

УДК 004.94

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОМАНД ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОНТРОЛЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.О. Кондратьев, А.В. Строков, Е.Е. Широков (Москва),
В.Б. Чернышев (Королёв)

Введение

Создание и анализ информационно-управляющих систем (ИУС) в настоящее время является одним из перспективных направлений исследований и разработок в области систем охраны, оповещения, управления и связи. Такие системы способны автоматически вырабатывать управляющие команды, сигналы тревоги и оповещения, разблокировку применения взаимодействующих систем на основе данных контроля деструктивных воздействий. Основу типовой ИУС, представленной на рис. 1, составляют информационные датчики или информационные каналы (ИК), а также логический автомат для обработки поступающей информации о внешних воздействиях и автоматического формирования управляющих команд (УК) различного типа.

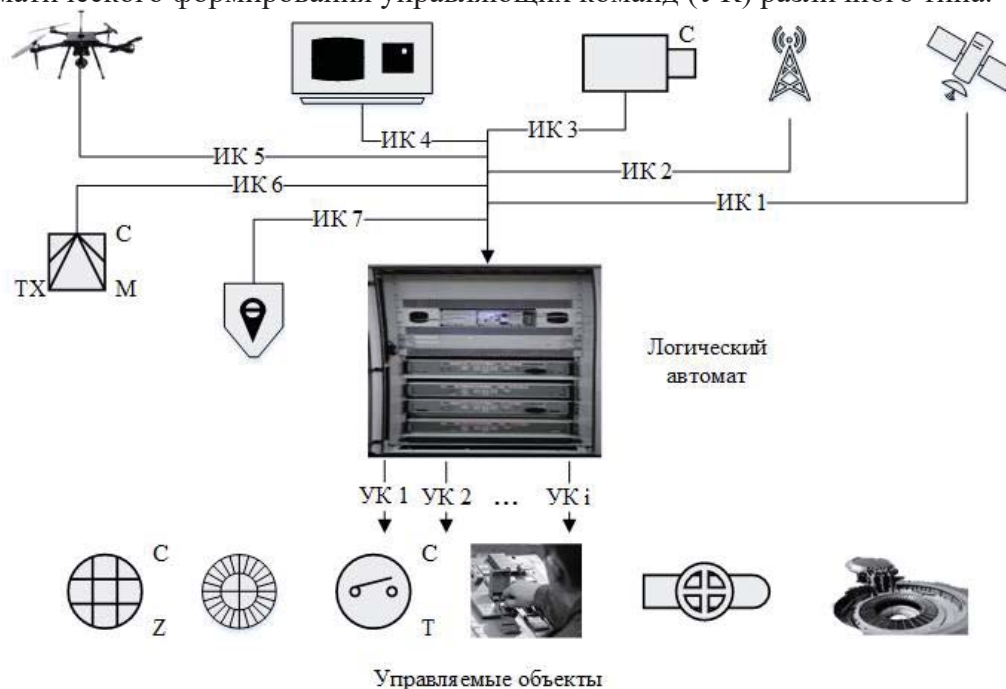


Рис. 1. Схема типовой ИУС

В литературе [1,2] для общности принято рассматривать логический автомат как некий «черный ящик», имеющий определенное число входов, на которые подаются импульсы (цифровые сигналы). Для того чтобы на выходе логического автомата сформировалась управляющая команда необходимо, чтобы за определенный промежуток времени он получил на своих входах одну из установленных последовательностей сигналов, называемых критичными. Для остальных последовательностей сигналов, которые относятся к не критичным, команда формироваться не должна. Таким образом, описание требуемой реакции на все возможные последовательности сигналов с помощью функций логических переменных,

соответствующих этим сигналам, полностью характеризует логический автомат ИУС рассматриваемого класса.

Так как получение логическим автоматом информации о внешнем воздействии является случайным событием, то неизбежны ошибки, связанные с несовершенством и недостаточным числом датчиков, воздействием на них погодных факторов (ветер, снег, туман и пр.), суточного изменения освещенности, животных, птиц и насекомых, пропадания электричества, активного противодействия нарушителей и т.д. Поэтому эффективность функционирования ИУС, как правило, оценивается в двух аспектах: оперативность и надежность формирования необходимых по обстановке управляющих команд, а также частота их формирования при отсутствии какого-либо внешнего воздействия (уровень ложных тревог).

