

Модель процесса контроля функционирования системы связи на основе теории Марковских случайных процессов

Monitoring process model of the communication system functioning based on the Markov random processes theory

Лепешкин / Lepeshkin O.

Олег Михайлович

(lepechkin1@yandex.ru)

доктор технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

доцент высшей школы техносферной безопасности.

г. Санкт-Петербург

Вершенник / Vershennik A.

Алексей Васильевич

(Yelena.Vershennik@mail.ru)

ВАС им. С. М. Буденного,

преподаватель кафедры безопасности

инфокоммуникационных систем специального назначения.

г. Санкт-Петербург

Остроумов / Ostroumov O.

Олег Александрович

(oleg-26stav@mail.ru)

кандидат технических наук.

ФГКВООУ ВО «Военная академия связи имени

Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ

(ВАС им. С. М. Буденного),

докторант кафедры безопасности

инфокоммуникационных систем специального

назначения.

г. Санкт-Петербург

Остроумов / Ostroumov M.

Максим Александрович

(Coj1991@mail.ru)

ВАС им. С. М. Буденного,

начальник отделения.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: функциональная устойчивость – functional stability; критичность – criticality; система связи – communication system; система управления – control system; функции – functions; задачи – tasks; профиль – profile; регламент – regulations.

В работе представлена модель процесса контроля функционирования системы связи, предназначенная для оценки выявления конфликтов в системе связи и критичности ее элементов и формирования предложений по их устранению. Динамика изменения состояния системы связи, количества задач и функций, которые она выполняет, определяют необходимость своевременного выявления нарушений устойчивого функционирования системы связи. Для контроля предлагается использовать профиль системы связи, определяющий выполняемые системой функции и задачи. Предлагаемая модель позволяет определять вероятности нахождения процесса контроля функционирования системы в различных состояниях, в зависимости от изменения интенсивностей, характеризующих структуру системы связи и ее ресурсное обеспечение, а также интенсивностей выполнения ею задач и функций. Предложенная модель описывает способность системы связи переходить в состояние, когда отсутствуют конфликты и критичность элементов системы связи. Кроме этого, с использованием модели возможно оценивать способность устранять выявленные в процессе контроля конфликты и снизить критичность элементов системы связи.

The paper presents a monitoring process model of the communication system functioning. Designed to assess the conflicts identification in the communication system and the criticality of its elements and the proposals formation for their elimination. The dynamics of changes in the state of the communication system, the number of tasks and functions that it performs determine the need for timely violations detection of the communication systems stable functioning. For control, it is proposed to use a communication system profile that defines the functions and tasks performed by the system. The proposed model allows you to determine the probabilities of being in the states of the control process depending on the change in intensities that characterize the structure of the communication system and its resource provision, as well as the intensities of its tasks and functions, and allows you to talk about the ability of the communication system to go into a state where there are no conflicts and criticality of elements communication systems, as well as to evaluate the ability to eliminate the identified conflicts and reduce the criticality of the communication system elements.

Развитие современного общества, повсеместное внедрение новых технологий, позволяющих получать различные услуги, приводит к зависимости общества и отдельных людей от устойчивого функционирования технических средств и систем, предоставляющих различные услуги. Существует большая потребность современного общества в получении, обработке и использовании больших объемов информации. Современная техника и системы, участвующие в обмене информацией между пользователями, потребителями услуг и организациями, их предоставляющими, с каждым годом только усложняются, что обусловлено в первую очередь потребностями пользователей, а также увеличением объема информации в мире. Возрастает значение проблемы обеспечения функциональной устойчивости (ФУ) таких систем и средств [1, 2, 3, 4]. Наряду с этим технические средства обеспечения коммуникаций в обществе и государстве приобретают определенную критичность, обусловленную возможностью нарушения выполнения определенного для них функционала [5–8].

Одним из способов решения данной проблемы является создание эффективных систем управления [9–11], обеспечивающих возможность коммуникации в обществе. Как правило, в состав системы управления входят средства или система контроля, предназначенные для формирования условий осуществления воздействия системы управления на контролируемые объекты для обеспечения выполнения их задач и функций.

Под контролем понимается частичная или полная проверка, осуществляемая с тем, чтобы удостовериться в отсутствии определенных классов ошибок или в правильном характере выполнения процесса [12].

Процесс обмена информацией между информационными системами, информационно-телекоммуникационными системами, автоматизированными системами управления, являющимися объектами критической информационной инфраструктуры, осуществляется через элементы систем связи. Кроме этого, системы связи являются одним из ключевых элементов любой системы управления. Все это определяет критичность и важность систем связи для систем управления.

Контроль процесса функционирования систем связи направлен на выявление отклонений в функционировании системы и ее элементов, которые будут причиной нарушения устойчивого функционирования системы связи (СС), т.е. не выполнении ею и ее элементами своих функций и задач. Нарушения функционирования СС связаны с воздействием различных дестабилизирующих факторов искусственного и естественного характера.

В системах связи процесс контроля функционирования системы сводится к контролю параметров, характеризующих техническое состояние технических средств системы. При этом существуют ситуации, когда контролируемые параметры в норме, а технические средства и сама система связи не может обеспечить реализацию своего предназначения, заключающегося в обеспечении обмена информацией, данными, сообщениями в системе управления. Поводом для такого явления могут быть разные причины, например, неполный перечень измеряемых параметров, измерение не тех параметров, а также изменение состояния самого технического средства и условий его функционирования (воздействие внутренних и внешних факторов). Кроме этого, процесс передачи и приема сообщений включает задействование ограниченного количества технических средств, нарушение устойчивого функционирования любого из которых может привести к возникновению ситуации невозможности передачи информации и сообщений в системе управления.

