

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 004.942

А. А. Сирота, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: sir@cs.vsu.ru,
Н. И. Гончаров, аспирант, e-mail: nikigoncharov@ya.ru,
Воронежский государственный университет

Моделирование конфликтного взаимодействия систем с использованием формализма гибридных автоматов

Рассмотрены математические и компьютерные модели конфликтного взаимодействия систем на основе формализма гибридных автоматов (карт состояний). Предложены типовые математические схемы и реализующие их имитационные модели, основанные на описании смены состояний в условиях конфликта. Получены аналитические соотношения для оценки нижней границы вероятности выигрыша одной из сторон в конфликте, позволяющие абстрагироваться от конкретного вида плотностей распределений для времени пребывания сторон в своих возможных состояниях. Приведены результаты сравнения полученных оценок с результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: конфликтное взаимодействие систем, гибридные автоматы, карты состояний, моделирование конфликта коалиций систем

Введение

В современных условиях функционирование сложных систем характеризуется наличием различного рода конфликтных взаимодействий. Основные идеи современной теории конфликта [1–11] состоят в построении концептуальной модели, связывающей действующие объекты и факторы и направленной на установление закономерностей рационального поведения сторон в условиях конфликта. Для этого в подобной модели всегда в той или иной форме реализуется представление конфликта в виде графа, описывающего набор возможных состояний систем и допустимые переходы между ними. В известных работах рассматриваются различные подходы к математическому моделированию конфликта систем: на основе аппарата сетей Петри [6], теории игр [7], теории активных систем [8], вероятностных сетей [9], теории динамических систем [10] и др.

Плодотворным подходом для построения математической и компьютерной модели конфликта является использование аппарата полумарковских случайных процессов (ПСП), естественным образом интегрируемого с графовыми представлениями состояний систем [2–5, 11–13]. Тем не менее при построении моделей на основе ПСП действует принципиальное ограничение: необ-

ходимо в явном виде задавать плотности распределения вероятностей для времени нахождения систем в своих состояниях. Часто эти плотности являются неизвестными, что приводит к необходимости проведения анализа для нескольких вариантов распределений, которые также до конца не обоснованы с физической точки зрения [12]. Еще одним ограничением подхода ПСП к моделированию конфликта является сложность его применения для коалиций систем, поскольку это неминуемо ведет к возрастанию числа рассматриваемых состояний и делает затруднительным аналитическое описание.

Естественным выходом в этой ситуации представляется использование средств компьютерного имитационного моделирования (ИМ), основанных на использовании иерархических объектных представлений, обеспечивающих описание конфликта в его естественном виде и возможность простой модификации моделей при изменении структуры систем и состава их коалиций [14]. Такие возможности, на наш взгляд, предоставляет формализм гибридных автоматов (ГА) и его многочисленные реализации в современных средствах ИМ. Их главной особенностью является представление каждого объекта — участника конфликта в виде диаграммы (карты) состояний, отражающих поведение этого объекта. Причем для

описания процессов здесь необязательно вводить свойство полумарковости или использовать статистическое представление. Смена состояний или взаимодействие с другими объектами в ГА осуществляется путем генерации и передачи событий (сообщений), фиксирующих достижение того или иного результата. Такой подход обеспечивает более широкие возможности создания объектно-ориентированных моделей конфликта и, прежде всего, при участии с каждой стороны нескольких объектов (конфликт коалиций), а также введение в модели элементов управления, реализующих те или иные стратегии. При реализации моделей конфликта на основе ПСП требуется вводить так называемые конфликтно-обусловленные состояния, общие для всех объектов системы, что, как уже упоминалось выше, вызывает трудности реализационного характера при разрастании числа состояний.

Целью данной работы является обоснование типовых математических схем конфликтного взаимодействия систем и реализующих их компьютерных имитационных моделей, основанных на использовании формализма ГА. В рамках предложенных схем математического моделирования решается задача получения соотношений для оценки нижней границы вероятности выигрыша сторон в конфликте, исследование которых позволяет определить область их применения и обосновать необходимость перехода к ИМ в конкретных случаях.

1. Математическое описание конфликта на основе гибридных автоматов

Будем придерживаться стандартного представления процесса функционирования системы как процесса смены состояний, в каждом из которых система может находиться в течение определенного времени, затрачиваемого на выполнение некоторой "работы" (подпроцесса). Переходы из одного состояния в другое рассматриваются как события, которые происходят мгновенно (за бесконечно малое время) и фиксируют скачкообразное изменение состояний, т. е. завершение одной работы, сопровождающееся изменением "статуса" объекта, и переход к выполнению другой. Согласно [15—17] гибридным автоматом (ГА) называется кортеж

$$H = \langle T, S^D, S^C, SC, I_0, D_m, F, Pr\ ed, Alg \rangle. \quad (1)$$

В выражении (1) используются следующие обозначения: T — множество моментов времени; S^D — множество дискретных переменных, представляющих режимы функционирования ГА со значениями, принадлежащими Q , где Q — мно-

жество символов, определяющих возможные дискретные состояния (режимы работы ГА); $S^C = \{x_k, k = \overline{1, n}\}$ — множество вещественных переменных $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$, являющихся аргументами или значениями непрерывных функций, описывающих локальное поведение ГА для каждого дискретного состояния; $SC = \{Q, E\}$ — граф с множествами узлов, представляющих режимы работы ГА $Q = \{q_i, i = \overline{1, N}\}$, и ориентированных дуг $E = \{(q_i, q_j), i, j = \overline{1, N}\}$, определяющих возможные переходы; $I_0 \subseteq Q \times T \times R^n$ — множество начальных состояний для инициализации локального поведения в узлах; $D_x \subseteq Q \times T \times R^n$ — множество, определяющее допустимую область изменения непрерывных переменных S^C для каждого режима; $F : T \times Q \times R^n \rightarrow R^n$ — функция дискретных и непрерывных переменных, определяющая характер изменения непрерывных переменных во времени и описывающая локальное поведение при нахождении в каждом дискретном состоянии; $Pr\ ed = \{pr_i\}$ — множество предикатов, каждый из которых есть отображение $pr_i : T \times Q \times R^n \rightarrow \{false, true\}$, определяющее условия перехода к новому локальному поведению; $Alg = \{a\ lg_j\}$ — множество алгоритмов, каждый из которых есть отображение вида $a\ lg_j : Q \times R^n \rightarrow Q \times R^n$, и которые реализуются мгновенно и трактуются как действия, необходимые для подготовки нового локального поведения.

Под состоянием ГА понимают пару $\langle q, x \rangle$, которая состоит из значения дискретной переменной $q \in Q$ и точки $x \in D_x(q)$, являющейся значением непрерывной переменной, описывающей локальное поведение. Иногда удобно представить непрерывное состояние, объединив в единый вектор время и другие параметры. Переходы между узлами графа $SC = \{Q, E\}$ определяются приписыванием дугам предикатов и алгоритмов. При описании пары $\langle pr_i(e), a\ lg_j(e) \rangle$ используется символическое представление [15]:

$$Jump(e) = \alpha[\beta]/\gamma, \quad (2)$$

где α — внешнее событие, порождающее переход; $[\beta]$ — "сторожевое" условие, определяющее возможность выполнения перехода; γ — действие или событие, сопровождающее выполнение перехода, включающее подготовку начального состояния для непрерывного локального поведения в новом дискретном состоянии. При задании переходов в (2) необязательно использовать все компоненты. Так, часто удобно выполнить начальную инициализацию непосредственно после завершения перехода при входе в новое состояние.