Если при реализации контролируемого внешнего воздействия несвоевременно формируется или вообще не формируется управляющая команда, то говорят об ошибке 1-го рода (пропуск внешнего воздействия). Если же при отсутствии внешнего воздействия формируется команда на основе ложных сигналов информационных датчиков, то говорят об ошибке 2-го рода (ложная тревога).

Анализ накопленного опыта моделирования конкретных ИУС с заданными числом датчиков и логической функцией [3] позволил выбрать для дальнейшей реализации наиболее универсальную имитационную модель ИУС рассматриваемого класса [4]. В универсальной модели для характеристики состава и функционирования ИУС используются три группы параметров: для моделирования датчиков, логического автомата и сценария деструктивного воздействия. Параметры для моделирования функционирования датчиков включают:

K_i – количество датчиков в зоне регистрации i -го контролируемого признака;

$K_{ог\ i}$ – коэффициент оперативной готовности датчика;

P_{ij} – вероятность регистрации i -го контролируемого признака в j -х условиях обстановки;

$T_{ср\ i}, \sigma_i$ – математическое ожидание (МОЖ) и среднеквадратическое отклонение (СКО) времени срабатывания i -го датчика после появления контролируемого признака воздействия в его зоне регистрации;

$T_{д\ i}, \sigma_{д\ i}$ – МОЖ и СКО времени доставки сигнала от датчика в логический автомат;

λ_i – интенсивность ложных тревог.

Параметры для моделирования функционирования логического автомата включают:

A_i – состав входных сигналов;

$F_s(A)$ – логические функции формирования управляющих команд различного типа;

$T_{сб\ i}$ – время сброса i -го сигнала при отсутствии критичной последовательности сигналов;

$T_{ф\ i}, \sigma_{ф\ i}$ – МОЖ и СКО времени формирования автоматом управляющей команды после получения критичной последовательности сигналов,

$T_{зад}$ – время задержки выдачи сформированной команды в случае получения тормозящего сигнала для ожидания запрещающего сигнала.

Параметры для моделирования сценария деструктивного воздействия включают:

$t_{н0j}$ – время начала деструктивного воздействия в j -х условиях обстановки;

$T_{н\ ij}, \sigma_{н\ ij}$ – МОЖ и СКО времен (от $t_{н0j}$) появления контролируемого признака воздействия в зоне регистрации i -го датчика (для некоторых датчиков времена могут отсутствовать);

P_{vij} , T_{vij} , σ_{vij} – соответственно вероятность, МОЖ и СКО времен вывода из строя i -го датчика (для некоторых датчиков времена могут отсутствовать).

Схема проведения имитационного моделирования

Содержание и порядок имитационного моделирования определяется списком событий, упорядоченных по времени появления и типом эксперимента. В экспериментах, направленных на оценку вероятностно-временных характеристик (ВВХ) формирования и выдачи управляющих команд исходными событиями являются времена проявления контролируемых признаков в зонах регистрации датчиков, которые задаются в сценарии. В процессе имитационного моделирования могут появляться новые промежуточные события, которые формируются моделями элементов ИУС (датчиков, логического автомата) и передаются управляющему модулю системы моделирования. Таким событиями являются:

- отказы или вывод из строя некоторых датчиков;
- регистрация работоспособными датчиками контролируемых признаков;
- доставка (потеря) сигналов от датчиков на вход логического автомата;
- включение таймеров интервала сброса при получении сигналов,
- сброс иницирующего сигнала и таймера;
- формирование управляющей команды;
- получение тормозящего или запрещающего сигналов.

Конечным исходом одного эксперимента может быть либо формирование и выдача управляющей команды через некоторое время после начала воздействия, либо ошибка 1-го рода, то есть пропуск контролируемого воздействия.

Выходными показателями для серии экспериментов являются вероятность ошибки 1-го рода, рассчитываемая как доля числа пропусков, вероятность противоположного события и закон распределения (плотность вероятности) интервала времени от начала воздействия до выдачи управляющей команды.