Контроль параметров технических средств не дает информации о способности системы обеспечивать передачу, прием сообщений, а также не позволяет оценивать способность системы реализовать свое целевое предназначение и выполнять функции и задачи. Требуется определение параметров, характеризующих выполнение задач и функций системы, а также преобразование совокупности взаимосвязанных функций и задач и характеризующих их параметров в виде задания на контроль для системы контроля. Предлагается в качестве основного элемента системы контроля использовать профиль функционирования системы связи [1, 13, 14], характеризу-

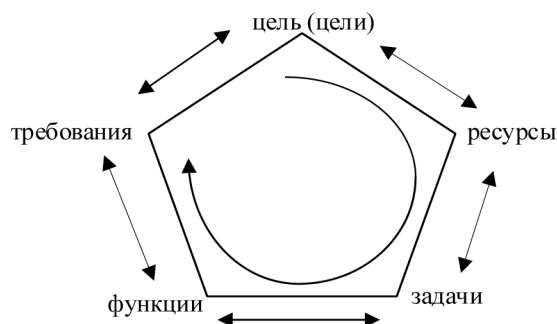


Рис. 1. Концептуальная модель функционирования системы связи

ющий взаимосвязанные цели системы, требования, предъявляемые к ней, функции, задачи и ресурсы системы (рис. 1). Под ресурсами системы могут пониматься технические средства, персонал, характеристики каналов связи и др.

Способность системы связи формировать и предоставлять ресурсы для выполнения задач и функций обусловлена в первую очередь ее составом и структурой. Учет структуры системы и пространственно-разнесенных элементов характеризуют способность системы связи выполнить профиль системы. В процессе функционирования системы связи происходит изменение состояния системы и ее элементов, что может приводить к изменению профиля, т.е. появлению новых задач, а также изменению использования пространственно-разнесенного ресурса системы для выполнения текущих задач и вновь появившихся. Контроль выполнения профиля позволит оценивать возможности системы связи по выполнению задач, снизит нагрузку на каналы связи, предназначенные для передачи информации в системе контроля, за счет уменьшения времени контроля (не постоянный контроль, а контроль по выполняемым текущим задачам и функциям), а также позволит своевременно реагировать на изменения состояния системы связи, которые являются причиной невыполнения профиля.

Процесс контроля должен обладать следующими свойствами: полнотой, объективностью, достоверностью и непрерывностью.

Для исследования процесса контроля системы связи и повышения его эффективности актуальной является задача разработки математических моделей, характеризующих процесс контроля и позволяющих определять вероятностно-временные зависимости событий, происходящих в системе, обуславливающих состояние самой системы и ее элементов. Для решения данной

задачи предлагается использовать математической аппарат теории Марковских случайных процессов.

Процесс контроля функционирования СС можно представить в виде ориентированного графа состояний (рис. 1) и описать терминами теории Марковских случайных процессов с дискретным состояниями и непрерывным временем, под которым понимается процесс, у которого в любой момент времени t множество его состояний S – счетно и конечно, при этом переход из одного состояния в другое может происходить в любой момент времени в процессе функционирования системы (проводимого моделирования) [15, 16].

Предполагается, что переход из состояния в другое состояние происходит под действием пуассоновского потока событий [15].

Для получения вероятностно-временных характеристик, описывающих процесс контроля функционирования СС для ориентированного графа (рис. 1), составлена система обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова [17].

Для системы уравнений задаются начальные условия. Исходя из возможных состояний, вектор вероятностей начальных состояний Марковской цепи в начальный момент времени имеет вид

$$p_i(0) = (10000000000000000).$$

Задавая численные значения интенсивностей λ и переходя к непрерывному времени $t \rightarrow \infty$, решается система линейных дифференциальных уравнений (ЛДУ) с постоянными коэффициентами (однородный Марковский процесс). Для любого момента времени t сумма всех вероятностей состояний равна единице

