

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНФЛИКТА СЛОЖНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Г. Н. Мальцев,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Вознюк,

канд. техн. наук, доцент

М. Р. Туктамышев,

канд. техн. наук, доцент

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Предложен методический аппарат построения моделей функционирования конфликтующих сложных радиотехнических систем на основе метода описания параллельных развивающихся стохастических процессов. Моделируемый конфликт представляется совокупностью взаимодействующих случайных дискретно-событийных процессов, заданных сетевой структурой типа сети Петри. Представлен набор подсетей и функций переходов, позволяющий описать радиоэлектронный конфликт системы радиосвязи с комплексом радиопротиводействия. Приведены результаты исследования временных характеристик задержки передачи сообщений в условиях преднамеренных помех с использованием программной модели конфликта, построенной в соответствии с рассмотренной методикой.

Ключевые слова — конфликт сложных радиотехнических систем, методы моделирования, радиоэлектронный конфликт, моделирование конфликта.

Введение

Центральной задачей при разработке методического аппарата обоснования требований к системам различного назначения является построение адекватной и достоверной математической модели объекта исследования. Особое значение такие модели приобретают при разработке сложных конфликтно-устойчивых систем, предназначенных для функционирования в условиях динамического взаимодействия (конflikта) при слабо предсказуемом поведении противоположной (конфликтующей) стороны. К числу таких систем относятся сложные радиотехнические системы, функционирующие в условиях радиоэлектронного конфликта, обусловленного ведением одной из конфликтующих сторон радиоэлектронного противодействия [1, 2].

Наиболее распространенные методы моделирования конфликтного взаимодействия [3–5] могут быть объединены в три группы. Первая группа —

аналитические методы, использующие модели дискретных и дискретно-непрерывных марковских (полумарковских) процессов, и связанные с ними методы теории систем массового обслуживания. Вторая группа — методы прямого имитационного моделирования, использующие как простейшие приемы теории статистических испытаний, так и функционально ориентированные программные комплексы. Третья группа — комбинированные методы моделирования, а также специально разработанные методы, не относящиеся в полной мере ни к аналитическим, ни к имитационным. Типичным представителем таких методов является математический аппарат теории сетей Петри и его многочисленные разновидности [6, 7].

В то же время к настоящему времени не выработано единых научно обоснованных рекомендаций по способам формализации логико-событийных моделей функционирования сложных систем в условиях конфликтного взаимодействия. Поэтому была предпринята попытка разработать

математический аппарат построения исследовательских моделей функционирования конфликтующих систем, основанный на использовании базовых понятий сетей Петри [7] и метода описания параллельных развивающихся стохастических процессов [4], ориентированный на описание радиоэлектронного конфликта.

Методический аппарат построения моделей функционирования конфликтующих радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов

Рассмотрим основные положения предлагаемого методического аппарата на примере разработки модели конфликта некоторой системы радиосвязи (СРС, сторона А) и противодействующего ей комплекса радиопротиводействия (КРП, сторона Б). Несмотря на возможные отличия объектов моделирования, а также целей проводимых исследований, построение искомого формализованного описания разрабатываемой модели в общем случае предполагает проведение следующих трех этапов разработки.

Первый этап — анализ состава, структуры конфликтующих систем и механизма их взаимного влияния в динамике функционирования с целью сформировать обобщенную схему исследуемого конфликта. Эта схема должна содержать полный перечень подсистем исследуемых систем и все основные их внутренние и внешние взаимосвязи. Вариант такой схемы радиоэлектронного конфликта подавляемой СРС, осуществляющего постановку ей преднамеренных помех КРП с обозначением основных функциональных подсистем конфликтующих сторон и направлений передачи информации, существенной для их поведения, представлен на рис. 1.

Сущность исследуемого конфликта состоит в стремлении КРП сорвать или, по крайней мере, задержать передачу информации в СРС, создавая преднамеренные помехи ее средствам при стремлении СРС максимально снизить эффективность этих помех. Осуществляется это в СРС путем принятия адекватных мер помехозащиты с целью обеспечить передачу информации в условиях действия помех, создаваемых КРП, с минимальной задержкой. Выбранная степень детализации конфликта обусловлена наличием у конфликтующих сторон соответствующих функционально законченных и относительно обособленных подсистем, каждая из которых образована соответствующими средствами и играет свою определенную роль в конфликте.