В экспериментах, направленных на оценку вероятности ошибки 2-го рода, исходными событиями являются ложные срабатывания датчиков, времена проявления которых моделируются на интервале контроля на основе заданных интенсивностей ложных тревог. В процессе моделирования могут появляться новые промежуточные события, аналогичные описанным выше. Конечным исходом одного эксперимента может быть либо ошибочное формирование управляющей команды, либо сброс полученных сигналов. Выходными показателями для серии экспериментов являются вероятности ошибки 2 –го рода, рассчитываемые как доля числа случаев ошибочного формирования логическим автоматом различных управляющих команд на интервале контроля. Необходимо отметить, что оценка вероятности ошибки 2-го рода до последнего времени проводилась в основном расчетным методом по приближенным формулам из-за крайне малых интенсивностей выдачи ложных сигналов информационными датчиками [5]. Нами же на основе использования принципа подобия, а также режима моделирования в сжатом времени практически отработан вопрос расчетно-экспериментальной оценки этой вероятности непосредственно на штатном программном обеспечении логических автоматов с применением имитационного моделирования ложных сигналов информационных датчиков [6].

Формирование схем моделирования логического автомата с учетом особенностей его функционирования при анализе необходимости и достаточности информации для формирования управляющей команды определенного типа является наиболее трудоемкой задачей. Суммарное число возможных последовательностей для заданного числа датчиков с учетом сочетаний и перестановок сигналов довольно велико. Так, например, для восьми датчиков, что соответствует восьми логическим

переменным (ЛП), возможно почти 110 тысяч различных вариантов последовательностей. При этом наиболее рациональным подходом является создание универсальных схем моделирования функционирования логического автомата, которые можно гибко адаптировать под конкретные проекты ИУС. Для практических задач, по нашему мнению, достаточно восьми универсальных схем моделирования логических автоматов, классификация логических функций (ЛФ) которых показана на рис. 2.

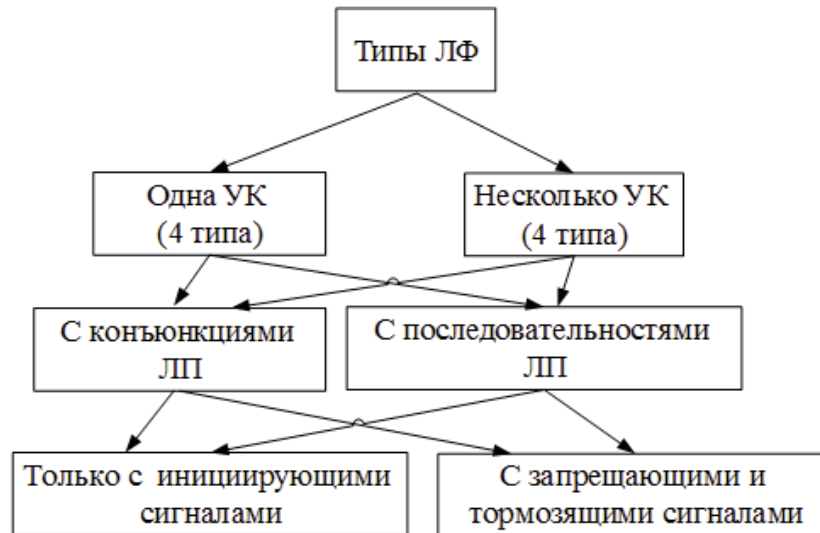


Рис. 2. Классификация логических функций логических автоматов

На рисунке 3 представлена одна из универсальных схем моделирования функционирования логического автомата, формирующего одну управляющую команду на основе логической функции в составе M критичных последовательностей N иницирующих входных сигналов. Схема запатентована в качестве способа и устройства [7] и содержит M блоков формирования управляющей команды в соответствии с количеством критичных последовательностей логической функции. Для моделирования требуемой реакции логического автомата на все возможные последовательности сигналов использованы комбинации логических операторов «И», «ИЛИ», а также аналоги таких устройств как таймеры и триггеры. Каждый блок формирования сигнала содержит позиционный регистр записи и хранения полученных входных сигналов от информационных датчиков 4_1-4_N , позиционный регистр задания i -й последовательности, состоящий из триггеров 6_1-6_N , группу из $N-1$ триггеров 7_1-7_{N-1} задания приоритета последовательности поступления входных сигналов, первую группу из $N-1$ элементов ИЛИ 5_1-5_{N-1} , первую группу из N элементов И 8_1-8_N , вторую группу из N элементов ИЛИ 9_1-9_N , вторую группу из $N-1$ элементов И 10_1-10_{N-1} , элемент И 11 , входы информационных сигналов 13_1-13_N и выход управляющей команды 14 .