$$\sum_{i=1}^{16} p_i(t) = 1.$$

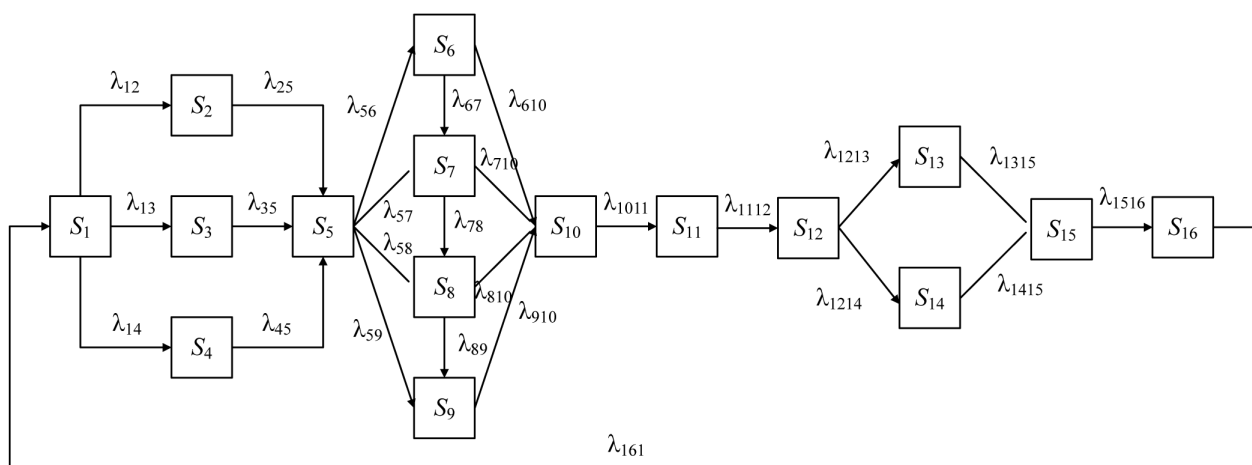


Рис. 2. Ориентированный граф состояний процесса контроля функционирования СС

Характер выбранных значений интенсивностей определяется в соответствии с выбранной стратегией, а также заданными исходными данными.

Учет в Марковской модели времени пребывания системы контроля в каждом из состояний в зависимости от стратегий позволяет исследовать временную динамику процесса контроля функционирования СС и оценить вероятность нахождения СС в устойчивом состоянии.

$$\begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{161} p_{16}(t) - (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{12} p_1(t) - \lambda_{25} p_2(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{13} p_1(t) - \lambda_{35} p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= \lambda_{14} p_1(t) - \lambda_{45} p_4(t) \\ \frac{dp_5(t)}{dt} &= \lambda_{25} p_2(t) + \lambda_{35} p_3(t) + \lambda_{45} p_4(t) - (\lambda_{56} + \lambda_{57} + \lambda_{58} + \lambda_{59}) p_5(t) \\ \frac{dp_6(t)}{dt} &= \lambda_{56} p_5(t) - (\lambda_{67} + \lambda_{610}) p_6(t) \\ \frac{dp_7(t)}{dt} &= \lambda_{57} p_5(t) + \lambda_{67} p_6(t) - (\lambda_{78} + \lambda_{710}) p_7(t) \\ \frac{dp_8(t)}{dt} &= \lambda_{58} p_5(t) + \lambda_{78} p_7(t) - (\lambda_{89} + \lambda_{810}) p_8(t) \\ \frac{dp_9(t)}{dt} &= \lambda_{59} p_5(t) + \lambda_{89} p_8(t) - \lambda_{910} p_9(t) \\ \frac{dp_{10}(t)}{dt} &= \lambda_{610} p_6(t) + \lambda_{710} p_7(t) + \lambda_{810} p_8(t) + \lambda_{910} p_9(t) - \lambda_{1011} p_{10}(t) \\ \frac{dp_{11}(t)}{dt} &= \lambda_{1011} p_{10}(t) - \lambda_{1112} p_{11}(t) \\ \frac{dp_{12}(t)}{dt} &= \lambda_{1112} p_{11}(t) - (\lambda_{1213} + \lambda_{1214}) p_{12}(t) \\ \frac{dp_{13}(t)}{dt} &= \lambda_{11132} p_{12}(t) - \lambda_{1315} p_{13}(t) \\ \frac{dp_{14}(t)}{dt} &= \lambda_{1214} p_{11}(t) - \lambda_{1415} p_{14}(t) \\ \frac{dp_{15}(t)}{dt} &= \lambda_{1415} p_{14}(t) + \lambda_{1315} p_{13}(t) - \lambda_{1516} p_{15}(t) \\ \frac{dp_{16}(t)}{dt} &= \lambda_{1516} p_{15}(t) - \lambda_{161} p_{16}(t) \\ \sum_{i=1}^{16} p_i(t) &= 1 \end{aligned}$$

В процессе функционирования системы связи и ее контроле осуществляется переход из одного состояния в другое, описание которых (входных и выходных потоков событий) представлено в таблице 1.

Решение системы уравнений Колмогорова получено с использованием пакета математического программирования Mathcad 15. Для моделирования рассмотрено несколько стратегий (табл. 2), характеризующих интенсивности потоков событий для ориентированного графа (рис. 2).

Используя известный [17, 18] порядок решения системы ЛДУ методом Рунге-Кутты, учитывая вектор вероятностей начальных состояний $p_i(0)$, интервал интегрирования $[t_0; t_1]$ и число этапов интегрирования n , производится расчет для заданных значений

интенсивностей событий $\lambda_{ij} = \text{const}$ (Марковский однородный процесс) (табл. 2). Это позволит получить приближенные значения p_i искомых решений $p(t)$ на некотором интервале $t \in [t_0; t_1]$.

Определяем интервал интегрирования, например: $t_0 = 0, t_1 = 2$ и число этапов интегрирования, например $n = 1000$.

На основании полученных результатов моделирования построены графики изменения вероятностей наступления событий процесса контроля функционирования СС для сценариев С1 (рис. 3), С2 (рис. 4) и С3 (рис. 5), которые показывают изменение состояния процесса контроля функционирования СС. Анализ графиков показывает (рис. 3, 4, 5), что состояния процесса контроля переходят в стационарное на уровне 1000 единиц модельного времени. Максимальные значения вероятностей нахождения системы контроля p_2, p_3, p_4 и p_5 в состояниях сбора данных о состоянии структуры СС фиксируются на начальных этапах моделирования. В последующем происходит уменьшение их значений, что говорит о необходимости минимального изменения структуры СС в процессе обеспечения ФУ СС. Видно, что с увеличением интенсивности сбора данных (увеличением количества элементов в СС), которые характеризуются различными стратегиями, вероятности нахождения системы контроля p_2, p_3, p_4 и p_5 в состояниях S_2, S_3, S_4 и S_5 , уменьшаются.

