

УДК 004.942

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФЛИКТА КОАЛИЦИЙ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОРМАЛИЗМА ГИБРИДНЫХ АВТОМАТОВ

А. А. Сирота, Н. И. Гончаров

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 06.09.2017 г.

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования и исследования конфликтного взаимодействия коалиций систем на основе формализма гибридных автоматов (карт состояний). Предлагаются типовые математические схемы и компьютерные имитационные модели, обеспечивающие описание конфликта коалиций и возможность их простой модификации на основе использования объектно-ориентированных представлений участников конфликта. Получены аналитические соотношения для оценки нижней границы вероятности выигрыша сторон в конфликте. Приведены результаты сравнения полученных оценок с результатами имитационного моделирования.

Ключевые слова: гибридные автоматы, карты состояний, конфликт коалиций, моделирование конфликта.

Annotation. Discusses issues of modeling and research of conflict interaction of coalitions of systems based on the formalism of hybrid automata (card state). Offers model mathematical diagrams and computer simulation models, providing a description of conflict, coalitions and the possibility of their easy modification through the use of object-oriented representations of the parties to the conflict. The obtained analytical equations for estimating lower bounds on the probability of winning sides in the conflict. The results of the comparison of the estimates with simulation results.

Keywords: hybrid machines, maps of States, conflict, coalitions, conflict simulation.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях функционирование любых сложных систем характеризуется наличием различного рода конфликтных взаимодействий [1–11]. При этом наиболее сложным для исследования является конфликт коалиций систем, который подразумевает участие с каждой стороны в той или иной степени организованных групп объектов. 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], те-

ории динамических систем [10] и др. Все эти модели в той или иной степени основаны на использовании представления конфликта в виде графа состояний систем или графа состояний общей системы, объединяющей конфликтующие стороны.

Плодотворным подходом для построения математической и компьютерной модели конфликта является использование аппарата полумарковских случайных процессов (ПСП), естественным образом интегрируемых с графовыми представлениями состояний систем [2–5, 11, 12, 13]. Тем не менее, при построении моделей на основе ПСП действует принципиальное ограничение: необходимо в явном виде задавать плотности распределения вероятностей для времени нахождения систем

© Сирота А. А., Гончаров Н. И., 2017

в своих состояниях [12]. Еще одним ограничением подхода ПСП к моделированию конфликта является сложность его применения для коалиций систем, поскольку это неминуемо ведет к возрастанию количества 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, представляющей функционирование этого объекта как процесс смены дискретных состояний, определяющих режимы работы ГА, внутри каждого из которых осуществляется непрерывное локальное поведение [13–18]. Для описания процессов здесь не обязательно вводить свойство полумарковости или, вообще, использовать статистическое представление. Подход на основе ГА обеспечивает более широкие возможности создания объектно-ориентированных моделей конфликта и, прежде всего, при участии с каждой стороны нескольких объектов (конфликт коалиций), а также введении в модели элементов управления коалицией, реализующих те или иные стратегии. При реализации моделей конфликта на основе ПСП требуется вводить так называемые конфликтно-обусловленные состояния общей для всех объектов системы, что, как уже упоминалось, вызывает трудности реализационного плана при разрастании числа состояний.

Целью данной работы является обоснование типовых математических схем и реализующих их технологий компьютерного имитационного моделирования конфликтного взаимодействия коалиций систем, основан-

ных на описании смены состояний в рамках формализма ГА, обеспечивающих описание участников конфликта в объектно-ориентированном виде и возможность простой модификации модели при изменении состава участников и структуры их состояний. В рамках предложенных схем математического моделирования решается задача получения аналитических соотношений для оценки нижней границы вероятности выигрыша сторон в конфликте независимо от вида плотности распределения для времени переходов, что позволяет определить область их применения и обосновать необходимость перехода к ИМ в тех случаях, когда подобные оценки не применимы.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОНФЛИКТА КОАЛИЦИЙ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ АВТОМАТОВ

При использовании гибридных автоматов (ГА) для моделирования и исследования конфликта коалиций систем представляется важным провести типизацию основных схем конфликтных взаимодействий. Задача математического моделирования конфликта коалиций подразумевает наличие групп конфликтно взаимодействующих объектов, действия которых с каждой стороны координируются некоторым органом управления или на основе заранее заданного регламента поведения.

Процесс конфликта коалиций может быть представлен в виде двух параллельно функционирующих ГА: автомата (коалиции) A , состоящего из N_a иерархически вложенных элементарных ГА, и автомата (коалиции) B , состоящего из N_b иерархически вложенных элементарных ГА. Таким образом, под коалицией, описываемой автоматом A , будем понимать кортеж:

$$A = \langle A^{(1)}, \dots, A^{(N_a)}, \text{disp}_a \rangle, \quad (1)$$

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

Коалиция противостоящей стороны описывается кортежем элементарных гибридных автоматов и своей функцией координации $B = \langle B^{(1)}, \dots, A^{(N_b)}, disp_b \rangle$.

Укрупненное отображение конфликта коалиций с использованием ГА (карт состояний) дано на рис. 1. Здесь конфликт представлен как совокупность микроконфликтов, в каждом из которых в данный момент времени взаимодействует либо два участника (дуэльная ситуация) с каждой стороны, либо один с одной стороны и несколько участников с другой (в случае количественного превосходства одной из сторон). Победившей стороной в конфликте коалиций, будем считать сторону, которая к исходу конфликта сохранила большее количество элементов.

Математическое описание объекта – участника коалиции. Для описания каждого $A^{(i)}$, $i = \overline{1, N_a}$ (для определенности будем рассматривать сторону А) предлагается типовая математическая схема гибридного автомата, представленная на рис. 2,а, которую будем использовать как базовую (на рис. 2,б показана реализация этой схемы в среде Matlab+Simulink+Stateflow, описание которой будет дано ниже).