Моделирование ГА сводится к вычислению последовательности пар, отражающих смену дискретных состояний и интервалы времени пребы-

вания в каждом состоянии при выполнении соответствующей работы (локального поведения):

$$\begin{aligned} \langle q_k, \tau_k \rangle, k = 1, 2, \dots; q_k \in Q, \tau_k = t_k - t_{k-1}, \\ t_k = t : I(x(t) \in Z_x), \tau_k = t_k - t_{k-1}, \\ x(t) = f_k(x(t_{k-1}), x_{t_{k-1}}^t, t), t \in T, \end{aligned} \quad (3)$$

где $t_{k-1} = t_{inp}$ — момент времени очередного входа (возможно, неоднократного) в дискретное состояние q_k ; $t_k = t_{out}$ — момент выхода из дискретного состояния q_k , фиксируемый индикатором достижения вектором непрерывных параметров $I(x(t) \in Z_x)$ заданного подмножества значений Z_x и фактически определяющий условие выполнения перехода [β] в представлении (2); $f_k(x(t_{k-1}), x_{t_{k-1}}^t, t)$ — оператор, задающий локальное поведение в состоянии q_k ; $x_{t_{k-1}}^t$ — траектория, описывающая предшествующие значения вектора x , определяющая локальное поведение на интервале (t_{k-1}, t) , включая стохастические воздействия, описывающие любые возмущения и неопределенности внешнего и внутреннего характера. При моделировании локального поведения могут быть реализованы две стратегии [16—18]:

- детальное моделирование выполняемой в каждом дискретном состоянии работы q_k на основе задания оператора локального поведения (3) конкретного вида, что позволяет зафиксировать значение времени $t_k = t_{out}$ завершения локального поведения, а также достигнутый при выполнении работы результат;
- событийное моделирование на основе метода статистических эквивалентов, при реализации которого в соответствии с заданным законом распределения $p_k(\tau)$ генерируется интервал времени τ_k выполнения работы в дискретном состоянии q_k и событие, отражающее факт успешного или неуспешного завершения работы с вероятностью P_k .

Далее будем ориентироваться на второй способ моделирования, принципиально не ограничивая возможность перехода к детальному представлению. Следует отметить, что допускается использование сложных иерархических ГА, что подразумевает задание внутри дискретных состояний ГА вложенных подавтоматов. Также нет никаких ограничений для использования моделей с параллельно действующими несколькими ГА [16, 17].

1.1. Математическое моделирование конфликта систем.

При использовании ГА для моделирования конфликта систем важно провести типизацию основных схем конфликтных взаимодействий. Первой из предлагаемых схем, которую целесообразно использовать как базовую для построения более сложных моделей, является представленная на рис. 1 модель конфликтного взаимодействия двух близких по функциональной структуре систем с антагонистическими интересами (модель "дуэли"). В ней, как в модели ГА, параллельно действуют два внутренних ГА: автомат A и автомат B . Для них множество $S^D = \{s_a, s_b\}$ представлено двумя дискретными переменными, каждая из которых принимает два значения $s_a \in Q_A = \{L_A, D_A\}$, $s_b \in Q_B = \{L_B, D_B\}$, определяющими состояние "жизни" и "смерти" A и B . Соответственно, формально $Q = Q_A \times Q_B$. Удобно также ввести множества $L = \{L_A, L_B\}$, $D = \{D_A, D_B\}$. Переход в D_A и D_B происходит под влиянием событий $attack_B$ и $attack_A$, формируемых при нахождении в состояниях L_B и L_A соответственно. Выигрыш одной из сторон в конфликте при ее нахождении в состоянии при выходе из L означает переход другой стороны в состояние из D . Состояния из D в данной модели являются поглощающими. Стрелки с черным кружком обозначают начальные состояния L_A, L_B .

Для детального описания поведения сторон предлагается ввести внутреннее описание состояний из множества $L = \{L_A, L_B\}$ в виде вложенных

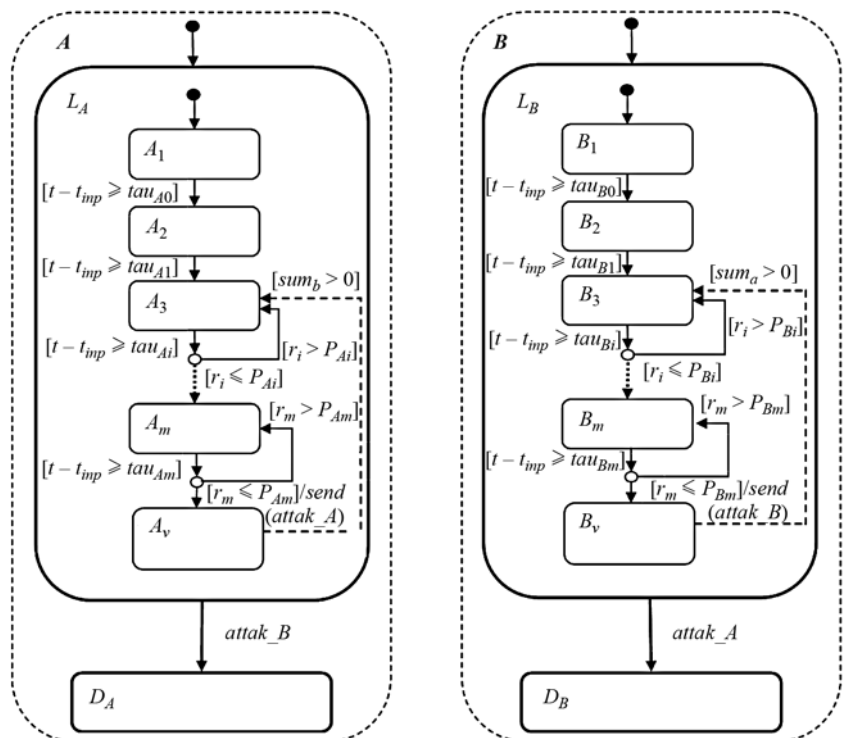


Рис. 1. Представление конфликта систем с использованием ГА

гибридных автоматов, которые будем называть гибридными автоматами активных элементов (ГА АЭ). Такой подход позволяет ввести агрегированное описание перехода в состояния из D . В противном случае, следовало бы ввести все возможные переходы в состояния из D для внутренних состояний ГА АЭ. Постулируется, что каждый АЭ в подобной модели конфликта определяется цепочкой последовательно выполняемых дискретных состояний с вероятностными переходами двух типов: в прямом направлении, задаваемом последовательностью состояний; в обратном направлении (возврат в предшествующие состояния для повторного выполнения работ). Можно показать, что любая последовательность действий в реальной системе может быть приведена к подобной схеме путем декомпозиции и/или агрегации выполняемых в ней действий.