Для сценариев изменения интенсивностей потоков событий, характеризующих процесс контроля функционирования СС, получены графики вероятностных временных характеристик процесса контроля профиля функционирования СС и процесса формирования сценариев действий по устранению конфликтов в СС и снижению критичности элементов СС.

Рассмотрим более подробно процесс контроля профиля СС, вероятностно-временные характеристики для разных сценариев которого показаны на рисунках 6, 7 и 8. С увеличением интенсивности контроля профиля, т.е. увеличением количества контролируемых задач, функций, требований, предъявляемых к системе связи, максимальные значения вероятностей нахождения в состояниях S_6, S_7, S_8 уменьшаются. Наибольшая вероятность нахождения процесса контроля в состоянии контроля регламента S_{10} при большей интенсивности (контроле большего количества регламентов) достигается быстрее, при этом для сценария С2 вероятность нахождения в состоянии S_{10} быстрее переходит в стационарное состояние. Аналогичное явление наблюдается для состояния S_9 .

Существенное изменение количества элементов СС, задач, функций, требований и целей в СС для сценария С3 приводит к увеличению максимальной вероятности контроля регламента и снижению максимальных значений вероятностей контроля задач, функций, требований и целей.

Таблица 1

Описание состояний процесса контроля функционирования СС

№ п/п	Наименование состояния	№ вх. сообщ.	№ вых. сообщ.
S_1	Формирование профиля процесса функционирования СС	λ_{161}	λ_{12} λ_{13} λ_{14}
S_2	Сбор данных: определение количества узлов связи в системе	λ_{12}	λ_{25}
S_3	Сбор данных: определение количества связей между узлами связи в системе	λ_{13}	λ_{35}
S_4	Сбор данных: определение количества технических средств, находящихся на узлах связи в системе	λ_{14}	λ_{45}
S_5	Сбор данных: определение ресурсного обеспечения системы	λ_{25} λ_{35} λ_{45}	λ_{56} λ_{57} λ_{58} λ_{59}
S_6	Контроль профиля: выполнение задач	λ_{56}	λ_{67} λ_{610}
S_7	Контроль профиля: выполнение функций	λ_{57} λ_{67}	λ_{78} λ_{710}
S_8	Контроль профиля: выполнение требований	λ_{58} λ_{78}	λ_{89} λ_{810}
S_9	Контроль профиля: выполнение целей	λ_{59} λ_{89}	λ_{910}
S_{10}	Контроль профиля: выполнение регламента	λ_{610} λ_{710} λ_{810} λ_{910}	λ_{1011}
S_{11}	Анализ критичности элементов СС	λ_{1011}	λ_{1112}
S_{12}	Анализ результатов контроля профиля и критичности элементов СС	λ_{1012}	λ_{1213} λ_{1214}
S_{13}	Обнаружение конфликта в системе и критичности ее элементов	λ_{1213}	λ_{1315}
S_{14}	Отсутствие конфликта в системе и критичности ее элементов	λ_{1214}	λ_{1415}
S_{15}	Формирование варианта действий по устранению конфликта и снижению критичности элементов системы	λ_{1315} λ_{1415}	λ_{1516}
S_{16}	Принятие системой управления решения по устранению конфликта, снижению критичности, синтез системы	λ_{1516}	λ_{161}

Интенсивности потоков событий для каждой из стратегий

№ п/ п	Интенсивность потока событий	λ	Значения интенсивностей потоков событий для стратегии		
			C1	C2	C3
1	на формирование профиля процесса функционирования СС по результатам контроля и устранения конфликтов и критичности в СС	λ_{161}	10	50	100
2	на сбор данных: определение количества узлов связи	λ_{12}	10	10	30
3	на сбор данных: определение количества связей между узлами связи	λ_{13}	20	20	50
4	на сбор данных: определение количества технических средств на УС	λ_{14}	50	50	100
5	на определение ресурсного обеспечения системы, исходя из количества УС	λ_{25}	10	10	30
6	на определение ресурсного обеспечения системы, исходя из количества связей между УС	λ_{35}	20	20	50
7	на определение ресурсного обеспечения системы, исходя из количества технических средств на УС	λ_{45}	50	50	100
8	на контроль профиля: выполнение задач	λ_{56}	50	70	100
9	на контроль профиля: выполнение функций	λ_{57}	20	30	50
10	на контроль профиля: выполнение требований	λ_{58}	10	15	30
11	на контроль профиля: выполнение целей	λ_{59}	10	10	10
12	на контроль профиля: выполнение функций, исходя из выполняемых задач	λ_{67}	50	70	100
13	на контроль профиля: выполнение требований, исходя из выполняемых функций	λ_{78}	20	30	50
14	на контроль профиля: выполнение целей, исходя из выполняемых требований	λ_{89}	10	15	30
15	на контроль профиля: выполнение регламента, характеризующего задачи СС	λ_{610}	50	70	100
16	на контроль профиля: выполнение регламента, характеризующего функции СС	λ_{710}	20	30	50