Пусть для каждого автомата $A^{(i)}$, $i = \overline{1, N_a}$ (задано множество $S_i^D = \{s_{a,i}\}$ значений дискретной переменной, которая принимает два значения $s_{a,i} \in Q_{A_i} = \{L_{A_i}, D_{A_i}\}$, где L_{A_i} определяет состояние «жизни» в условиях отсутствия или наличия конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции, а D_{A_i} определяет состояние «гибели» в результате конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции. Переход в D_{A_i} происходит под влиянием события $attack_B_i$, генерируемым одним из участников коалиции В.

Для детального описания поведения $A^{(i)}$ предлагается также ввести внутреннее описание состояния L_{A_i} в виде вложенных гибридных автоматов, которые будем называть гибридными автоматами активных элементов (ГА АЭ). Такой подход позволяет ввести агрегированное описание перехода в состояние из D_{A_i} . Постулируется, что каждый ГА 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

крупной переменной, которая принимает два значения $s_{a,i} \in Q_{A_i} = \{L_{A_i}, D_{A_i}\}$, где L_{A_i} определяет состояние «жизни» в условиях отсутствия или наличия конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции, а D_{A_i} определяет состояние «гибели» в результате конфликтного воздействия со стороны элементов противостоящей коалиции. Переход в D_{A_i} происходит под влиянием события $attack_B_i$, генерируемым одним из участников коалиции В.