Известно, что для выбора и постановки эффективных помех в состав типового КРП кроме соб-

ственно средств постановки помех входят средства контроля и анализа радиосигналов подавляемой СРС и средства управления постановкой помех [8]. При этом СРС для принятия адекватных мер помехозащиты может располагать средствами контроля качества связи и оценки помеховой обстановки и иметь возможность управлять своими средствами связи в ходе их использования [9].

Второй этап — формальное описание моделируемого конфликта. Для этого предлагается использовать метод описания параллельных развивающихся стохастических процессов, который может рассматриваться как модификация математического аппарата теории сетей Петри [7]. Методика построения модели предполагает представление процесса конфликтного взаимодействия динамической сетевой структурой, образованной из подсетей (сепарантов), описывающих функционирование подсистем конфликтующих систем и связанных между собой управляемыми переходами.

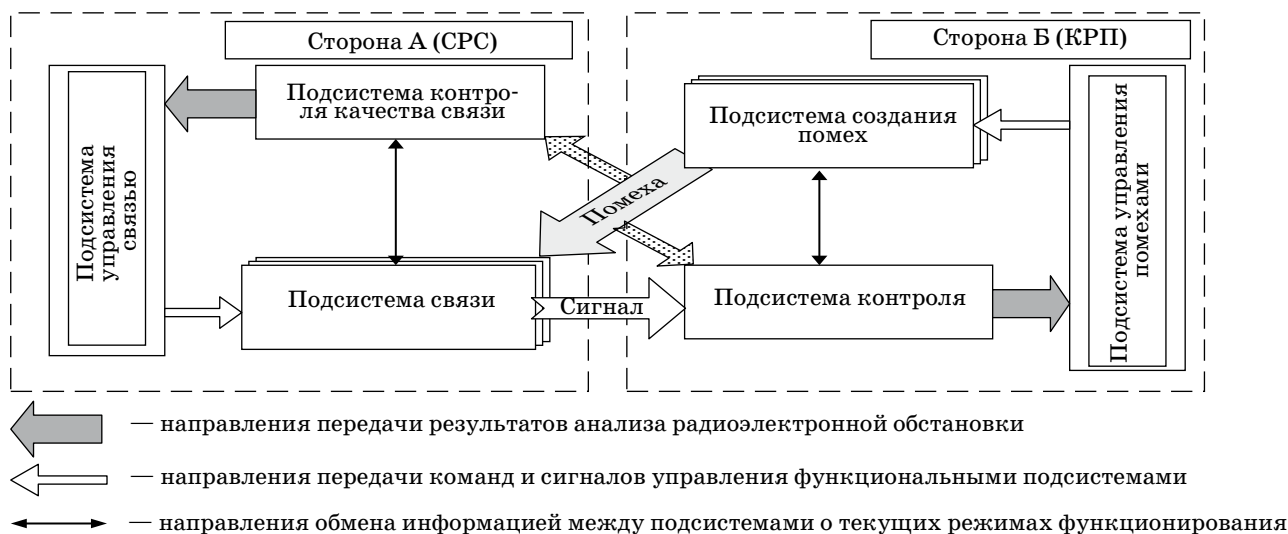
Построение модели конфликта включает следующие основные формальные логико-математические операции:

— *агрегирование процесса конфликта* — разбиение моделируемых конфликтующих систем в соответствии с их структурой на функциональные подсистемы с последующим представлением процесса функционирования каждой подсистемы в виде динамических стохастических подсетей (графов), состоящих из конечного числа дискретных состояний, в соответствии с логикой функционирования моделируемых подсистем;

— *структурную композицию модели конфликта* — объединение всех описывающих функциональные подсистемы конфликтующих сторон подсетей в единую сетевую структуру типа сети Петри с управляемыми переходами, а также задание определенной логики и параметров срабатывания управляемых переходов связанных друг с другом подсетей;

— *настройку модели конфликта* — логико-структурный анализ и коррекцию параметров модели в процессе имитации динамики функционирования подсистем с целью достичь соответствия поведения полученной модели поведению моделируемой системы в целом. Имитация функционирования заключается в установке индикаторов активности запускающих состояний и переходов сети в состояние активности (начальная разметка) и дальнейшем перемещении этих индикаторов по сети с течением модельного времени в соответствии с логикой срабатывания управляемых переходов и структурой сети до момента достижения ими состояния конечной разметки.