17	на контроль профиля: выполнение регламента, характеризующего требования СС	λ_{810}	10	15	30
18	на контроль профиля: выполнение регламента, характеризующего цели СС	λ_{910}	1	5	5
19	на анализ критичности элементов СС	λ_{1011}	10	15	15
20	на анализ результатов контроля профиля и критичности элементов СС	λ_{1112}	50	70	100
21	на обнаружение конфликта и критичности элементов СС	λ_{1213}	1	2	5
22	на отсутствие обнаружения конфликта в системе и критичности ее элементов	λ_{1214}	9	15	50
23	на формирование сценариев действий по устранению конфликтов и снижению критичности элементов СС	λ_{1315}	1	2	5
24	на формирование сценариев действий СС	λ_{1415}	9	15	50
25	на принятие системой решения по устранению конфликта, снижению критичности, синтез СС	λ_{1516}	1	2	3

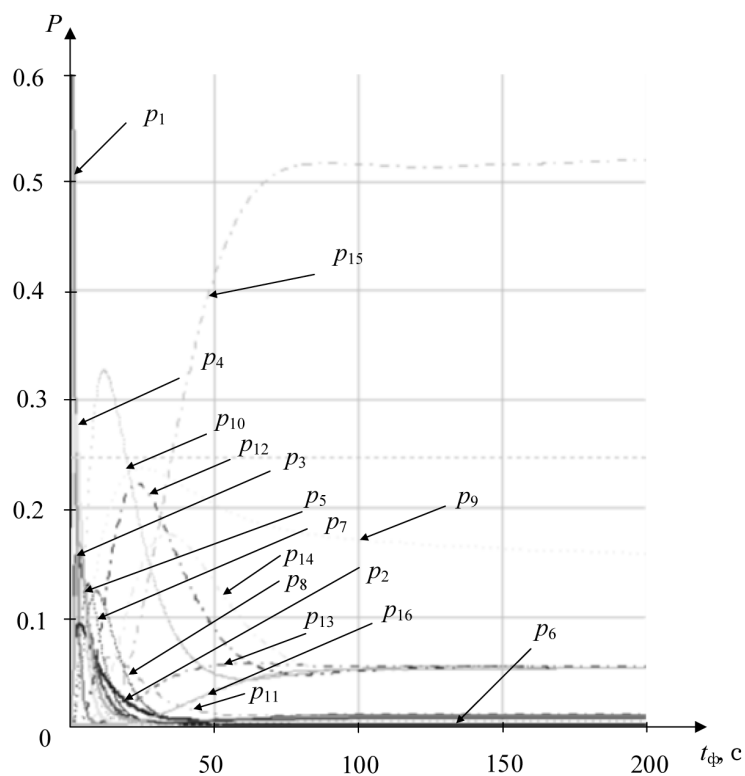


Рис. 3. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля функционирования СС для стратегии С1

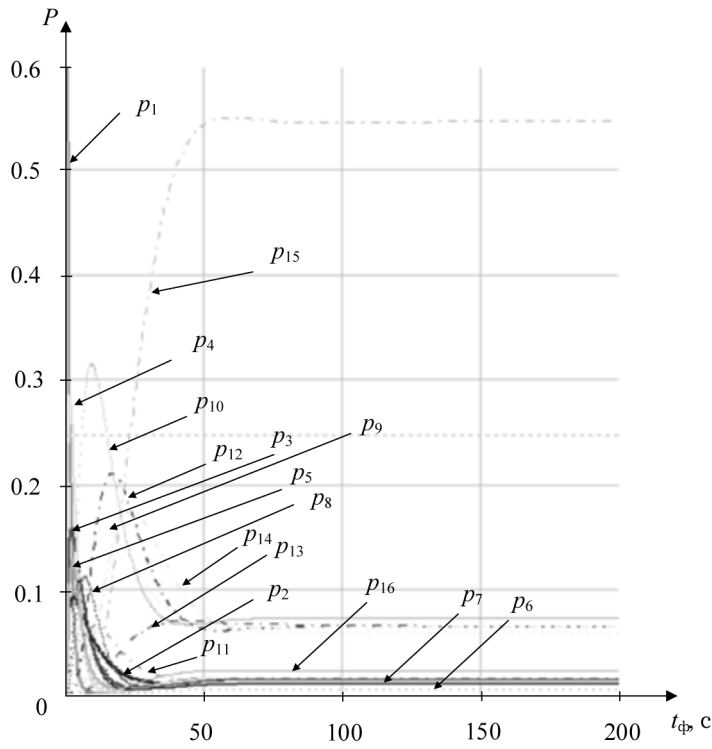


Рис. 4. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля функционирования СС для стратегии С2