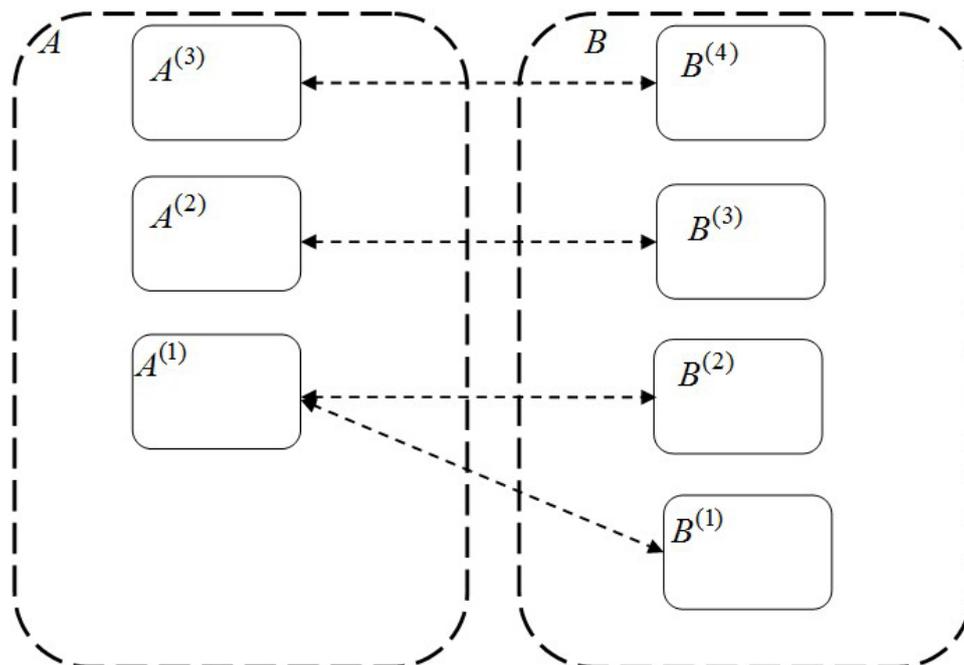


Рис. 1. Представление конфликта коалиций гибридных автоматов

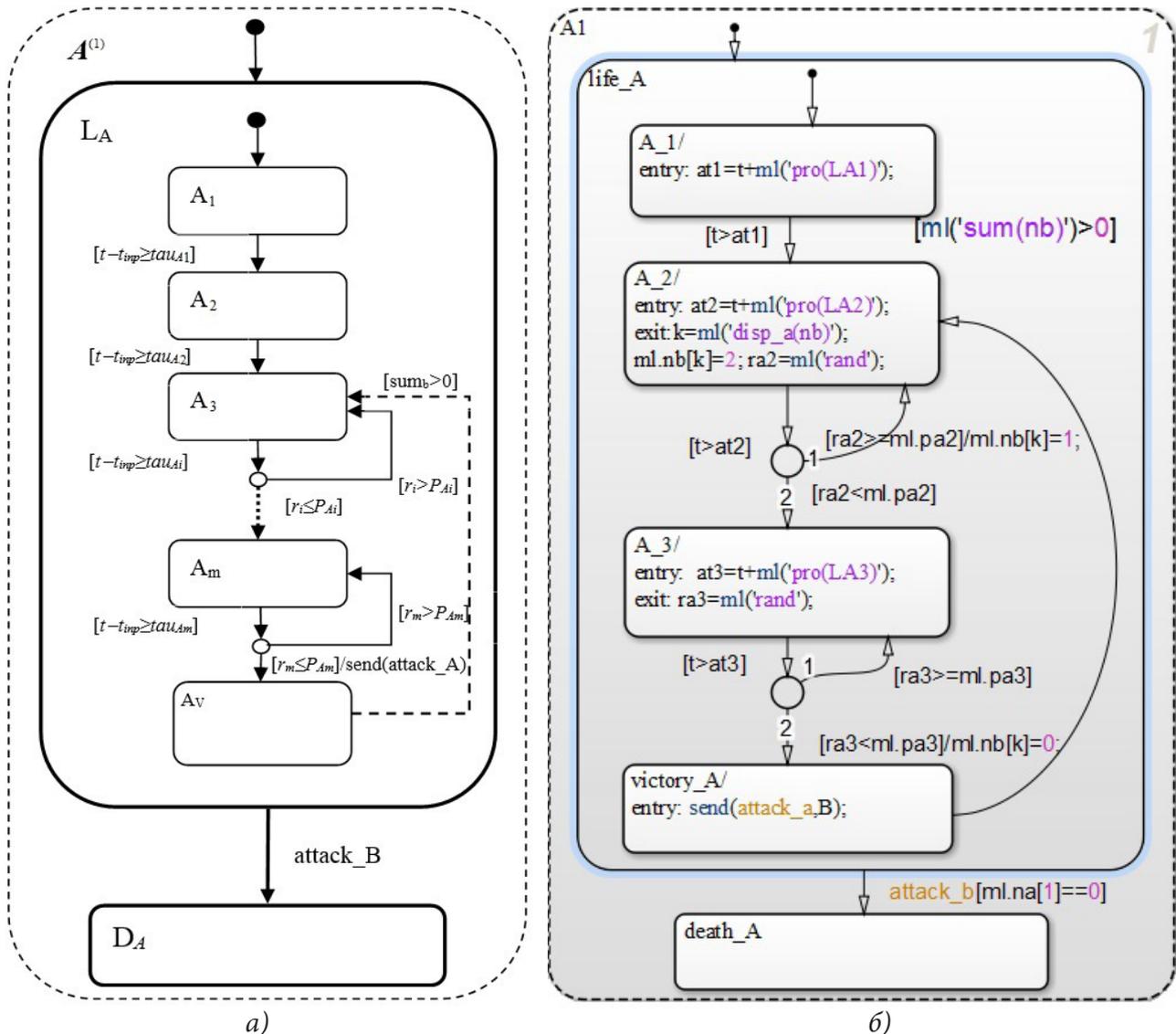


Рис. 2. Представление участника коалиции в виде гибридного автомата и его реализации в Stateflow

схеме путем декомпозиции и/или агрегации выполняемых в ней действий.

Математическое описание ГА АЭ каждого $A^{(i)}$, $i = 1, N_a$ в рамках схемы ГА предлагается ввести следующим образом. Вводятся 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.2,а, $p = 2$).

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 континуум; 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:

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

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 достигаемый в после выполнения работы результат.

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 (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 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 $P_{Ak}(\tau)$ задаваемая в рамках (4) вероятность успешного завершения работы.

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 не обязательно точное совпадение множеств дискретных состояний и других элементов ГА АЭ.

Представленное описание ГА каждой из сторон может быть использовано для представления «дуэли» двух гибридных автоматов.

Математическое описание функции координации коалиции. При действии автомата в составе коалиции вводится переход, показанный на рис. 2,а штриховой линией, который 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:

$$[sum_b > 0], \quad sum_b = \sum_{j=1}^{N_b} I_B^{(j)}(s_{b,j} \in L_B), \quad (2)$$

где $I_B^{(j)}(s_{b,j} \in L_B) = 1$, $I_B^{(j)}(s_{b,j} \notin L_B) = 0$ – индикаторы пребывания ГА $B^{(i)}$ в состоянии L_B , что позволяет фиксировать общее количество 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 различным образом, 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, инди-

катор $i_{ab,j} = I_{AB}^{(j)}(A \rightarrow L_B)$, 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:

$$disp_a : I(S_A^D, S_B^D) \rightarrow \{1, 2, \dots, N_b\},$$

$$I_{ab} = (i_{b,1}, \dots, i_{b,N_b}, i_{ab,1}, \dots, i_{ab,N_b}) \in I(S_A^D, S_B^D), \quad (3)$$

$$disp_b : I(S_B^D, S_A^D) \rightarrow \{1, 2, \dots, N_a\},$$

$$I_{ba} = (i_{a,1}, \dots, i_{a,N_a}, i_{ba,1}, \dots, i_{ba,N_a}) \in I(S_B^D, S_A^D),$$

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

Оценки нижней границы вероятности выигрыша сторон в конфликте. Рассмотрим возможность получения нижней границы для вероятности выигрыша одной из сторон в конфликте коалиций систем на основе задания моментов для времени пребывания в каждом дискретном состоянии без знания конкретно вида распределений. Для этого в начале получим аналитические соотношения для описания микроконflikта в виде «дуэли», в которой с каждой стороны A и B действует только один ГА ($N_a = N_b = 1$).

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 как случайная величина 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 количество циклов повторения работы, выполняемой в состоянии $A_k \in Q_{Ap}^L$ до перехода в следующее состояние, при отсутствии положительного результата на предыдущем цикле; $\tau_{k,j}$ – случайное время выполнения работы на j -ом 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 то, 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:

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

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 количество повторяющихся циклов работы в соответствующих дискретных состояниях. Для распределения $h = (h_{p+1}, \dots, h_m)^T$ в (6) используется следующее представление:

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

При использовании аналитического представления для плотностей распределения $P_{Ak}(\tau_k), k=1, m$ вычисление свертки $P(\tau_a / h)$ в (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:

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

Рассмотрим теперь возможность использования фундаментальных неравенств теории вероятностей для получения граничных оценок для вероятностей (7) на основе информации о первом и втором моментах распределений $P_{Ak}(\tau_k), k=1, m, P_{Bk}(\tau_k), k=1, m$. 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 (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 (5) для τ_a (аналогично и для τ_b) выполняется суммирование независимых случайных величин, часть из которых имеет одинаковое распределение. Тогда такую оценку можно представить как:

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

$$\Pr(\delta\tau < 0) = \int_{-\infty}^0 N(u, m_a - m_b, d_a + d_b) du = (12)$$

$$= F\left(-\frac{m_a - m_b}{\sqrt{d_a + d_b}}\right),$$

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

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

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 [19] в виде:

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

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:

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

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

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

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:

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

$$\geq \Pr\left[|\delta\tau - (m_a - m_b)| < m_b - m_a\right] =$$

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

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

$$\rho = \frac{m_b - m_a}{\sqrt{d_a + d_b}} \geq \sqrt{\frac{8}{3}} = 1,6329. (14)$$

Подобная оценка позволяет уточнить результат при достаточных значениях отношения ρ .