Описание АЭ каждой из сторон (для определенности стороны A) предлагается ввести в рамках математической схемы ГА (1). Типовая структура графов ГА и вложенных ГА АЭ представлена на рис. 1. Для описания вложенных ГА определяются следующие множества и операторы.

1. Множество $S_A^D = \{J_A\}$, состоящее из целочисленной переменной (индекса состояний) J_A , принимающей конечное множество значений, принадлежащих множеству символов дискретных состояний $J_a \in Q_A^L$.

2. Множество Q_A^L — символов, определяющих дискретные состояния ГА АЭ и состоящее из следующих подмножеств $Q_A^L = Q_{Ad}^L \cup Q_{Ap}^L \cup Q_{Av}^L$.

Здесь подмножество $Q_{Ad}^L = \{A_1, \dots, A_p\}$ обозначает символы подготовительных состояний для организации в последующем активной деятельности ГА АЭ, которые выполняются однократно без возврата и повторения (на рис. 1 $p = 2$).

Подмножество $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$ обозначает символы состояний активной деятельности, которые могут выполняться многократно с возвратом и повторением, что отражает вероятностный характер достижения успеха при выполнении соответствующих работ.

Подмножество $Q_{Av}^L = \{A_{m+1} = A_v\}$ состоит из символа одного состояния, называемого критическим (состояние выигрыша). Переход в критическое состояние сопровождается генерацией и пересылкой события $attack_A$, переводящего ГА стороны B из состояния L_B в состояние D_B . Состояние A_v в данной модели является поглощающим. При этом в общем случае для него допустимы переходы в другие внутренние состояния L_A . В любом случае при таком исходе сторона A остается в состояниях из L_A и выигрывает в данной реализации конфликтного взаимодействия.

3. Множество вещественных переменных $S_A^C = \{x_k, k = \overline{1, n}\}$ — $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$, являющихся, наряду с переменной времени $t \in T$ аргументами или значениями непрерывных функций, описывающих локальное поведение ГА для каждого дискретного состояния. В качестве компонентов x предлагается использовать следующие переменные: $x = (\tau, r, u)^T \in R^3$, где τ — время выполнения работы в каждом дискретном состоянии ГА АЭ; r — переменная, характеризующая результат выполнения работы, которая может принимать как конечное число значений, так и значения на множестве вещественных чисел; u — переменная, характеризующая интервал времени, остающийся до завершения работы и нахождения в данном состоянии. При этом множество $D_x \subseteq R^4$.

4. Множество начальных состояний ГА $I_{0,A} = \{L_A\}$ и множество начальных состояний соответствующего ГА АЭ $I_{0,L_A} = \{A_1\} \times T \times R^n$. В иерархической схеме ГА переход в начальное состояние $I_{0,A} = \{L_A\}$ означает переход в начальное состояние вложенного ГА АЭ $I_{0,L_A} = \{A_1\} \times T \times R^n$.

5. Оператор локального поведения предлагается задавать для каждого состояния ГА АЭ на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} x(t) &= (\tau(t), r(t), u(t))^T = f(x(t_{k-1}), t); \\ t_{k-1} &= t_{inp}, \quad x(t_{k-1}) = (\tau_k, r_k, t_{k-1} + \tau_k)^T, \\ (\tau_k, r_k)^T : P_{Ak}(\tau, r) &= P_{Ak}(r/\tau)P_{Ak}(\tau), \quad \tau(t) = \tau_k, \\ r(t) &= r_k, \quad u(t) = u(t_{k-1}) - t, \quad t \geq t_{k-1}, \\ t_{out} &= t_k = t : I(u(t) = 0), \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_{Ak}(\tau, r)$ — совместная плотность распределения τ и r , которые в общем случае являются статистически зависимыми случайными величинами. В соответствии с (4) сначала на основе плотности $P_{Ak}(\tau)$ генерируется интервал времени τ_k пребывания в данном состоянии. Далее на основе условной плотности $P_{Ak}(r/\tau_k)$ формируется значение r_k , определяющее результат, достигаемый после выполнения работы.

6. Для каждого из состояний подмножества $Q_{Ad}^L = \{A_1, \dots, A_p\}$ переход в следующее состояние при $t \geq t_{k-1}$ задается на основе сторожевого условия при $pr_k(e) : I(u(t) = 0) = true$ или в соответствии с (2) как $[t - t_{k-1} \geq \tau_k]$ (на рис. 1 обозначение $[t - t_{inp} \geq \tau_{Ak}]$). При этом действие γ , сопровождающее переход и предусматривающее согласно (2) выполнение алгоритма инициализации нового локального поведения для следующего состояния из $Q_{Ad}^L = \{A_1, \dots, A_p\}$, не задается. В данной схеме

его удобно выполнить сразу при входе в новое состояние путем задания начальных значений переменных в соотношениях (4).

Для каждого состояния подмножества $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$ переход в следующее состояние при $t \geq t_{k-1}$ осуществляется при выполнении сторожевого условия $pr_k(e): I(u(t) = 0) \wedge I(r(t) \in R_k) = true$, где R_k — множество значений, принадлежность к которому отражает успешное завершение работы. Для каждого состояния подмножества $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$ при $t \geq t_{k-1}$ осуществляется возврат для повторения работы при выполнении сторожевого условия $pr_k(e): I(u(t) = 0) \wedge I(r(t) \notin R_k) = true$. Удобно (см. рис. 1) представить подобные переходы как общий переход в точку ветвления, обозначенную кружком (состояние без времени), если $[t - t_{k-1} \geq \tau_k]$, из которой затем задаются два перехода: переход в следующее дискретное состояние и переход, возвращающий ГА к повторению работы в данном состоянии.

Далее будем рассматривать упрощенный вариант задания исхода $r(t) = r_k$ путем генерации равномерной случайной величины $r_k \in [0, 1]$. Тогда условие перехода в следующее состояние из точки ветвления определяется как $[r_k \leq P_{Ak}]$, а условие возврата как $[r_k > P_{Ak}]$, где P_{Ak} или $P_{Ak}(\tau)$ — вероятность успешного завершения работы, задаваемая в рамках (4).

Действие или событие γ , сопровождающее выполнение переходов для состояний подмножества $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$, как и ранее, не задается, за исключением перехода в критическое состояние, который сопровождается генерацией события $attack_A$ (на рис. 1 обозначение $send(attack_A)$).

Аналогичным образом вводится описание и детализация множеств и операторов для ГА и ГА АЭ стороны B ; при этом необязательно точное совпадение множеств дискретных состояний и других элементов ГА АЭ.