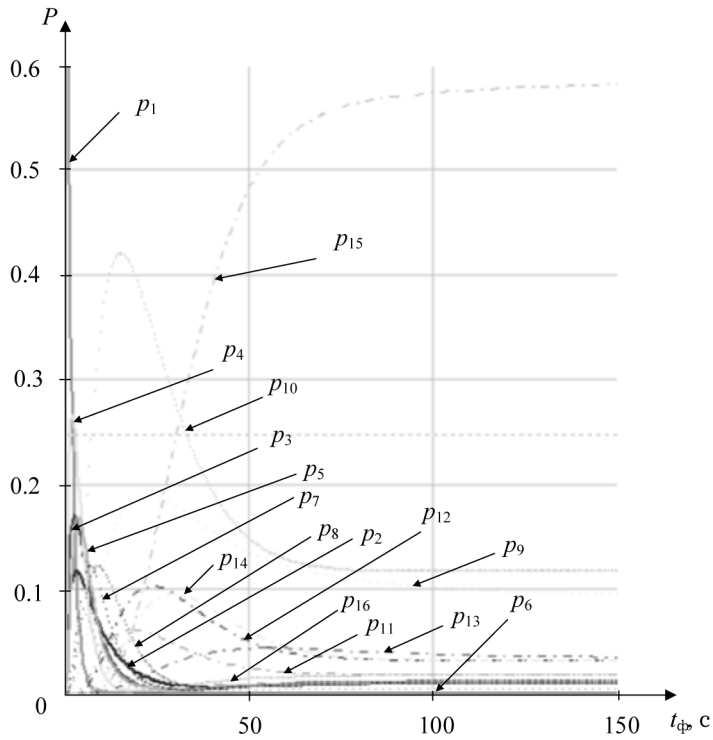


Рис. 5. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля функционирования СС для стратегии С3

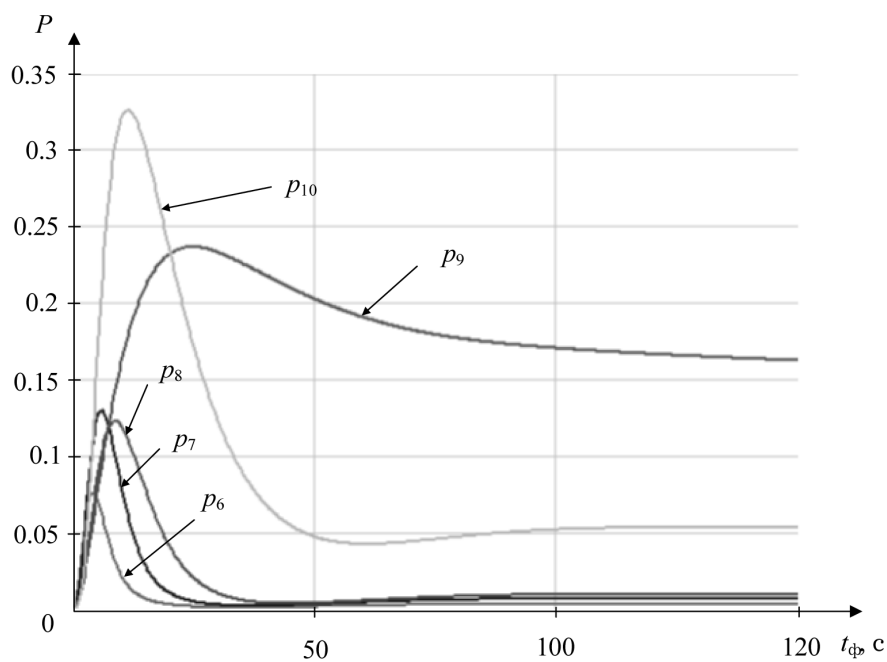


Рис. 6. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля профиля СС для стратегии С1

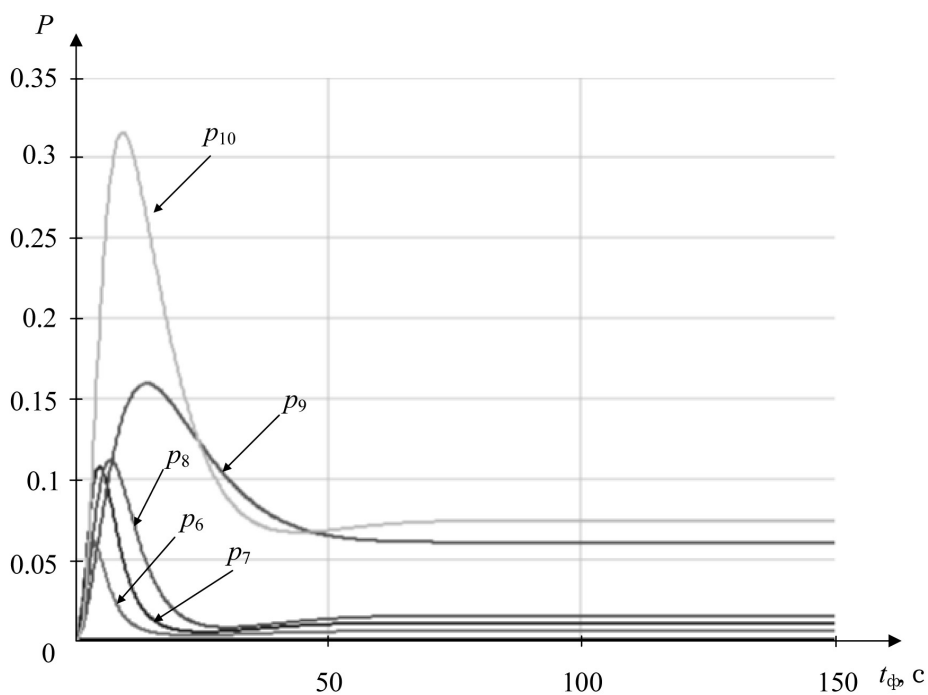


Рис. 7. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля профиля СС для стратегии С2