Теперь рассмотрим случаи, когда количество ГА N_a и N_b в каждой из противоборствующих коалиций A и B или, хотя бы в одной из них, больше единицы. В данном случае получение аналитических оценок вероятностей выигрыша сторон существенно усложняется в силу усложнения характера модели взаимодействия групп ГА, находящихся под диспетчерским управлением. Поэтому 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.

В то же время при определенных допущениях возможно получение простейших оценок, базирующихся, как и ранее, на использовании исходных данных относительно моментов распределений времени пребывания элементарных ГА в своих дискретных состояниях и фундаментальных неравенств теории вероятностей. В качестве таких допущений введем ограничение, согласно которому каждый ГА коалиции в текущее время может взаимодействовать только с одним ГА противостоящей стороны. Пусть, также, при начальном назначении целей в виде элементарных гибридных автоматов противостоящей стороны последующее перенацеливание гибридных автоматов после успешного завершения «дуэли» не производится. При этом будем считать, что статистические характеристики ГА АЭ в своей коалиции одинаковы.

Рассмотрим сначала вариант, когда количество ГА в каждой коалиции одинаково $N_a = N_b = N$. При выполнении введенного допущения исходное целераспределение приводит к тому, что процесс взаимодействия коалиций распадается на N независимых подпроцессов дуэльного взаимодействия ГА. Выигрыш в конфликте коалиций достигается у той стороны, которая после завершения конфликта имеет в своем составе наибольшее количество оставшихся в живых ГА. Тогда вероятность выигрыша, например стороны A может получена на основе следующих соотношений:

$$P_{A\Sigma} = \sum_{k \geq \lceil N/2 \rceil}^N P_{Va}^k (1 - P_{Va})^{N-k} \leq \sum_{k \geq \lceil N/2 \rceil}^N P_{Vag}^k (1 - P_{Vag})^{N-k}, \quad (15)$$

где $\lceil N/2 \rceil$ определяется как наименьшее целое, большее или равное $N/2$.

Рассмотрим теперь вариант, когда количество ГА в каждой коалиции различно $N_a < N_b$. Пусть для определенности $N_a = N_b - 1$, как это показано на рис. 1. В данном случае исходное целераспределение назначает дуэли для $N_a - 2$ пар автоматов. При этом одному из автоматов стороны A навязывается конфликт с двумя автоматами стороны B (рис. 1). Указанные подпроцессы конфликтного взаимодействия протекают независимо и, соответственно, оценка выигрыша стороны A может быть получена в виде:

$$P_{A\Sigma} = P_{Va2} \sum_{k \geq \lceil (N_b-2)/2 \rceil - 1}^{N_a-1} P_{Va}^k (1 - P_{Va})^{N-k} + (1 - P_{Va2}) \sum_{k \geq \lceil N_b/2 \rceil + 1}^{N_a-1} P_{Va}^k (1 - P_{Va})^{N-k} \leq P_{Vag2} \sum_{k \geq \lceil (N_b-2)/2 \rceil + 1}^{N_a-1} P_{Vag}^k (1 - P_{Vag})^{N-k} + (1 - P_{Vag2}) \sum_{k \geq \lceil N_b/2 \rceil + 1}^{N_a-1} P_{Vag}^k (1 - P_{Vag})^{N-k}, \quad (16)$$

где P_{Va2} , P_{Vag2} – вероятность и ее оценка сверху для выигрыша элементарного автомата стороны $A^{(*)}$ при противодействии двум автоматам стороны B , автоматам $B^{(1)}$ и $B^{(2)}$ (рис. 1).

Рассмотрим возможность получения оценки P_{Vag2} . Пусть $\tau_{b,1}$ и $\tau_{b,2}$ случайные величины для ГА АЭ автоматов $B^{(1)}$ и $B^{(2)}$, характеризующие время нахождения ГА АЭ в группе состояний $Q_{Bd}^L \cup Q_{Bp}^L = \{B_1, \dots, B_p, B_{p+1}, \dots, B_m\}$ до окончательного перехода в свои критические состояния. Пусть для определенности $\tau_{b,1} < \tau_{b,2}$. Пусть τ_a случайная величина, характеризующая время нахождения ГА АЭ $A^{(*)}$ в группе состояний $Q_{Ad}^L \cup Q_{Ap}^L = \{A_1, \dots, A_p, A_{p+1}, \dots, A_m\}$ до окончательного перехода в критическое состояние. При этом в случае выигрыша $A^{(*)}$ это время является суммой $\tau_a = \tau_{a,1} + \tau_{a,2}$, где $\tau_{a,1}$ – время пребывания в указанных состояниях при конфликте с первым ГА (в данном случае это $B^{(1)}$) с достижением критического состояния и выигрыша у этого автомата, а $\tau_{a,2}$ – время пребывания в состояниях $Q_{Ap}^L = \{A_{p+1}, \dots, A_m\}$ после перехода из критического состояния A_{p+1} и возобновления конфликта теперь уже со вторым автоматом (в данном случае это $B^{(2)}$). Тогда условие выигрыша $A^{(*)}$ определяется совокупностью неравенств:

$$\tau_{a,1} < \tau_{b,1}, \quad \tau_a = \tau_{a,1} + \tau_{a,2} < \tau_{b,2}, \quad \tau_{b,1} < \tau_{b,2}.$$