При поступлении сигнала от любого информационного датчика через элемент ИЛИ 2 таймером 3 запустится интервал сброса. Если в течение интервала сброса не поступят другие сигналы от информационных датчиков, то поступивший сигнал признается ложным и сбрасывается. Если в течение интервала сброса поступит сигнал от другого датчика, то данный сигнал через элемент ИЛИ 2 перезапустит таймер 3 . При этом, если последовательность поступивших сигналов не соответствует ни одной из критичных, то управляющая команда не формируется и по истечении интервала сброса соответствующие триггеры 4 установятся в нулевое состояние.

Схема моделирования логического автомата, когда логическая функция задана не последовательностями, а M конъюнкциями N иницирующих входных сигналов также запатентована, но она намного проще, так как критичные комбинации входных сигналов «засчитываются» в любой последовательности.

В ряде случаев для формирования управляющей команды необходимо не только получение за определенный промежуток времени критичной последовательности сигналов, но и неполучение сигналов тормозящего или запрещающего типов. События неполучения таких сигналов записываются в логической функции с помощью логического оператора «отрицание». Запрещающие сигналы применяются с целью дополнительной возможности сброса всех полученных сигналов либо уполномоченным на это оператором, либо автоматически при наличии особо достоверного датчика контроля, если ими установлен факт отсутствия воздействия. Тормозящие сигналы применяются для установления временной задержки выдачи сформированной команды после получения последнего сигнала критичной последовательности с целью предоставления возможности уполномоченному оператору прояснить обстановку и выдать при необходимости запрещающий сигнал. Данная универсальная схема моделирования логического автомата с входами для тормозящего и запрещающего сигналов также запатентована. Она содержит дополнительные элементы «ИЛИ» и «И» для обработки тормозящего сигнала и триггер для запрещающего сигнала.

Естественно, что для автоматизации процесса адаптации универсальной модели функционирования логического автомата под конкретный проект потребовалось разработать специальную настроечную модель. Ее задачей является настройка активных входов и регистров триггеров модели, соответствующих конкретному виду заданной логической функции.

Поскольку оценка ВВХ ошибок 1-го и 2-го рода не является самоцелью, а всего лишь средством для выбора проекта ИУС, решающего определенные задачи с требуемым качеством, то дополнительно была разработана модель формирования альтернативных вариантов логической функции. Она реализована двумя способами: методом полного перебора (для ограниченного числа датчиков) и методом направленного перебора (для произвольного числа датчиков). Во втором случае фактически решается задача нелинейного программирования - синтез варианта, удовлетворяющего ограничениям по ВВХ ошибок 1-го и 2-го рода и обеспечивающего минимум затрат на реализацию ИУС.

Структура программного комплекса

Структура программного комплекса приведена на рис. 4 и включает прикладные программы и систему моделирования [8]. К прикладным относятся модель формирования альтернативных вариантов логической функции, настроечная модель, модель сценариев воздействия, модели логического автомата и датчиков (информационных каналов), реализованных в виде микросервисов.

Система моделирования – это распределённая система, включающая сервер RabbitMQ с оркестратором, в которой RabbitMQ выступает в роли брокера сообщений, а оркестратор управляет распределением задач и обработкой сообщений. Она позволяет выбирать разыгрываемый сценарий и режим моделирования; управлять ходом эксперимента, «общаясь» с моделями датчиков, асинхронно обмениваться данными между приложениями и микросервисами; реализовывать шаблоны асинхронной коммуникации (например, «очередь сообщений»); распределять нагрузку между сервисами, обеспечивая баланс потока данных.