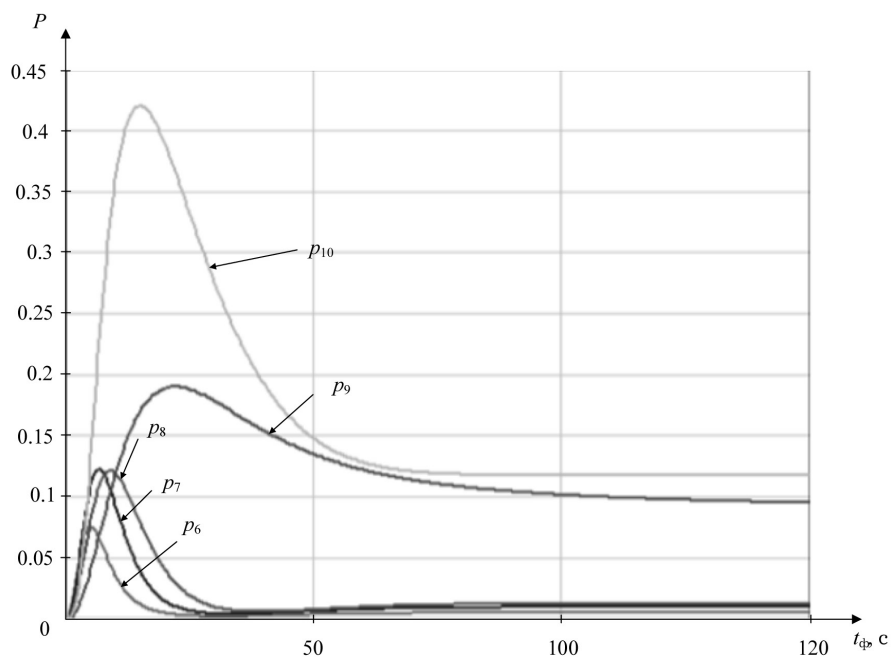


Рис. 8. Вероятностно-временные зависимости состояний процесса контроля профиля СС для стратегии С3

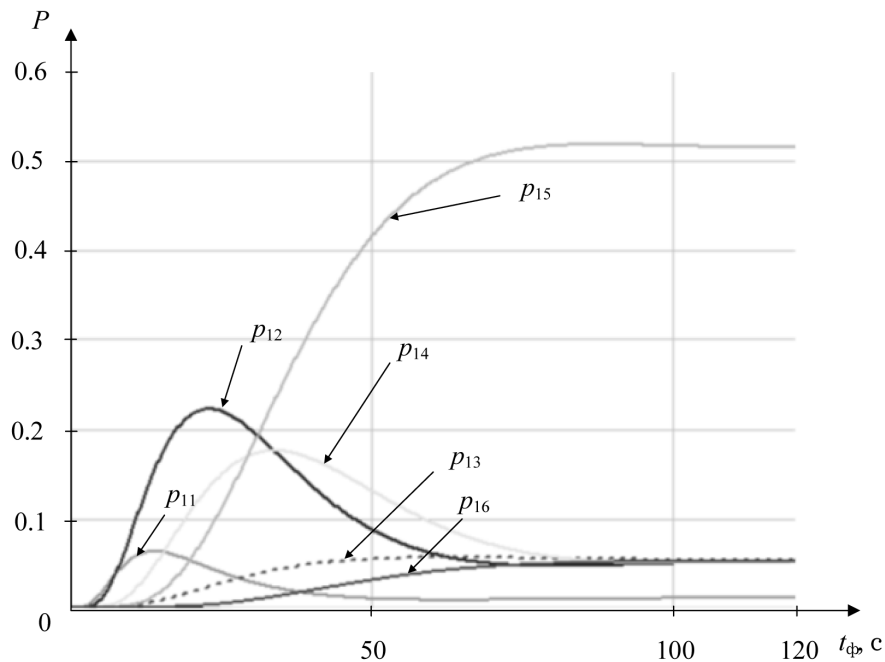


Рис. 9. Вероятностно-временные зависимости состояний анализа результатов контроля и принятия решения на устранение конфликтов в СС и снижению критичности ее элементов для стратегии С1

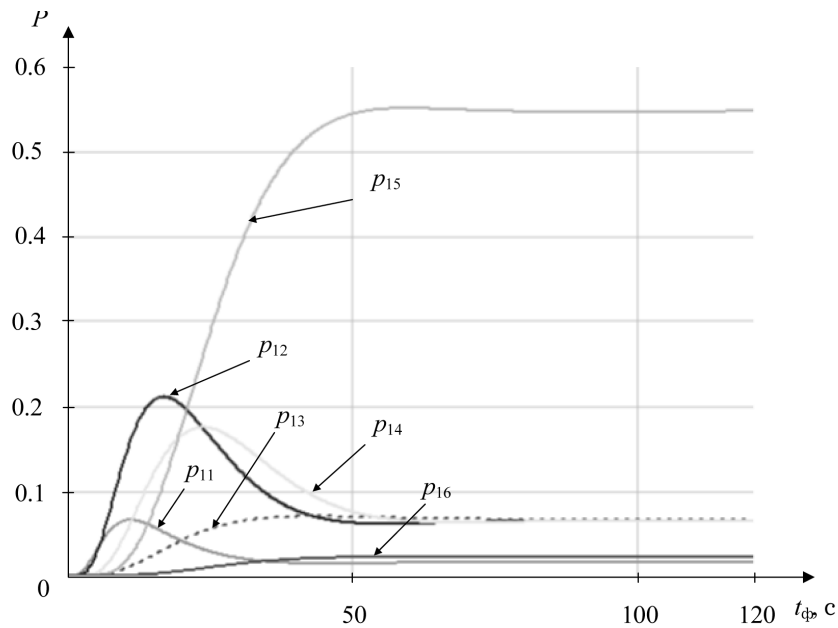


Рис. 11. Вероятностно-временные зависимости состояний анализа результатов контроля и принятия решения на устранение конфликтов в СС и снижению критичности ее элементов для стратегии С3