Если $\tau_{b,1} < \tau_{b,2}$, то аналогичная система неравенств записывается как

$$\tau_{a,1} < \tau_{b,2}, \quad \tau_a = \tau_{a,1} + \tau_{a,2} < \tau_{b,1}, \quad \tau_{b,2} < \tau_{b,1}.$$

Отсюда для искомой вероятности можно записать как

$$P_{Va2} = P(\tau_{a,1} < \tau_{b,1}, \tau_a < \tau_{b,2} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2})P(\tau_{b,1} < \tau_{b,2}) + P(\tau_{a,1} < \tau_{b,2}, \tau_a < \tau_{b,1} / \tau_{b,2} < \tau_{b,1})P(\tau_{b,2} < \tau_{b,1}) = P(\tau_{a,1} < \min\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}, \tau_a < \max\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\} / u = \arg \min\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}),$$

учитывая полную симметрию условий и одинаковые статистические характеристики ГА с каждой стороны. Представим последнее выражение (для определенности возвращаясь к условию $\tau_{b,1} < \tau_{b,2}$) в виде:

$$P_{Va2} = P(\tau_{a,1} < \tau_{b,1}, \tau_a < \tau_{b,2} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}) = P(\tau_{a,1} < \tau_{b,1} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}) \times P(\tau_a < \tau_{b,2} / \tau_{a,1} < \tau_{b,1}, \tau_{b,1} < \tau_{b,2}). \quad (17)$$

Первый сомножитель фактически отражает вероятность выигрыша в дуэльной ситуации при конфликте с $B^{(1)}$. Второй сомно-

житель отражает условную вероятность выигрыша $A^{(*)}$ после перехода к конфликтному взаимодействию с ГА $B^{(2)}$. При их вычислении следует учесть, что распределение величин $\tau_{b,1}$ и $\tau_{b,2}$ теперь имеют вид:

$$P_{B,l}(\tau_{b,1}) = 2P_B(\tau_{b,1}) \left(1 - \int_{-\infty}^{\tau_{b,1}} P_B(u) du \right),$$

$$P_{B,h}(\tau_{b,2}) = 2P_B(\tau_{b,2}) \int_{-\infty}^{\tau_{b,2}} P_B(u) du,$$

т. е. являются распределениями минимального и максимального значений для выборки из двух независимо распределенных случайных величин. Для математических ожиданий этих величин, учитывая, что

$$\xi_b = \min\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\} + \max\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\} = \tau_{b,1} + \tau_{b,2},$$

$$M[\xi_b] = M[\min\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}] + M[\max\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}] = 2M[\tau_b] = 2m_b,$$

$$D[\xi_b] = D[\min\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}] + D[\max\{\tau_{b,1}, \tau_{b,2}\}] = 2D[\tau_b] = 2d_b$$

можно предположить следующее:

$$m_{b,1} = M[\tau_{b,1} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}] \leq M[\tau_b] = m_b,$$

$$m_{b,2} = M[\tau_{b,2} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}] \geq M[\tau_b] = m_b,$$

$$d_{b,1} = D[\tau_{b,1} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}] \leq D[\tau_b] = d_b,$$

$$d_{b,2} = D[\tau_{b,2} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}] \geq D[\tau_b] = d_b.$$

Отсюда выражение для первого сомножителя в (17) может быть представлено в виде:

$$P(\tau_{a,1} < \tau_{b,1} / \tau_{b,1} < \tau_{b,2}) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(u) \left(\int_u^{\infty} P_{B,l}(v) dv \right). \quad (18)$$

Кроме того, могут быть по аналогии получены оценки для этой вероятности на основе гауссовского приближения и неравенств Чебышева и Высочанского – Петунина. При этом вид соответствующих выражений определяется (12), (13), (14) с использованием ранее полученных соотношений (10) и (11) для вычисления $m_{a,1}$ и $d_{a,1}$ и выражений для $m_{b,1} \leq m_b$, $d_{b,1} \leq d_b$, т. е. скорректированных математического ожидания и дисперсии минимального значения, которые могут быть получены на основе записи выражений для $P_B(\tau_b)$ и $P_{B,l}(\tau_b)$.

Выражение для второго сомножителя в (17), характеризующего вероятность выигрыша $A^{(*)}$ при повторном конфликтном взаимодействии, также можно получить по аналогии на основе (12), (13), (14). В данном случае существенные изменения по сравнению с (5) претерпевает выражение для τ_a

$$\tau_a = \sum_{k=1}^p \tau_k + \sum_{k=p+1}^m \sum_{j=1}^{h'_k} \tau'_{k,j} + \sum_{k=p+1}^m \sum_{j=1}^{h''_k} \tau''_{k,j}, \quad (19)$$

где $h'_k \in \{1, 2, \dots, \infty\}$ – случайная величина, характеризующая количество циклов повторения работы, выполняемой в состоянии $A_k \in Q_{Ap}^L$ при выполнении первого конфликтного взаимодействия с ГА $B^{(1)}$, $h''_k \in \{1, 2, \dots, \infty\}$ – случайная величина, характеризующая количество циклов повторения работы, выполняемой в состоянии $A_k \in Q_{Ap}^L$ при выполнении второго конфликтного взаимодействия с ГА $B^{(2)}$; $\tau'_{k,j}$, $\tau''_{k,j}$ – случайные величины, характеризующие время выполнения работы на j -ом цикле повторения работы в первом и втором конфликте.