В результате проведенного анализа вариантов выполнения операции агрегирования процесса



■ Рис. 1. Обобщенная схема конфликта «СРС—КРП»

радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП», описываемого обобщенной моделью на рис. 1, была получена совокупность подсетей, которые описывают функционирование подсистем конфликтующих сторон и представлены в виде структурных схем в таблице.

Все состояния приведенных в таблице подсетей соответствуют определенным процессам или событиям, происходящим при функционировании моделируемой подсистемы, представленной средствами СРС или КРП. Выбор совокупности таких состояний и их смыслового содержания на начальном этапе агрегирования процесса конфликта осуществляется исследователем на основе сложившегося у него представления об алгоритме функционирования объектов моделирования, знания присущих этим объектам свойств, характеристик и особенностей поведения. На этом этапе необходимо стремиться к наиболее полному и подробному описанию состояний моделируемых подсистем и представлению их в соответствующих подсетях, учитывая даже незначительные на первый взгляд детали. Отсев «лишней» информации, привлекаемой для формирования подсетей, будет осуществляться естественным путем в процессе последующих этапов структурной композиции и настройки модели конфликта.

Состояния подсетей связываются переходами различных типов в соответствии с логикой поведения моделируемого объекта, а также объектов, оказывающих на него прямое или косвенное влияние. Каждый такой переход обеспечивает функцию перемещения индикатора активности состояний из одного состояния в другое при условии выполнения присвоенного этому переходу логического правила (логической функции). В область

определения логического правила (функции) перехода могут входить значения активностей состояний и переходов исходной подсети и взаимодействующих с ней подсетей, а также текущее состояние и значения основных используемых параметров модели, например модельное время.

Все многообразие переходов синтезируемых подсетей может быть построено с использованием следующих семи базовых типов переходов γ_{ij}^k из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети.

1. Ординарный переход:

$$\gamma_1 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } r_i^k = 1; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $r_i^k \in \{0, 1\}$ — индикатор активности i -го состояния (управляющего) для k -й подсети.

2. Множественный переход:

$$\gamma_2 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } R_{ij}^k \in \tilde{R}(t_m); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где R_{ij}^k — разметка множества состояний общей модели, разрешающая переход из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети; $\tilde{R}(t_m)$ — текущая разметка множества активных состояний общей модели; t_m — текущее модельное время.

3. Детерминированный замедляющий переход:

$$\gamma_3 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (\Delta t_i^k \geq \Delta_{ij}^k); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где Δt_i^k — продолжительность активности i -го состояния k -й подсети; Δ_{ij}^k — интервал времени замедления, необходимый для перехода из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети.

■ Перечень подсетей модели конфликта «СРС—КРП»

Название подсистемы	Структурная схема подсети	Состав состояний подсети
Подсистема создания помех		<p>S_{11} — исходное состояние S_{12} — режим ожидания (пауза для работы подсистемы контроля) S_{13} — режим постановки помех (подавления)</p>
Подсистема контроля		<p>S_{21} — исходное состояние S_{22} — контроль излучений S_{23} — обнаружение факта связи S_{24} — подтверждение эффективности подавления S_{25} — определение параметров связи S_{26} — параметры связи не определены S_{27} — обнаружение факта принятия мер помехозащиты S_{28} — факт связи не обнаружен</p>
Подсистема управления помехами		<p>S_{31} — исходное состояние S_{32} — анализ результатов контроля излучений и принятие решения на подавление S_{33} — принятие правильного решения по подавлению связи S_{34} — принятие неправильного решения по подавлению связи S_{35} — оставить предыдущее решение по подавлению связи без изменений S_{36} — решение не подавлять связь</p>
Подсистема связи		<p>S_{41} — исходное состояние S_{42} — передача информации S_{43} — информация передана (финальное состояние) S_{44} — передача информации невозможна вследствие действия помех S_{45} — принимаются меры помехозащиты</p>
Подсистема контроля качества связи		<p>S_{51} — исходное состояние S_{52} — контроль излучений S_{53} — обнаружение факта помех S_{54} — качество связи нормальное S_{55} — параметры помех определены S_{56} — параметры помех не определены S_{57} — контроль принимаемых мер помехозащиты</p>