1.2. Оценка нижней границы вероятности выигрыша. Покажем возможность получения нижней границы вероятности выигрыша на основе задания моментов для времени пребывания в каждом дискретном состоянии без знания конкретно вида распределений. Для этого запишем выражение для общего времени пребывания каждого ГА АЭ, например автомата стороны A , в группе состояний $Q_{Ad}^L \cup Q_{Ap}^L = \{A_1, \dots, A_p, A_{p+1}, \dots, A_m\}$, т. е. во всех состояниях за исключением критического. Это время определяется соотношением

$$\tau_a = \sum_{k=1}^p \tau_k + \sum_{k=p+1}^m \sum_{j=1}^{h_k} \tau_{k,j}, \quad (5)$$

где $h_k \in \{1, 2, \dots, \infty\}$ — случайная величина, характеризующая число циклов повторения работы,

выполняемой в состоянии $A_k \in Q_{Ap}^L$ при отсутствии положительного результата на предыдущем цикле; $\tau_{k,j}$ — случайное время выполнения работы на j -м цикле повторения работы.

С учетом (5), считая заданными вероятности $P_{Ak}(\tau) = p_{ak}$ успешного завершения работы в $A_k \in Q_{Ap}^L$, а также учитывая то обстоятельство, что случайные величины, определяющие время пребывания ГА АЭ в состояниях $Q_{Ad}^L \cup Q_{Ap}^L = \{A_1, \dots, A_p, A_{p+1}, \dots, A_m\}$, являются независимыми, запишем выражение для плотности распределения τ_a в виде:

$$\begin{aligned} P_A(\tau_a) &= \sum_{\{h_{p+1}, \dots, h_m\}} P(h_{p+1}, \dots, h_m) P(\tau_a/h) = \\ &= \sum_{h_{p+1}=1}^{\infty} \dots \sum_{h_m=1}^{\infty} \prod_{k=p+1}^m (1 - p_{ak})^{h_k-1} p_{ak} P(\tau_a/h). \end{aligned} \quad (6)$$

В (6) $P(\tau_a/h)$ есть свертка плотностей распределения, описывающая композицию случайных величин (5) для условия, определяемого значением вектора $h = (h_{p+1}, \dots, h_m)^T$, каждая компонента которого отражает число повторяющихся циклов работы в соответствующих дискретных состояниях. Для распределения $h = (h_{p+1}, \dots, h_m)^T$ в (6) используется следующее представление:

$$\begin{aligned} P(h_{p+1}, \dots, h_m) &= \prod_{k=1}^m P(h_k), \quad P(h_k) = (1 - p_{ak})^{k-1} p_{ak}, \\ \sum_{h_k=1}^{\infty} P(h_k) &= \frac{p_{ak}}{1 - (1 - p_{ak})} = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

При использовании аналитического представления для плотностей распределения $P_{Ak}(\tau_k)$, $k = \overline{1, m}$, вычисление свертки $P(\tau_a/h)$ в выражении (6) возможно только приближенно и только численными методами. Далее для оценки вероятностей выигрыша в конфликте необходимо с использованием плотностей $P_A(\tau_a)$ для A и $P_B(\tau_b)$ для B определить:

$$\begin{aligned} P_{Va} &= \Pr(\tau_a < \tau_b) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(u) \left(\int_u^{\infty} P_B(v) dv \right) du, \\ P_{Vb} &= \Pr(\tau_a \geq \tau_b) = \int_{-\infty}^{\infty} P_B(v) \left(\int_u^{\infty} P_A(u) du \right) dv. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим теперь возможность использования фундаментальных неравенств теории вероятностей для получения граничных оценок для вероятностей (7) на основе информации о первом и втором моментах распределений $P_{Ak}(\tau_k)$, $k = \overline{1, m}$, $P_{Bk}(\tau_k)$, $k = \overline{1, m}$. С этой целью определим математические ожидания

$m_a = M[\tau_a]$, $m_b = M[\tau_b]$ и дисперсии $d_a = D[\tau_a] = M[(\tau_a - m_a)^2]$, $d_b = D[\tau_b] = M[(\tau_b - m_b)^2]$, для τ_a и τ_b . Основываясь на выражениях (5)–(7), можно представить выражения для условного относительно $h = (h_{p+1}, \dots, h_m)^T$ математического ожидания $m_a(h)$ и безусловного математического ожидания m_a следующим образом:

$$m_a(h) = M[\tau_a/h] = \sum_{k=1}^p m_{a\tau_k} + \sum_{k=p+1}^m h_k m_{a\tau_k};$$

$$m_a = M[\tau_a] = \sum_{\{h_{p+1}, \dots, h_m\}} m_a(h) \prod_{k=1}^m P(h_k) =$$

$$= \sum_{k=1}^p m_{a\tau_k} + \sum_{k=p+1}^m m_{a\tau_k} \sum_{h_k=1}^{\infty} h_k (1 - p_{ak})^{h_k-1} p_{ak}. \quad (9)$$

Для бесконечной суммы в (9) используем следующее преобразование:

$$\sum_{h_k=1}^{\infty} h_k (1 - p_{ak})^{h_k-1} p_{ak} =$$

$$= p_{ak} \frac{d}{dp_{ak}} \left(-(1 - p_{ak}) \sum_{h_k=1}^{\infty} (1 - p_{ak})^{h_k-1} \right) =$$

$$= p_{ak} \frac{d}{dp_{ak}} \left(-\frac{1 - p_{ak}}{p_{ak}} \right) = \frac{1}{p_{ak}}.$$

Тогда для m_a окончательно получим

$$m_a = M[\tau_a] = \sum_{k=1}^p m_{a\tau_k} + \sum_{k=p+1}^m \frac{m_{a\tau_k}}{p_{ak}}. \quad (10)$$

Выражение для d_a также получим на основе условной и безусловной дисперсии, которую, после громоздких, но несложных преобразований слагаемых можно представить в следующем окончательном виде:

$$d_a = \sum_{k=1}^p d_{a\tau_k} + \sum_{k=p+1}^m \frac{d_{a\tau_k}}{p_{ak}}. \quad (11)$$

Аналогичного вида соотношения получаются для m_b и d_b стороны B .

Рассмотрим возможность получения оценок вероятности выигрыша сторон. В качестве первой из таких оценок целесообразно рассмотреть гауссовское приближение для разности случайных величин $\delta\tau = \tau_a - \tau_b$, учитывая, что в соотношении (5) для τ_a (и аналогично для τ_b) выполняется суммирование независимых случайных величин, часть из которых имеет одинаковое распределение. Тогда такую оценку можно представить как

$$P_{Vag} = \Pr(\tau_a < \tau_b) = \Pr(\delta\tau < 0) =$$

$$= \int_{-\infty}^0 N(u, m_a - m_b, d_a + d_b) du = F\left(-\frac{m_a - m_b}{\sqrt{d_a + d_b}}\right); \quad (12)$$

$$P_{Vbg} = \Pr(\tau_a \geq \tau_b) = 1 - P_{Va};$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x N(v, 0, 1) dv,$$

где $N(u, m, d)$ — обозначение гауссовской плотности распределения вероятностей с соответствующими параметрами.