С учетом независимости слагаемых в (19) нетрудно увидеть, что выражения для m_a и d_a теперь имеют вид

$$m_a = M[\tau_a] = \sum_{k=1}^p m_{a\tau_k} + 2 \sum_{k=p+1}^m \frac{m_{a\tau_k}}{P_{ak}},$$

$$d_a = \sum_{k=1}^p d_{a\tau_k} + 2 \sum_{k=p+1}^m \frac{d_{a\tau_k}}{P_{ak}}. \quad (20)$$

Кроме того, для оценки выражения для второго сомножителя в (17), характеризующего вероятность выигрыша $A^{(*)}$ при повторном конфликтном взаимодействии, на основе (12), (13), (14) потребуется использование выражений для $m_{b,2} \geq m_b$, $d_{b,1} \geq d_b$, т. е. скорректированных математического ожидания и дисперсии максимального значения, которые могут быть получены на основе выражений для $P_B(\tau_b)$ и $P_{B,h}(\tau_b)$.

Задача оценки математических ожиданий и дисперсий минимального и максимального значения может быть решена на основе численного интегрирования соответствующих выражений, записанных на основе строго задания плотностей распределения $P_B(\tau_b)$, $P_{B,l}(\tau_b)$, $P_{B,h}(\tau_b)$ для стороны B , получение которых само по себе представляет собой слож-

ную задачу (см. соотношение (6)). Здесь следует воспользоваться либо гауссовским приближением для исходных плотности $P_B(\tau_b)$, либо при использовании оценок (12), (13), (14) подставлять не скорректированные выражения для $m_{b,1} = m_b$, $d_{b,1} = d_b$, $m_{b,2} = m_b$, $d_{b,2} = d_b$, допуская, что коррекция математических ожиданий и дисперсий в одну сторону для распределений минимального и максимального значения не сильно сказывается на конечном результате. Далее, учитывая неоправданную сложность получения исходных выражений для исходных плотностей распределений времени пребывания сторон в состояниях жизнедеятельности, остановимся на последнем варианте, при котором:

$$P_{Vag2} = P_{Vag}(m_{a,1}, d_{a,1}, m_{b,1}, d_{b,1}) \times P_{Vag}(m_a, d_a, m_{b,2}, d_{b,2}). \quad (21)$$

Анализ выполненных преобразований показывает, что даже в рассматриваемом варианте, основанном на введении достаточно сильных допущений и ограничений, использование аналитических соотношений для оценки вероятности выигрыша в конфликте становится громоздким. Это еще раз подтверждает целесообразность перехода без каких-либо ограничений к имитационному моделированию конфликта с использованием формализма гибридных автоматов на основе объектно-ориентированных представлений и инструментальных средств, поддерживающих эти представления.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении имитационного моделирования в рамках вышеописанных схем описания конфликта коалиций, использовалась программа, реализованная в среде Matlab+Simulink+Stateflow. Она применялась для проверки возможностей применения оценок (15), (16), (21) при различных видах распределений $P_{Ak}(\tau_k)$, $k = 1, m$, $P_{Bk}(\tau_k)$, $k = 1, m$ для времени пребывания в состояниях подмножеств $Q_{Ad}^L \cup Q_{Ap}^L = \{A_1, \dots, A_p, A_{p+1}, \dots, A_m\}$ и $Q_{Bd}^L \cup Q_{Bp}^L = \{B_1, \dots, B_p, B_{p+1}, \dots, B_m\}$.

Модель конфликта в среде Matlab+Simulink+Stateflow строилась с использованием трёх вложенных компонентов: управляющей поведением статистического эксперимента программой в *m*-файле, запускаемой из него *S*-модели (Simulink-модели), являющейся оболочкой для событийно управляемой объектной *SF*-модели (Stateflow-модели) конфликта, и самой *SF*-модели (рис. 3), реализованной в рамках формализма карт состояний Харела [18].

На рис. 2,б представлена структура типового ГА, описывающего поведение одного из участников коалиции со стороны *A* и реализованного в Stateflow. На рис. 3 представлена *SF*-модель конфликта коалиций, каждая из которых содержит по два элемента, структура и поведение которых аналогичны представленной на рис. 2,б.

Структура ГА – участника коалиции (см. рис. 2,б) в целом совпадает со структурой ранее описанной математической схемы (см. также рис. 2,а). *SF*-модель этого ГА может быть однозначно понята исходя из стандартных обозначений среды. При этом используется следующая интерпретация состояний. Состояние *A_1* (A_1) из $Q_{Ad}^L = \{A_1\}$ соответствует однократно выполняемым «работам» доставки и развертывания объекта в зону активных действий (на рис.2,б, $p = 1$). Состояния *A_2* (A_2) и *A_3* (A_3) из $Q_{Ap}^L = \{A_2, A_3\}$ соответствуют «работам», выполняемым с возможным возвратом и повторением. При этом в *A_2* реализуется обнаружение противника в фазовом пространстве координат и высокоточная оценка этих координат, а в *A_3* – применение активных элементов для воздействия на противника (информационного или физического).

Время пребывания каждого $A^{(i)}$ коалиции (см. рис. 3) в своих дискретных состояниях (A_1, A_2, A_3) здесь задаётся путём вызова *m*-функции *pro(...)*, формирующей значение случайной величины, распределённой по заданному закону. Переходы из одного состояния в другое осуществляются по условиям истечения времени пребывания с вероятностями $p_{a2} = pa2$, $p_{a3} = pa3$ (для возвратных состояний). Для управления процессами сме-

ны состояний вводятся внутренние переменные $ra_2, ra_3, at_1, at_2, at_3$, смысл которых ясен из представленной на рис. 2,6 диаграммы.