■ Окончание таблицы

Название подсистемы	Структурная схема подсети	Состав состояний подсети
Подсистема управления связи	<pre> graph TD S61((S61)) -- P61 --> S62((S62)) S62 -- P62 --> S63((S63)) S63 -- P63 --> S64((S64)) S64 -- P64 --> S65((S65)) S65 -- P65 --> S61 S65 -- P66 --> S61 S65 -- P67 --> S61 S61 -- P68 --> S63 </pre>	<p>S_{61} — исходное состояние S_{62} — анализ результатов контроля излучений и оценка помеховой обстановки S_{63} — решение принять правильные меры помехозащиты S_{64} — решение принять ошибочные меры помехозащиты S_{65} — оставить предыдущее решение по мерам помехозащиты</p>

4. Стохастический замедляющий переход — аналогичен детерминированному замедляющему переходу, но временной параметр перехода является случайной величиной и имеет закон распределения W с параметрами $d_i(t_m)$, $i = 1, 2, \dots, n$:

$$\gamma_4 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (\Delta t_i^k \geq \tilde{\Delta}_{ij}^k(W[d_1(t_m), \\ & d_2(t_m), \dots, d_n(t_m)])); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\tilde{\Delta}_{ij}^k(W[x])$ — случайный временной параметр перехода из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети с законом распределения $W[x]$. В общем случае ограничения на вид закона распределения не накладываются, а его функция распределения вероятностей может быть задана аналитически.

5. Параметрический переход:

$$\gamma_5 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } F(\mathbf{D}(t_m), \Delta t_i^k) \geq d_{ij}^k(t_m); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $F(\mathbf{D}(t_m), \Delta t_i^k)$ — некоторая функциональная зависимость от вектора параметров модели $\mathbf{D}(t_m)$ и длительности активности i -го состояния в k -й подсети Δt_i^k ; $d_{ij}^k(t_m)$ — заданный параметр параметрического перехода.

6. Синхронизирующий переход:

$$\gamma_6 = \gamma_{ij}^k = F_{ij}^k(\Gamma_A, \tilde{R}(t_m)),$$

где $F_{ij}^k(\Gamma_A, \tilde{R}(t_m))$ — некоторая булева функция для i -го и j -го состояний k -й подсети, в качестве аргументов которой выступают текущая активная разметка общей модели $\tilde{R}(t_m)$ и множество активных переходов Γ_A , для которых выполнены условия запускающей разметки.

7. Вложенный переход:

$$\gamma_7 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (r^\xi = 1); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где r^ξ — финальное состояние некоторой произвольной подсети ξ , определяющей функциональную взаимосвязь i -го и j -го состояний k -й подсети.

Анализ приведенных типов переходов показывает, что часть из них ($\gamma_1, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_7$) предназначена для автономного функционирования обособленных подсетей, так как областью их определения являются только «внутренние» характеристики и свойства моделируемых подсистем. Другая же часть ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$), напротив, содержит ссылки на характеристики, свойства и поведение смежных подсетей моделируемых подсистем и выступает в качестве основных соединительных элементов объединенной модели исследуемой сложной системы при реализации параметрической и структурной композиции ее отдельных подсистем. Исходя из этого сущность этапа структурной композиции модели конфликта можно определить как объединение подсетей в сетевую структуру типа сети Петри с выбором (подбором) параметров переходов типа ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$) в каждой из имеющихся подсетей. На последующем этапе настройки параметров модели конфликта происходит уточнение параметров переходов подсетей как первого ($\gamma_1, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_7$), так и второго ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$) типа.

Таким образом, второй этап исследования включает реализацию двух процедур: создания требуемого множества частных моделей подсистем в виде графовых форм (подсетей) и композиции полученных графовых форм (подсетей) в единую сетевую структуру модели путем задания требуемых типов и параметров переходов.

Третий этап — разработка на основе сформированной модели программы моделирования на ЭВМ (программной модели), уточнение этой программы и самой модели в процессе предваритель-

ного изучения характера ее поведения при типовых исходных данных и проведение численных расчетов (экспериментов) на ЭВМ с помощью созданной программы.