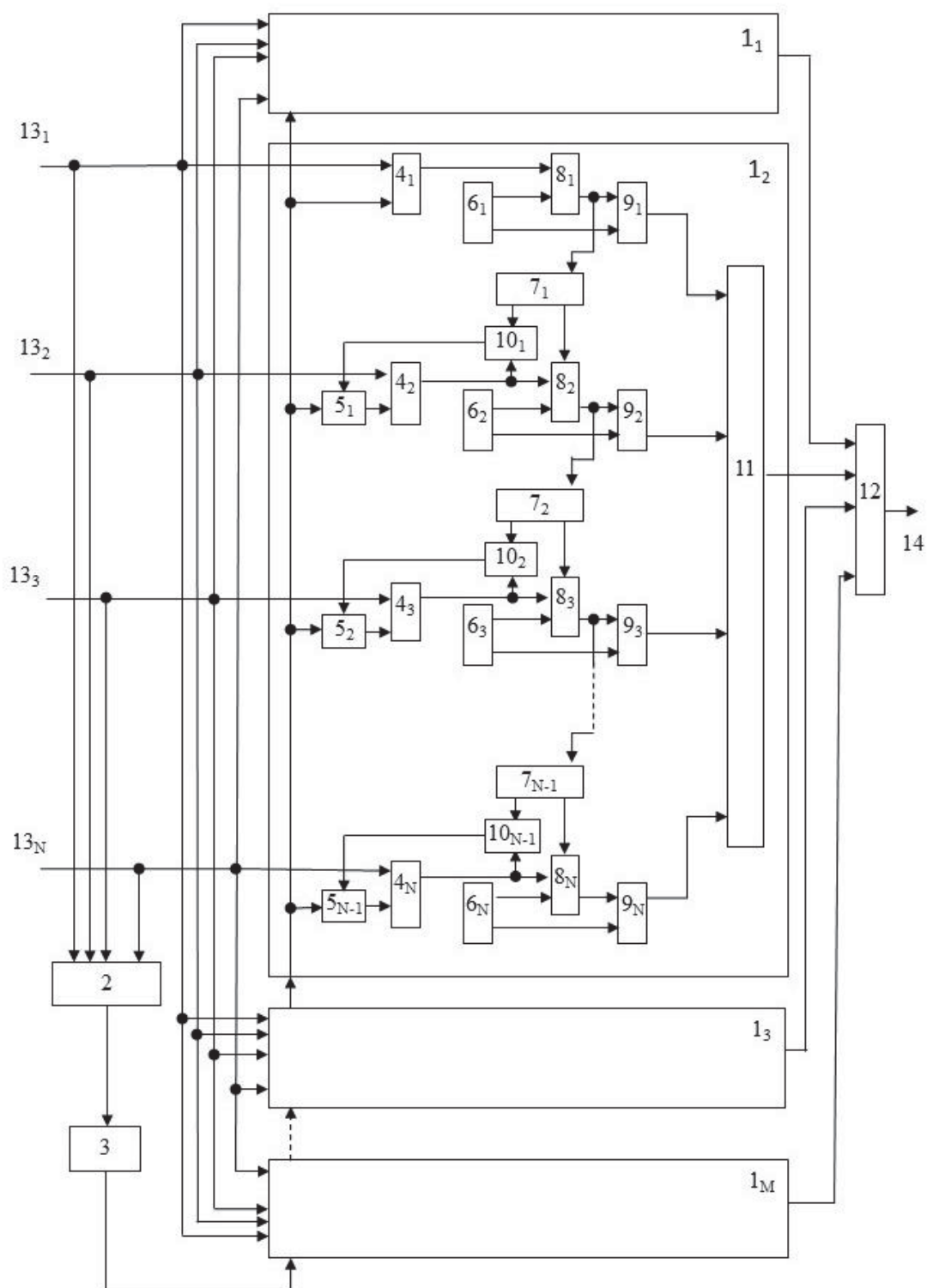


Рис. 3. Универсальная схема моделирования функционирования логического автомата, формирующей одну управляющую команду на основе установленных последовательностей сигналов

Система моделирования может задавать три режима моделирования: в реальном времени, в модельном и в сжатом. Если к системе моделирования подключается реальный прибор (полунатурные испытания), то весь эксперимент происходит только в реальном времени.



Рис. 4. Структура программного комплекса

В модельном режиме времени система моделирования рассылает метки текущего времени, ускоряя или замедляя течение времени в эксперименте, а модели, получая метки времени, реагируют в соответствии со своими алгоритмами.

Представление результатов моделирования

Исходные данные для моделирования автоматического формирования команд ИУС на основе данных контроля деструктивного воздействия приведены в табл. 1. Рассмотрены пять вариантов логических функций автомата для ИУС с 10 датчиками:

$$F_1(A) = A_1 A_2;$$

$$F_2(A) = A_1 A_2 + A_2 A_3;$$

$$F_3(A) = A_1 A_2 + A_2 A_3 + A_3 A_4;$$

$$F_4(A) = A_1 A_2 + A_2 A_3 + A_3 A_4 + A_5 A_6 A_7;$$

$$F_5(A) = A_1 A_2 + A_2 A_3 + A_3 A_4 + A_5 A_6 A_7 + A_6 A_7 A_8.$$

Таблица 1. - Исходные данные по составу, характеристикам и размещению датчиков ИУС