При нахождении в состоянии A_2 объект коалиции A получает целеуказание путём обращения к функции $disp_a$, т. е. получает номер k объекта коалиции B , который далее

находится под его воздействием. При осуществлении данным объектом активного воздействия с вероятностью ra_3 , задаваемой в управляющей программе, осуществляется переход в состояние $victory_A$, где формируется событие $attack_A$ для объекта стороны B . При выполнении этого перехода модифи-

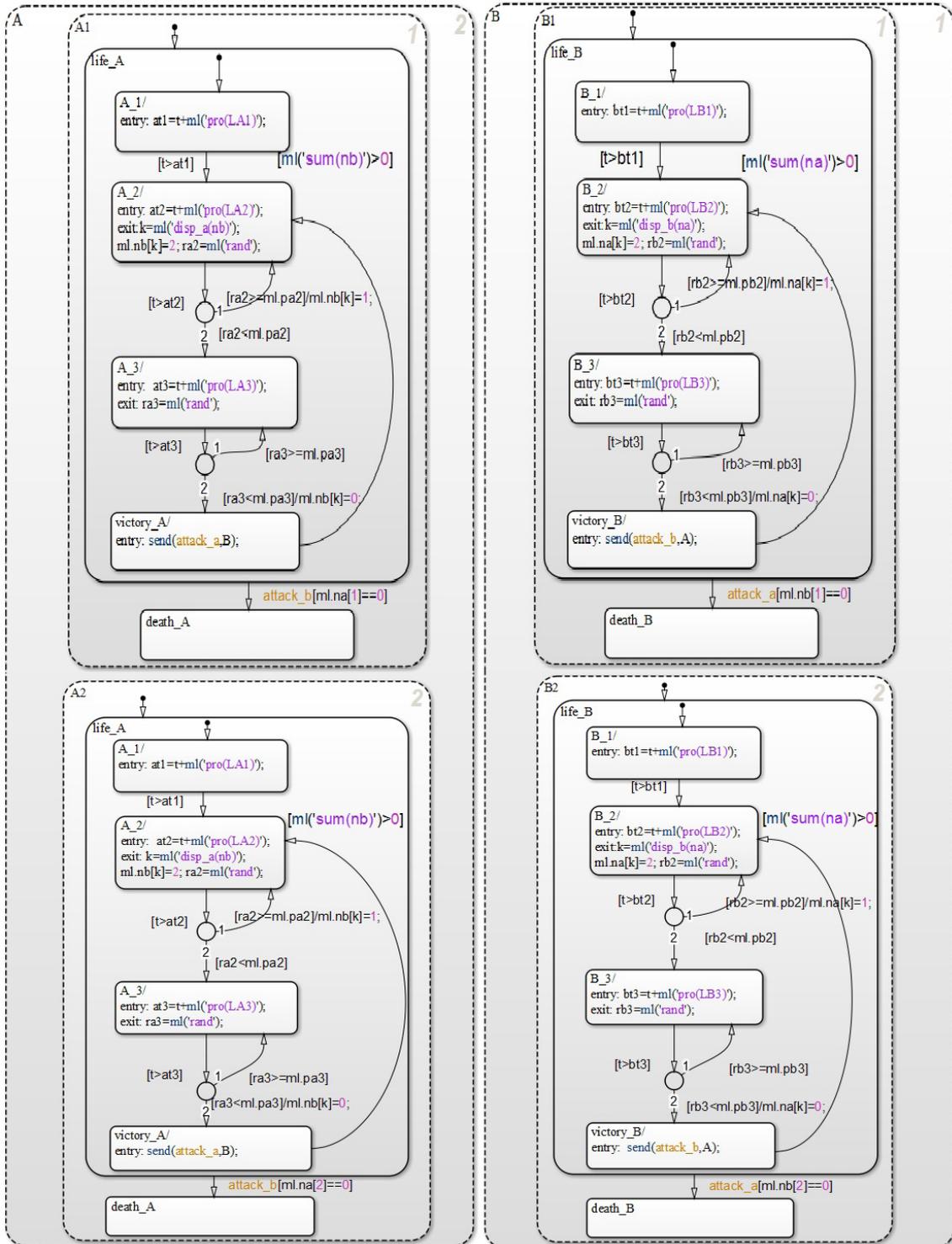


Рис. 3. Карты состояний для описания конфликта коалиций A и B SF-модели конфликта

цируется значение соответствующего элемента массива $nb(k) = 0$, что фиксирует факт «поражения» элемента коалиции B с номером k .

Присвоение значения $nb(k) = 0$ определяет условие перехода именно этого объекта в состояние $death_B$. В свою очередь, объект $A1$ переходит в своё состояние $death_A$ при возникновении события $attack_B$ и одновременном выполнении условия $na(1) = 0$ (объект $A1$ имеет номер 1 в своей коалиции). Состояние $victory_A$ не является поглощающим. Из него при выполнении условия $sum(nb) > 0$ (суммарное количество оставшихся в «живых» участников противоборствующей группировки больше нуля) осуществляется переход в состояние A_2 для получения назначения новой цели.

Количество участников коалиций A и B в ходе проведенного эксперимента задавалось в m -файле управляющей программы. 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 от отношения $\rho = (m_b - m_a)^2 / (s_b + s_a)$. На рис. 4,а приведены примеры типовых зависимостей для конфликта коалиций, состоящих из четырех

участников с каждой стороны, полученные для значений вероятностей $p_{a2} = p_{a3}$, меняющихся в диапазоне от: 0,70 до 0,88 с шагом 0,20 и вероятностей $p_{b2} = p_{b3}$, соответственно меняющихся в диапазоне от 0,30 до 0,12. При этом математические ожидания и дисперсии для времени пребывания каждой из сторон задавались равными $m_{ai} = m_{bi} = 1, i = 1,3$ и $d_{ai} = d_{bi} = 1, i = 1,3$ при одинаковом виде закона распределения.