Численные эксперименты при исследовании с помощью разработанной программы радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП» рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) формируются наборы исходных данных, содержащих динамические и статические характеристики моделируемых процессов функционирования СРС и КРП;
- 2) путем выбора характеристик и состава структурных компонентов модели задаются различные способы применения КРП и различные способы организации связи в СРС в условиях отсутствия и воздействия преднамеренных помех;
- 3) осуществляется предварительный прогон модели в условиях отсутствия преднамеренных помех в целях определения эталонных значений параметров моделируемой СРС;
- 4) назначается количество прогонов модели в условиях воздействия преднамеренных помех, создаваемых КРП для подавления моделируемой СРС;
- 5) проводится назначенное число прогонов модели в условиях воздействия преднамеренных помех;
- 6) производится статистическая обработка выборок, полученных в результате всех прогонов модели;

7) проводится анализ результатов обработки полученных выборок.

Пример разработки модели радиоэлектронного конфликта системы радиосвязи и комплекса радиопротиводействия

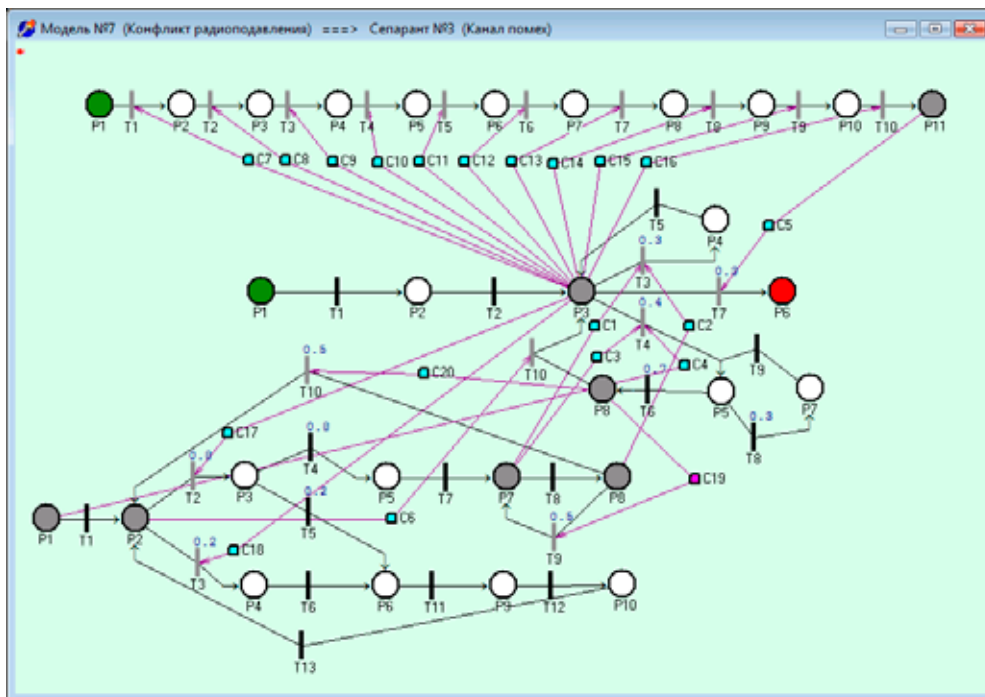
В качестве основного исследуемого параметра при моделировании радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП» было выбрано время задержки T_3 передачи в СРС в ходе сеанса связи типового сообщения фиксированного объема, рассчитываемое по формуле

$$T_3 = T_c - T_{c0}, \quad (1)$$

где T_c — длительность сеанса связи в условиях действия преднамеренных помех; T_{c0} — стандартная длительность сеанса связи в отсутствие помех.

В соответствии с рассмотренным математическим аппаратом на языке Delphi была разработана программная модель конфликта «СРС—КРП». Интерфейс программной модели в одном из режимов работы показан на рис. 2.

При моделировании сеансов связи использовался метод статистических испытаний Монте-Карло. Величина стандартной длительности сеанса связи T_{c0} определялась как эталонный параметр по результатам прогона модели в условиях отсутствия преднамеренных помех и полагалась



■ Рис. 2. Интерфейс программной модели конфликта «СРС—КРП»

постоянной. В процессе моделирования были получены выборки случайной величины T_c , по которым методами статистической обработки определялись вид и параметры законов распределения случайной величины T_3 . Вид законов распределения определялся по выборке ограниченного объема с помощью методики топографической идентификации [10], в соответствии с которой для идентификации класса закона распределения выборки достаточно вычислить энтропийный коэффициент и контрэксцесс выборки.