Помимо этого, целесообразно рассмотреть возможность получения других оценок на основе фундаментальных неравенств теории вероятностей. Пусть для определенности $m_a < m_b$. Рассмотрим цепочку эквивалентных неравенств для разности случайных интервалов времени τ_a и τ_b :

$$\delta\tau = \tau_a - \tau_b < 0;$$

$$\delta\tau - (m_a - m_b) < -(m_a - m_b) = m_b - m_a.$$

Тогда для оценки вероятности события $\delta\tau = \tau_a - \tau_b < 0$ можно использовать неравенство Чебышева [20] в виде:

$$\Pr[|\delta\tau - (m_a - m_b)| < m_b - m_a] \geq 1 - \frac{d_a + d_b}{(m_b - m_a)^2}.$$

Поскольку для исходного неравенства $\delta\tau = \tau_a - \tau_b < 0$ диапазон значений снизу не ограничен, то можно записать следующее выражение для нижней границы вероятности выигрыша:

$$P_{Va} = \Pr[\tau_a < \tau_b] \geq$$

$$\geq \Pr[|\delta\tau - (m_a - m_b)| < m_b - m_a] \geq \quad (13)$$

$$\geq P_{Vbc} = 1 - \frac{d_a + d_b}{(m_b - m_a)^2}.$$

Уточнить оценку P_{Vbc} в (13) можно, если предположить, что плотность распределения композиции $\delta\tau$ является унимодальной. Для этого необходимо, чтобы плотности распределения $P_A(\tau)$ и $P_B(\tau)$ были унимодальны и симметричны. Тогда и плотность композиции $\delta\tau = \tau_a - \tau_b$ будет унимодальной. В этом случае можно усилить (13) на основе неравенства Высочанского — Петунина [20] и получить нижнюю границу для вероятности выигрыша:

$$P_{Va} = \Pr[\tau_a < \tau_b] \geq \Pr[|\delta\tau - (m_a - m_b)| < m_b - m_a] =$$

$$= \Pr[|\delta\tau - (m_a - m_b)| < \rho\sqrt{d_a + d_b}] \geq$$

$$\geq P_{Vbn} = 1 - \frac{4}{9\rho^2} = 1 - \frac{4(d_a + d_b)}{9(m_b - m_a)^2}, \quad (14)$$

$$\rho = \frac{m_b - m_a}{\sqrt{d_a + d_b}} \geq \sqrt{\frac{8}{3}} = 1,6329.$$

Подобная оценка позволяет уточнить результат при достаточных значениях отношения ρ .

1.3. Моделирование конфликта коалиций. Более сложной является задача математического моделирования конфликта коалиций. Данная задача подразумевает наличие групп конфликтно взаимодействующих объектов, действия которых с каждой стороны координируются некоторым органом управления на основе заранее заданного регламента поведения. Процесс конфликтного взаимодействия коалиций, как и ранее, может быть представлен как два параллельно функционирующих ГА: автомата A , состоящего из N_a иерархически вложенных элементарных ГА, и автомата B , состоящего из N_b иерархически вложенных элементарных ГА. Пусть структура каждого вложенного ГА с обеих сторон будет аналогична структуре, представленной на рис. 1. Под коалицией, описываемой автоматом A , будем понимать кортеж

$$A = \langle A^{(1)}, \dots, A^{(N_a)}, disp_a \rangle, \quad (15)$$

где $A^{(i)}, i = \overline{1, N_a}$ — элементарные гибридные автоматы, участвующие в коалиции с данной стороны; $disp_a: T \times Q \times R^n \rightarrow \{1, 2, \dots, N_b\}$ — функция координации, обеспечивающая диспетчерское управление ГА коалиции.

Аналогичным образом вводится коалиция противостоящей стороны, описываемая кортежем элементарных гибридных автоматов и своей функцией координации $B = \langle B^{(1)}, \dots, B^{(N_b)}, disp_b \rangle$. Укрупненное отображение конфликта коалиций с использованием ГА (карт состояний) представлено на рис. 2.

Пусть для автомата $A^{(i)}$ множество $S_i^D = \{s_{a,i}\}$ представлено одной дискретной переменной, каждая из которых принимает два значения $s_{a,i} \in Q_{A_i} = \{L_A, D_A\}$, где L_A определяет состояние "жизни" в условиях отсутствия или наличия конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции, а D_A определяет со-

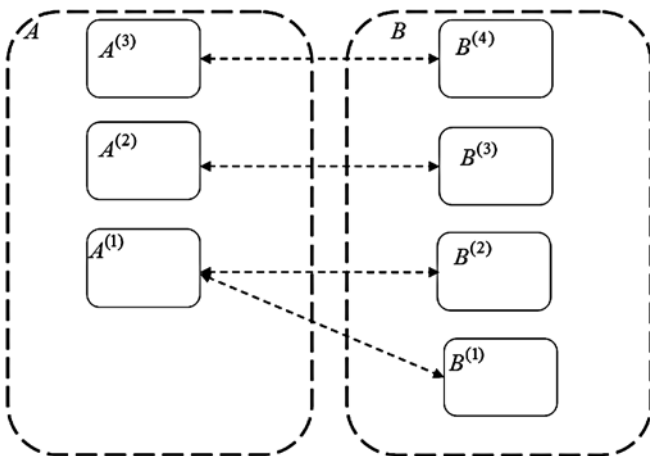


Рис. 2. Графическое отображение конфликта коалиций ГА

стояние "гибели" в результате конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции. Переход в D_A происходит под влиянием события $attak_{B_i}$, генерируемого одним из участников коалиции B .

Все внутренние переходы для ГА АЭ автомата $A^{(i)}$ формируются как и для ранее описанных ГА в дуэльной ситуации (см. рис. 1). Кроме этого, дополнительно вводится переход, показанный на рис. 1 штриховой линией. Этот переход позволяет из состояния A_v (состояние выигрыша) вернуться в первое из состояний группы $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$ — состояний активной деятельности для назначения нового противника из числа элементов противостоящей стороны. Данный переход выполняется при условии

$$[sum_b > 0], sum_b = \sum_{j=1}^{N_b} I_B^{(j)}(s_{b,i} \in L_B), \quad (16)$$

где $I_B^{(j)}(s_{b,i} \in L_B) = 1, I_B^{(j)}(s_{b,i} \notin L_B) = 0$ — индикаторы пребывания ГА $B^{(j)}$ в состоянии L_B , что позволяет фиксировать общее число оставшихся в "живых" элементов коалиции со стороны B .

При вычислении функции координации действий коалиции для каждого ГА АЭ должен быть определен индекс элементарного ГА противостоящей стороны. Данный индекс может формироваться как на основе выбранной стратегии распределения целей для ГА АЭ по результатам анализа дискретных состояний оставшихся в живых элементарных ГА противника, так и на основе анализа координат элементарных ГА в фазовом пространстве состояний, описываемых непрерывными переменными.