На рис. 4,б приведены зависимости, полученные для конфликта коалиций, состоящих из 5 систем со стороны A и 4 систем со стороны B , для значений математического ожидания m_{b1} , равных: 0,9; 1,9; 2,9; 3,9; 4,9; 5,9; 6,9; 7,9. При этом значения вероятностей для возвратных состояний принимались равными: $p_{a2} = p_{a3} = 0,7$ и $p_{b2} = p_{b3} = 0,3$. Другие значения математических ожиданий, а так же все значения дисперсий для времени пребывания каждой из сторон в своих состояниях задавались равными единице при одинаковом виде закона распределения.

Анализ зависимостей показывает, что оценки, полученные на основе неравенства Высочанского – Петунина и гауссовского приближения, дают, хотя и не всегда с необходимой точностью, определенные возможности с точки зрения анализа возможного исхода конфликта. Физический смысл полученных зависимостей состоит в том, что чем больше значение параметра ρ , характеризую-

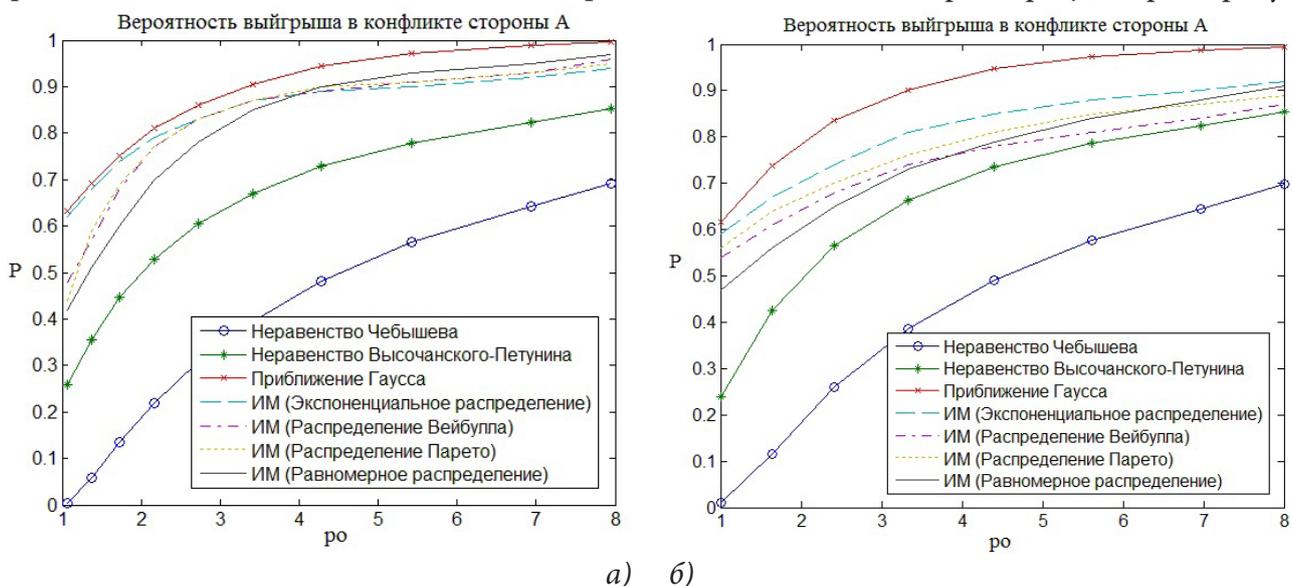


Рис. 4. Результаты сравнения полученных оценок с результатами ИМ

ющего относительное среднестатистическое различие для времени достижения участниками коалиций 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Полученные аналитические соотношения позволяют проводить оценку вероятности выигрыша в условиях неопределённости вида плотностей распределений для времени пребывания сторон в своих возможных состояниях. Однако, результаты могут быть получены для ограниченного круга ситуаций с использованием весьма существенных допущений. При этом относительно более точными оказались нижняя граница, полученная на основе неравенства Высочанского – Петунина, а также оценка, основанная на гауссовском приближении.

В целом, результаты работы показывают, что кардинальное решение задачи исследования закономерностей конфликта коалиций систем в описанной постановке лежит, главным образом, в использовании технологий имитационного моделирования с использованием объектно-ориентированного подхода для представления участников коалиций и их поведения. Использование формализма гибридных автоматов в предложенной реализации снимает проблему трудоёмкости разработки и модификации моделей при изменении структуры пространства состояний участников и состава 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 // 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. Научно-практический журнал. – Москва-Воронеж: Научная книга, 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. Андреещев И. А., Будников С. А., Гладков А. В. Полумарковская модель оценки конфликтной устойчивости информационной инфраструктуры // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. 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. д.т.н. А. А. Сироты. – М. : Диалог-МИФИ, 2009. – 416 с.
15. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. Учебное пособие. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.
16. Шпаков В. М. Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН. – 2002. – Вып. 1, Т. 2. – С. 212–222.
17. 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.
18. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for complex systems // Science of Computer Programming. – 1987. – V. 8. – P. 231–274.
19. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — изд. четвертое, переработанное. – 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.

Сирота А. А. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий обработки и защиты информации, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.
E-mail: sir@cs.vsu.ru

Гончаров Н. И. – аспирант кафедры технологий обработки и защиты информации, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.
E-mail: nikigoncharov@ya.ru

Sirota A. A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Processing Technology and Information Security, Computer Sciences Faculty, Voronezh State University.
E-mail: sir@cs.vsu.ru

Goncharov N. I. – postgraduate student of the Department of processing Technology and information security, faculty of computer science, Voronezh state University.
E-mail: nikigoncharov@ya.ru