Анализ вероятностно-временных характеристик состояний результатов контроля, принятия решения на устранение конфликтов в СС и снижения критичности ее элементов для стратегий С1 (рис. 9), С2 (рис. 10) и С3 (рис. 11) показывает, что система связи с увеличением интенсивности контроля переход в состояние отсутствия конфликтов и критичности в ней, что занимает меньшее время. Процесс контроля переходит быстрее в стационарное состояние. Количество выявленных конфликтов и критических элементов уравнивается действиями СС по устранению таких явлений. Вероятность формирования сценариев действий по устранению конфликтов и снижению критичности от С1 к С3 растет, что показывает, что с увеличением количества элементов в СС, задач и функций, возрастает интенсивность устранения нарушения функционирования СС.

Заключение

Полученная в работе модель процесса контроля функционирования СС, описанная в теории случайных Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, обладает теоритической и практической новизной и позволяет получать вероятностно-временные характеристики, характеризующие процесс контроля функционирования СС при изменяющихся потоках событий, описывающих состояния графа (процесса контроля), представленного на рисунке 2.

Полученные результаты могут использоваться при планировании связи в системах управления, а также как основа для проектирования, построения и синтеза системы связи в условиях изменяющейся обстановки.

Литература

1. Остроумов, О. А. Проблема обеспечения функциональной устойчивости систем критически важных объектов / О.А. Остроумов // Электросвязь. – 2022. – № 1. – С. 38–42.
2. Петренко, С. А. Концепция поддержания работоспособности киберсистем в условиях информационно-технических воздействий / С.А. Петренко // Труды ИСА РАН. – 2009. – Т. 41. – С. 175–193.
3. Методология обеспечения функциональной устойчивости иерархических организационных систем управления / Б.В. Дурняк, О.А. Машков, Л.М. Усаченко, В.И. Сабат // Сборник научных статей : Институт проблем моделирования в энергетике, НАН Украины. – 2008. – Вып. 48. – С. 3–21.
4. Липаев, В. В. Надежность и функциональная безопасность комплексов программ реального времени / В.В. Липаев. – Москва : РАН, 2013. – 210 с.
5. Лепешкин, О. М. Систематизация основ методологии синтеза критической информационной инфраструктуры Российской Федерации / О.М. Лепешкин, О.А. Остроумов, А.Д. Синюк // Военная мысль. – 2021. – № 8. – С. 109–114.
6. Bologna, S. Cyber Security and Resilience of Industrial Control Systems and Critical Infrastructures / S. Bologna, A. Fasani, M. Martellini // Cyber Security / Ed. M. Martellini. – Luxemburg : Springer, 2013. – P. 57–72.

7. Лепешкин, О. М. Выполнение регламента процесса управления – критерий определения критичности системы / О.М. Лепешкин, О.А. Остроумов, Н.В. Савищенко // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность». Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции (Анапа, 21–22 апреля 2021 г.). – Анапа : ФГАУ «Военный инновационный технополис "ЭРА"». – С. 625–634.

8. Cyber Resilience Framework for Industrial Control Systems: Concepts, Metrics, and Insights / M.A. Haque, G.K. De Teyou, S. Shetty, B. Krishnappa // 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI) (Miami, FL, USA, 09–11 November, 2018). – 2018. – P. 25–30.

9. Burlov, V. Parameters of the synthesized model of management of technosphere safety in the region / V. Burlov, O. Lepeshkin, M. Lepeshkin // E3S Web of Conferences, Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019). – 2020. – Vol. 164. – P. 9.

10. Боговик, А. В. Теория управления в системах военного назначения : учебник / А.В. Боговик, В.В. Игнатов. – Санкт-Петербург : ВАС, 2008. – 460 с.

11. Иванов, В. Г. Модель технической основы системы управления специального назначения в едином информационном пространстве на основе конвергентной инфраструктуры системы связи : монография / В.Г. Иванов. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 214 с.

12. Селиванов, С. Н. Краткий толковый словарь по вычислительной технике и программированию / С.Н. Селиванов. – Ижевск : Издательство ИжГТУ, 1996. – 89 с.

13. Остроумов, О. А. Модель контроля функционирования системы связи / О.А. Остроумов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 300–310.

14. Концептуальная модель контроля функций системы связи для выявления конфликтных ситуаций / А.Д. Синюк, А.И. Сатдинов, Ю.В. Кондрашов, О.А. Остроумов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 21–27.

15. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Москва : Наука, 1991. – 384 с.

16. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – Москва : Наука, 1988. – 208 с.

17. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – Москва : Советское радио, 1977. – 488 с.

18. Вержбицкий, В. М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения) : учебное пособие / В.М. Вержбицкий. – Москва : Высшая школа, 2001. – 381 с.