Определим для каждого элементарного ГА противостоящей стороны $B^{(i)}$ индикатор $i_{b,j} = I_B^{(j)}(s_{b,j} \in L_B)$ и дополнительно индикатор $i_{ab,j} = I_{AB}^{(j)}(A \rightarrow L_B)$, фиксирующий состояние $B^{(i)}$ как ранее назначенной цели активного воздействия со стороны одного из элементов A (индикатор события "находится под воздействием"). Без принципиального ограничения общности можно использовать функцию координации сторон как отображения вида

$$\begin{aligned} disp_a &: I(S_A^D, S_B^D) \rightarrow \{1, 2, \dots, N_b\}, \\ I_{ab} &= (i_{b,1}, \dots, i_{b,N_b}, i_{ab,1}, \dots, i_{ab,N_b}) \in I(S_A^D, S_B^D); \\ disp_b &: I(S_B^D, S_A^D) \rightarrow \{1, 2, \dots, N_a\}, \\ I_{ba} &= (i_{a,1}, \dots, i_{a,N_a}, i_{ba,1}, \dots, i_{ba,N_a}) \in I(S_B^D, S_A^D), \end{aligned} \quad (20)$$

т. е. как функции, использующие на входе данные только дискретных переменных, определяющих состояния ГА противоборствующих сторон.

В данном случае получение аналитических оценок вероятностей выигрыша сторон существенно затрудняется в силу усложнения модели взаимодействия групп ГА, находящихся под управлением. Оценки, подобные (13)—(15) авторам удалось получить для допущения, согласно которому каждый ГА коалиции в текущее время может взаимодействовать только с одним или с двумя ГА противостоящей стороны, причем при начальном назначении целей в виде элементарных ГА противостоящей стороны, последующее перенацеливание ГА после успешного завершения "дуэли" не выполняется. В итоге использована бернуллиевская схема, в которой оценки вероятности выигрыша для пар или других групп (один с двумя) конфликтующих ГА получены на основе оценок аналогичных (12)—(14). Следует отметить, что общее решение задачи исследования конфликта в данной ситуации лежит, главным образом, в применении технологий ИМ с использованием объектно-ориентированного подхода для описания поведения участников коалиций.

2. Результаты компьютерного эксперимента

Проверку возможностей применения оценок (12)—(14) проводили методом статистического имитационного моделирования при использовании различных видов распределений для времени пребывания систем в своих состояниях. Для реализации ИМ с применением формализма гибридных автоматов была использована среда Matlab + Simulink + Stateflow. Здесь модель конфликта целесообразно строить с использованием

трех вложенных компонентов: главной программы, управляющей проведением статистического эксперимента (*m*-файл), запускаемой из нее *S*-модели (*Simulink*-модели), являющейся оболочкой для объектной *SF*-модели (*Stateflow*-модели) и, собственно, самой *SF*-модели, реализующей представление объектов в виде карт состояний Харела [14].

В рассмотренном ниже примере структура реализованной *SF*-модели конфликта (рис. 3) в целом совпадает со структурой предложенной математической модели и может быть однозначно понята исходя из стандартных обозначений среды. При этом используется следующая физическая интерпретация состояний. Состояния A_1 (A_1) из $Q_{Ad}^L = \{A_1\}$ и B_1 (B_1) из $Q_{Bd}^L = \{B_1\}$ соответствуют однократно выполняемым "работам" доставки и развертывания противоборствующих систем в зону активных действий. Состояния A_2 (A_2) и A_3 (A_3) из $Q_{Ap}^L = \{A_2, A_3\}$ и B_2 (B_2), B_3 (B_3) из $Q_{Bp}^L = \{B_2, B_3\}$ соответствуют "работам", выполняемым с возможным возвратом и повторением. При этом в A_2 и B_2 реализуется обнаружение противника в фазовом пространстве координат и высокоточная оценка этих координат, а в A_3 и B_3 — применение активных элементов для воздействия на противника (информационного или физического). Подобное представление характерно для радиоэлектронных систем в условиях информационного противоборства, например систем радиоэлектронной борьбы [2].

Время пребывания каждой из сторон в своих дискретных состояниях (A_1 , A_2 , A_3 и B_1 , B_2 , B_3) задается путем вызова *m*-функции *pro(...)*, формирующей значение случайной величины, распределенной по заданному закону. Переходы из одного состояния в другое осуществляются по условиям истечения времени пребывания с вероятностями $p_{a2} = pa2$, $p_{a3} = pa3$, $p_{b2} = pb2$, $p_{b3} = pb3$ (для возвратных состояний). Для управления процессами смены состояний вводятся внутренние переменные t_1 , at , t_2 , bt , смысл применения которых ясен из представленной на рис. 3 диаграммы.

Для множества статистических экспериментов, каждый из которых состоял из 1000 испытаний, рассматривались различные комбинации законов распределения, их параметров и вероятностей возврата для повторного выполнения работ. Для наглядности полученные результаты сведены к зависимостям вероятности выигрыша

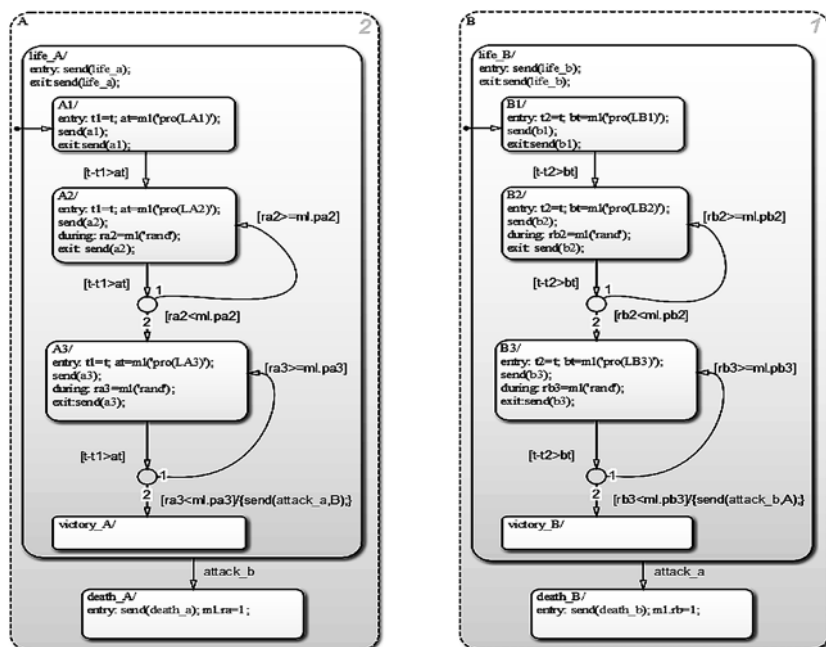


Рис. 3. Карты состояний для описания сторон А и В в *SF*-модели конфликта



Рис. 4. Результаты сравнения полученных оценок с результатами ИМ

от отношения $\rho = (m_b - m_a)^2 / (d_a + d_b)$. На рис. 4, а даны примеры типовых зависимостей, полученные при синхронном изменении вероятностей $p_{a2} = p_{a3}$ в диапазоне 0,70...0,90 с шагом 0,02 и вероятностей $p_{b2} = p_{b3}$ соответственно, меняющихся от 0,30 до 0,10. Математические ожидания и дисперсии для времени пребывания каждой из сторон в своих состояниях задавали одинаковыми $m_{ai} = m_{bi} = 1, i = \overline{1,3}$ и $d_{ai} = d_{bi} = 1, i = \overline{1,3}$ с одним и тем же законом распределения. На рис. 4, б приведены зависимости, полученные для значений математического ожидания m_{a1} , изменяющегося в диапазоне 0,9...6,3 с шагом 0,6. При этом значения вероятностей для возвратных состояний задавались одинаковыми $p_{a2} = p_{a3} = 0,70$ и $p_{b2} = p_{b3} = 0,30$. Математические ожидания и дисперсии для времени пребывания в других состояниях задавались равными $m_{ai} = m_{bi} = 1, i = 2,3, m_{b1} = 1$ и $d_{ai} = d_{bi} = 1, i = 2,3$ и также при одном и том же законе распределения.

