.ru/> (дата обращения: 02.03.2018).
3. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2016. 560 с.

#### REFERENCES

1. Kotyuk A.F. Datchiki v sovremennyh izmereniyah. M.: Radio i svyaz', 2007. 96 p. (in Russian).
2. MathWorks [ofitsial'nyy sayt]. Rezhim dostupa: <http://matlab.ru/> (data obrashheniya: 02.03.2018). (in Russian).
3. YUrevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. SPb.: BHV-Peterburg, 2016. 560 p. (in Russian).





© Майгурова Н.И., Рябов С.В., Федий Г.Л., 2018

Майгурова Нина Ивановна, научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, nina.vsu@gmail.com.

Рябов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент 206 кафедры математики, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Федий Галина Леонидовна, младший научный сотрудник 22 отдела научно-исследовательского 2 управления научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.