Параметр	Тип датчика							
	1	2	3	4	5	6	7	8
№ зоны (1-7)	1	2	3	4	5	6	7	7
Количество датчиков (10)	1	1	2	1	1	2	1	1
Тик времени появления признака (1...7)	1	2	3	4	5	6	7	7
Вероятность регистрации	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,8	0,5
Интенсивность ложных тревог, t^{-1}	10^{-3}							

Результаты моделирования приведены в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2. - Лог событий в отдельных экспериментах для варианта ИУС № 4

№ эксперимента	Временные тики получения сигналов							Результат (критичная последовательность)	Тик времени
	1	2	3	4	5	6	7		
1	A ₁	A ₂		A ₄	A ₅			УК (A ₁ -A ₂)	3
2		A ₂	A ₃		A ₆			УК (A ₂ -A ₃)	5
3			A ₃		A ₅	A ₆		сброс A ₃ (пропуск)	
4		A ₂			A ₅	A ₆	A ₇	УК (A ₅ -A ₆ -A ₇)	7
5			A ₃	A ₄		A ₆		УК (A ₃ -A ₄)	4
6	A ₁		A ₃		A ₅			сброс A ₁ , A ₃ (пропуск)	
7	A ₁						A ₆	сброс A ₁ (пропуск)	

Таблица 3. - Выходные показатели для серии экспериментов

№ варианта ИУС	1	2	3	4	5
Вероятность формирования УК	0,26	0,42	0,77	0,91	0,93
Вероятность ошибки 2-го рода на интервале 100 тиков	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4. - Закон распределения интервала времени формирования управляющей команды от начала воздействия (для варианта ИУС № 4)

Параметр	Интервалы времени, тик					
Время	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
Вероятность	0,01	0,12	0,27	0,48	0,09	0,03

Таким образом, показана возможность исследовать на универсальной модели логического автомата любое из практической области количество контролируемых разнородных признаков (входных сигналов), выбирать дизъюнктивно-конъюнктивную логическую функцию любого вида с возможностью задания порядка поступления сигналов в произвольной или в строго определенной последовательности.

Заключение

Представленный программный комплекс имитационного моделирования автоматического формирования команд ИУС характеризуется следующими основными возможностями:

– реализация разнообразных сценариев внешних деструктивных воздействий, а также потоков ложных тревог различной интенсивности;

- решение на основе моделирования как задачи оценки ВВХ формирования управляющих команд, так и, впервые, вероятности ошибки второго рода;
- реализация системы моделирования на RabbitMQ с оркестратором и трех режимов моделирования: в реальном времени, в модельном и в сжатом;
- автоматическое формирование альтернативных проектов ИУС и адаптация под них универсальных схем моделирования;
- возможность подключения к системе моделирования штатного программного обеспечения реального логического автомата (полунатурные испытания).

Литература

1. **Шеннон К.Э.** Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ. 1969.
2. **Нейман Дж.** Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. – М.: ИЛ. 956.
3. **Крылов Н.И. и др.** Устройство формирования управляющего сигнала с использованием сбросового режима. Пат. 190478 РФ. Зарегистрирован в Государственном реестре ПМ РФ 02.07.2019 г.
4. **Кондратьев В.О. и др.** Имитационная модель процесса автоматического формирования управляющих сигналов по данным контроля деструктивных воздействий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610883. от 13.01.2023 г.
5. **Голиков В.П. и др.** Метод оценки ошибочного формирования управляющих сигналов логическим автоматом в результате ложного срабатывания средств контроля. Журнал «Двойные технологии». 2017. № 2(79). С.22-27.
6. **Кондратьев В.О. и др.** Программный комплекс оценки ошибочного формирования управляющих сигналов в результате ложного срабатывания средств контроля. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611071. от 16.01.2023 г.
7. **Кондратьев В.О. и др.** Способ и комплекс изделий для централизованного управления критически важными объектами с применением технологии автоматического формирования управляющих команд. Пат. на изобр. № 28286444 от 15.10.2024 г.
8. **Бахтин С.В. и др.** Программный комплекс расчетно-экспериментальной оценки оперативных характеристик автоматического формирования управляющих сигналов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611072. от 16.01.2023 г.