Анализ результатов моделирования, проведенного с использованием разработанной программной модели конфликта, показал, что для случайной величины $x = T_3$ наиболее статистически близким явилось гамма-распределение с параметрами $\alpha \geq 0$ и $\lambda \geq 0$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция.

Моделирование показало близкую к прямо пропорциональной зависимость математического ожидания времени задержки передаваемого сообщения в условиях помех от параметра α закона распределения (2) даже при значительных изменениях величины λ , что иллюстрирует рис. 3, на котором приведены полигоны распределения выборок случайной величины $x = T_3$ [мин] для различных значений параметров модели (α и λ).

Анализ поведения параметра α при вариации исходных данных показал практически линейную зависимость этого параметра от отношения среднего времени реакции подавляемой линии связи $\bar{\tau}_c$ к среднему времени реакции канала помех $\bar{\tau}_\Pi$:

$$\alpha \approx a \frac{\bar{\tau}_c}{\bar{\tau}_\Pi}. \quad (3)$$

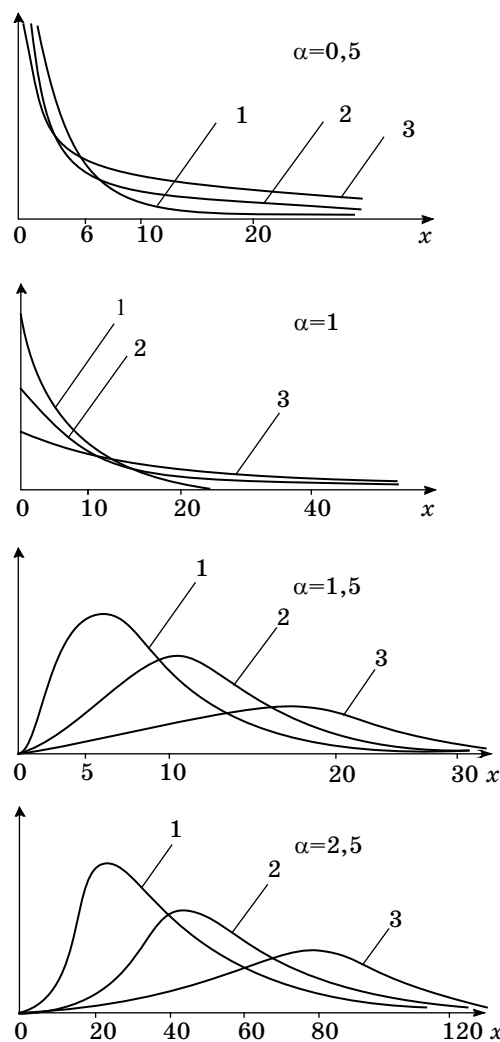
Анализ поведения параметра λ для разных наборов исходных данных модели показал обратно пропорциональную зависимость этого параметра от средней продолжительности сеанса связи в условиях отсутствия помех:

$$\lambda \approx b \frac{1}{T_{c0}}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) a и b — коэффициенты пропорциональности.

С учетом вида функции (2) и формул (3) и (4) математическое ожидание времени задержки T_3 может быть записано в следующем виде:

$$\bar{x} = \bar{T}_3 = \frac{\alpha}{\lambda} \approx \bar{T}_{c0} \frac{\bar{\tau}_c}{\bar{\tau}_\Pi} \frac{a}{b}. \quad (5)$$



■ Рис. 3. Полигоны распределений $f(x)$, полученных в результате моделирования выборок времени задержки для различных значений параметров гамма-распределения: 1 — $\lambda = 0,1$; 2 — $\lambda = 0,05$; 3 — $\lambda = 0,025$

Последующий анализ результатов моделирования с привлечением дополнительных учитываемых факторов, таких как P_c — вероятность ошибки управления подсистемой связи в условиях помех, P_Π — вероятность ошибки управления подсистемой создания помех в условиях принятия подсистемой управления связью мер помехозащиты, β — отношение средней пропускной способности линии связи в условиях помех к аналогичной характеристике в условиях отсутствия помех, позволил уточнить вид и параметры выражения (5) для математического ожидания времени задержки T_3 .