Анализ представленных зависимостей показывает, что достаточно точной оказалась нижняя граница, полученная на основе неравенства Высочанского — Петунина, а также оценка, основанная на гауссовском приближении. Физический смысл полученных зависимостей состоит в том, что чем больше значение параметра ρ , характеризующего относительное среднестатистическое различие для времени достижения участниками дуэли своих критических состояний, тем больше вероятность выигрыша. Это говорит о важности фактора времени при реализации упреждающего характера воздействия по сравнению с вероятностью "поражения" на конечном этапе по результатам целеуказания. Если, например, сторона А превосходит В по вероятности "поражения" на завершающем этапе в соотношении 0,95 к 0,70, но при этом В действует в 2 раза более оперативно при измерении координат А, то В имеет более высокую эффективность в усло-

виях конфликта: соотношение числа выигрышей для А и В равно примерно 0,40 и 0,60.

При моделировании конфликта коалиций реализована SF-модель, в которой основные состояния ГА-участников совпадают с показанными на рис. 3. Число систем с каждой стороны может варьироваться (см. рис. 2). Каждой из систем сторон А и В выдается целеуказание в виде индекса системы противоборствующей стороны, которая должна далее находиться под воздействием системы А. При выполнении перехода в состояние *victory_A* фиксируется факт поражения противоборствующей системы В. При проведении статистических экспериментов на основе данной модели также рассматривали различные комбинации исходных параметров. На рис. 4, в приведены примеры зависимостей для конфликта коалиций, состоящих из четырех систем с каждой стороны, полученные для значений вероятностей p_{a3} в диапазоне 0,70...0,90 с шагом 0,02 и вероятностей p_{b3} в диапазоне 0,30...0,14 с шагом 0,02. Значения других вероятностей принимали равными $p_{a2} = 0,70$ и $p_{b2} = 0,30$. Математические ожидания и дисперсии для времени пребывания сторон в своих состояниях задавали одинаковыми и равными единице при одном и том же законе распределения.

Заключение

В целом можно сделать вывод о том, что предложенные в рамках формализма гибридных автоматов математические схемы и реализующие их компьютерные имитационные модели конфликтного взаимодействия систем, а также коалиций систем, обеспечивают наглядные объектно-ориентированные представления, которые целесообразно использовать как базовые для составления более сложных моделей в интересах исследования возникающих на практике ситуаций. Для дуэльного конфликта систем полу-

ченные аналитические соотношения позволяют вычислить оценки вероятности выигрыша в условиях неопределенности вида плотностей распределений для времени пребывания сторон в своих возможных состояниях. Для коалиций систем подобные аналитические оценки могут быть получены для ограниченного круга ситуаций с использованием весьма существенных допущений. Кардинальное решение задачи исследования закономерностей конфликта в данной ситуации лежит, главным образом, в использовании технологий имитационного моделирования с использованием объектно-ориентированного подхода для представления участников коалиций и их поведения. При использовании формализма гибридных автоматов в предложенной реализации это снимает проблему трудоемкости разработки моделей при изменении состава и структуры пространства состояний участников коалиций.

Список литературы

1. Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Информационные конфликты — анализ работ и методологии исследования // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 95—178.
2. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения / Под ред. Ю. Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2013. 232 с.
3. Дружинин В. В., Конторов А. С., Конторов Д. С. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
4. Сухоруков Ю. С., Шляхин В. М. Принципы моделирования динамики взаимодействия сторон в условиях радиолокационного конфликта // Радиотехника. 1992. № 1—2.
5. Будников С. А. Оценка вероятностных показателей в конфликте информационно-управляющих систем // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3 (37). С. 27—31.
6. Радько Н. М., Мокроусов А. Н. Динамическая модель работы адаптированного к помехам радиосредства с использованием сетей Петри // Информация и безопасность. 2009. № 2. С. 257—262.

7. Семисошенко М. А. Управление автоматизированными сетями декаметрового диапазона в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. СПб.: ВАС, 1997. 364 с.
8. Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / Под ред. Д. А. Новикова. М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. 228 с.
9. Коцыняк М. А., Осадчий А. И., Коцыняк М. М., Лаута О. С., Дементьев В. Е., Васюков Д. Ю. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных систем в условиях информационного противоборства. СПб.: ЛО ЦНИИС, 2015. 126 с.
10. Вакуленко А. А., Шевчук В. И. Математическая модель динамики конфликта радиоэлектронных систем // Радиотехника. 2011. № 1. С. 56—59.
11. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. М.: ИПРЖР, 2001. 456 с.
12. Андреев И. А., Будников С. А., Гладков А. В. Полумарковская модель оценки конфликтной устойчивости информационной инфраструктуры // Вестник Воронежского государственного университета. Серия "Системный анализ и информационные технологии". 2017. № 1. С. 10—17.
13. Вялых А. С., Вялых С. А., Сирота А. А. Оценка уязвимости информационной системы на основе ситуационной модели динамики конфликта // Информационные технологии. 2012. № 9. С. 16—21.
14. Алгазинов Э. К., Сирота А. А. Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем / Под общ. ред. А. А. Сироты. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 416 с.
15. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for complex systems // Science of Computer Programming. 1987. Vol. 8. P. 231—274.
16. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 224 с.
17. Шапов В. М. Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. 2002. Вып. 1. Т. 2. С. 212—222.
18. Парийская Е. Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 1997. № 1. С. 91—120.
19. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. Изд. четвертое, перераб. М.: Наука, 1976. 544 с.
20. Высочанский Д. Ф., Петунин Ю. И. Обоснование правила 3-sigma для одномодальных распределений // Теория вероятностей и мат. статистика. 1979. Вып. 21. С. 23—35.

A. A. Sirota, Professor, Head of Department, e-mail: sir@cs.vsu.ru,

N. I. Goncharov, Graduate Student, e-mail: nikigoncharov@ya.ru, Voronezh state University

Modeling of Conflict Interaction of Systems Using the Formalism of Hybrid Automata

Explores the mathematical and computer models of conflict interaction systems based on the formalism of hybrid automata (card state). Offers model mathematical schemes and implement them in a simulation model, based on the description of change of States in conflict. The obtained analytical equations for estimating lower bounds on the probability of winning of one of the parties to the conflict, allowing to abstract from the specific species densities distributions for the residence time of the parties in their possible States. The results of the comparison of the estimates with simulation results.