Окончательный вид аналитического представления математического ожидания времени задержки по результатам моделирования:

$$\bar{x} = \bar{T}_3 = \bar{T}_{c0} \times \left(\frac{a' \bar{\tau}_c (1-\beta)(1+P_c)(1-P_{\Pi})^{\gamma_{\Pi}}}{\bar{\tau}_{\Pi} (1-P_c)^{\gamma_c} (1+P_{\Pi}) + \bar{\tau}_c \beta (1+P_c)(1-P_{\Pi})^{\gamma_{\Pi}} + b'(1-\beta)} \right), \quad (6)$$

где $\gamma_{\Pi} = \frac{\bar{\tau}_{\Pi}}{(\bar{\tau}_{\Pi} + \bar{\tau}_c)}$; $\gamma_c = \frac{\bar{\tau}_c}{(\bar{\tau}_{\Pi} + \bar{\tau}_c)}$; a' и b' — коэффициенты пропорциональности, позволяющие адаптировать выражение (6) для различных СРС и видов связи (в частности, для телефонии авто-

рамами найдены следующие значения: $a' = 0,6$; $b' = 0,1$; для телеграфии: $a' = 0,8$; $b' = 0,01$.

Выражение (6) учитывает все основные характеристики конфликтующих систем и отражает характер их влияния на показатель эффективности функционирования КРП. Использование выражения (6) на практике позволяет достаточно просто и с точностью не хуже 5—10 % по сравнению с экспериментальными данными решать задачи обоснования требований к наиболее важным характеристикам КРП, используемых для подавления СРС, или наоборот, требований к СРС при условии их функционирования в различной помеховой обстановке, в том числе при воздействии КРП.

Применение предложенного математического аппарата позволяет разрабатывать формальные модели сложных систем без значительного увеличения размерности, что является одной из проблем исследования больших технических систем. Мету такого выигрыша можно продемонстрировать на рассмотренном примере модели радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП». Число используемых для расчетов состояний в сетевой структуре модели оценивается величиной $N_1 = 3 + 8 + 6 + 5 + 7 + 5 = 34$ (здесь каждое слагаемое соответствует числу состояний подсетей, приве-

денных в таблице). Для сравнения: для построения аналогичной по своим описательным возможностям модели с использованием аппарата марковских (полумарковских) процессов [6] требуется исследовать стохастическую сеть с числом состояний не менее $N_2 = 3 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 5 = 25\,200$ (здесь множителям также соответствуют числа состояний подсетей, приведенных в таблице). Несмотря на оценочный характер полученных значений N_1 и N_2 , очевидно, что для них всегда выполняется соотношение $N_1 \ll N_2$.

Заключение

Предложенный подход к моделированию процесса функционирования конфликтующих систем на основе методологии описания параллельных развивающихся стохастических процессов за счет введения управляемых переходов между подсетями позволяет добиться значительного уменьшения влияния на конечный результат ошибок декомпозиции исследуемой системы на подсистемы, в том числе при описании систем с многоуровневой иерархической структурой и распределенной активностью подсистем.

Рассмотренная методология ориентирована на применение данного подхода для моделирования сложных радиотехнических систем, функционирующих в условиях радиоэлектронного конфликта. При этом основные приемы и формальные логико-математические операции (агрегирование процесса конфликта, структурная композиция модели конфликта и настройка модели конфликта) достаточно структурированы, что позволяет их алгоритмизировать и использовать при разработке универсальных интеллектуальных систем автоматизированного проектирования моделей сложных систем для решения широкого класса исследовательских задач.

Литература

1. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. — М.: Радио и связь, 1989. — 288 с.
2. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. — М.: Вузовская книга, 2003. — 528 с.
3. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование: Теория и технологии. — М.: Альтекс, 2004. — 384 с.
4. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
5. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

6. Протасов И. Д. Теория игр и исследования операций. — М.: Гелиос АРВ, 2006. — 342 с.
7. Вирбицкайте И. Б. Сети Петри: модификации и расширения. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 2005. — 123 с.
8. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. — М.: Вузовская книга, 2011. — 800 с.
9. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. — М.: РадиоСофт, 2008. — 260 с.
10. Карманов Ф. И., Острейковский В. А. Статистические методы обработки экспериментальных данных. — М.: Высш. шк., 2012. — 208 с.