Keywords: conflict interaction systems, hybrid automata, maps of states, simulation of conflict of coalitions of systems

References

1. Makarenko S. I., Mihajlov R. L. Informacionnye konflikty — analiz robot i metodologii issledovaniya (Information conflicts —

analysis of works and research methodology), *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2016, no. 3, pp. 95—178 (in Russian).

2. *Modeli informacionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya* (Models of information conflict of means of search

and discovery), ed. Yu. L. Kozirackogo, Moscow, Radiotekhnika, 2013, 232 p.

3. **Druzhinin V. V., Kontorov A. S., Kontorov D. S.** Vvedenie v teoriyu konflikta (Introduction to the theory of conflict). Moscow, Radio i svyaz', 1989, 288 p. (in Russian)

4. **Suhorukov Yu. S., SHlyahin V. M.** Principy modelirovaniya dinamiki vzaimodej-stviya storon v usloviyah radiolokacionnogo konflikta (Principles of modelling the dynamics of interaction between the parties in terms of radar conflict). *Radiotekhnika*, 1992, no. 1–2 (in Russian).

5. **Budnikov S. A.** Ocenka veroyatnostnykh pokazatelej v konflikte informacionno-upravlyayushchih system (Estimation of probabilistic factors in the conflict management information systems), *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2009, no. 3 (37), pp. 27–31 (in Russian).

6. **Rad'ko N. M., Mokrousov A. N.** Dinamicheskaya model' raboty adaptirovannogo k pomekham radiosredstva s ispol'zovaniem setej Petri (A dynamic model adapted to noise radio resources using Petri nets), *Informatsiya i bezopasnost'*, 2009, no. 2, pp. 257–262 (in Russian).

7. **Semisoshenko M. A.** Upravlenie avtomatizirovannymi setyami dekametrovoj svyazi v usloviyah slozhnoj radioelektronnoj obstanovki (The management of the automated networks decimeter communication in complex electronic environment), Saint-Peterburg, VAS, 1997. 364 p. (in Russian).

8. **Gubanov D. A., Novikov D. A., Chkhartishvili A. G.** Social'nye seti: modeli in-formacionnogo vliyaniya, upravleniya i protivoborstva (Social networks: models of informational influence, control and confrontation), Ed. D. A. Novikov, Moscow, Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 2010, 228 p. (in Russian).

9. **Kocynyak M. A., Osadchij A. I., Kocynyak M. M., Laut O. S., Dement'ev V. E., Vasyukov D. Yu.** Obespechenie ustojchivosti informacionno-telekommunikacionnykh sistem v usloviyah informacionnogo protivoborstva (Sustainability information and telecommunication systems in the conditions of information warfare), Saint-Peterburg, LO CNIIS, 2015, 126 p. (in Russian).

10. **Vakulenko A. A., SHEvchuk V. I.** Matematicheskaya model' dinamiki konflikta radioelektronnykh sistem (A mathematical model of conflict dynamics electronic systems), *Radiotekhnika*, 2011, no. 1, pp. 56–59 (in Russian).

11. **Radzievskij V. G., Sirota A. A.** Informacionnoe obespechenie radioelektronnykh sistem v usloviyah konflikta

(Information support of electronic systems in conflict), Moscow, IPRZHR, 2001, 456 p. (in Russian).

12. **Andreeshchev I. A., Budnikov S. A., Gladkov A. V.** Polumarkovskaya model' ocenki konfliktnoj ustojchivosti informacionnoj infrastruktury (Semi-Markov model of conflict assessment the sustainability information infrastructure), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Sistemnyy analiz i informacionnye tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 10–17 (in Russian).

13. **Vyalyh A. S., Vyalyh S. A., Sirota A. A.** Ocenka uyazvimosti informacionnoj si-stemy na osnove situacionnoj modeli dinamiki konflikta (Vulnerability assessment of information systems based on situational model of conflict dynamics), *Informacionnye tekhnologii*, 2012, no. 9, pp. 16–21 (in Russian).

14. **Algazinov E. K., Sirota A. A.** Analiz i komp'yuternoe modelirovanie in-formacionnykh processov i system (Analysis and computer modeling of information processes and systems). Ed. A. A. Siroty, Moscow, Dialog-MIFI, 2009. 416 p. (in Russian).

15. **Harel D.** Statecharts: a Visual Formalism for complex systems, *Science of Computer Programming*, 1987, vol. 8, pp. 231–274.

16. **Kolesov Yu. B., Senichenkov Yu. B.** Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gi-bridnye sistemy. Uchebnoe posobie. (Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems. Textbook), Saint-Peterburg, BHV-Peterburg, 2012, 224 p. (in Russian).

17. **Shpakov V. M.** Situacionnye specifikacii imitacionnykh modelej gibridnykh reaktivnykh sistem (Situational specifications of simulation models of hybrid reactive systems), *Trudy SPIIRAN*, 2002, is. 1, vol. 2, pp. 212–222 (in Russian).

18. **Parijskaya E. Yu.** Sravnitel'nyy analiz matematicheskikh modelej i podhodov k modelirovaniyu i analizu nepreryvno-diskretnykh system (Comparative analysis of mathematical models and approaches to modeling and analysis of continuously-discrete systems), *Differencial'nye uravneniya i processy upravleniya*, 1997, no. 1, pp. 91–120 (in Russian).

19. **Kolmogorov A. N., Fomin S. V.** EHlementy teorii funkcej i funkcional'nogo analiza (Elements of the theory of functions and functional analysis). Moscow, Nauka, 1976, 544 p. (in Russian).

20. **Vysochanskij D. F., Petunin Yu. I.** Obosnovanie pravila Z-sigma dlya odnomo-dal'nykh raspredelenij (Rationale for the rule 3-sigma for odnodolnykh distributions), *Teoriya veroyatnostej i mat. statistika*, 1979, is. 21, pp. 23–35 (in Russian).

УДК 004.8

А. В. Буравцев, зам. директора, e-mail: mister_j@mail.ru,

Институт информационных технологий и автоматизированного проектирования,
Московский технологический университет (МИРЭА),

В. Я. Цветков, д-р техн. наук, проф., зам. руководителя, e-mail: cvj2@mail.ru,

Центр стратегического анализа и развития,

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), Москва

Анализ структуры сложной организационно-технической системы

Выполнен анализ особенностей сложной организационно-технической системы и предложен метод по формированию ее структуры и иерархии. Показано место сложной организационно-технической системы в ряду сложных систем. Раскрываются содержание и особенности сложной организационно-технической системы. Отмечено включение когнитивных факторов в работу сложной организационно-технической системы. Описано применение дихотомического метода для построения структуры сложной организационно-технической системы. Дихотомический метод применен в сочетании с оппозиционным методом. Сочетание дихотомического и оппозиционного методов позволяет последовательно выделять качественные компоненты в виде структуры сложной системы. Дихотомический метод дополнен методом построения иерархий, основанном на теории графов.

Ключевые слова: системный анализ, сложная система, социальная система, сложная организационно-техническая система, аутопойезис, моделирование, структура системы, дихотомическое деление, моделирование иерархии