

УДК 004.051

doi: 10.53816/20753608_2025_4_37

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОТОКА КОМАНДНО-ПРОГРАММНОЙ ИНФОРМАЦИИ
В МНОГОУРОВНЕВЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

**METHODOLOGY FOR CALCULATING THE PROBABILITY-TIME
CHARACTERISTICS OF THE FLOW
OF COMMAND-PROGRAM INFORMATION
IN MULTILEVEL HIERARCHICAL CONTROL SYSTEMS**

По представлению чл.-корр. РАРАН В.А. Кежаева

Л.Е. Богатов, В.Ф. Волков, Н.А. Шуваев

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

L.E. Bogatov, V.F. Volkov, N.A. Shuvaev

Разработана методика оценивания вероятностно-временных характеристик потока командно-программной информации в многоуровневых иерархических системах управления. При моделировании прохождения сигналов учитываются ограничения, обусловленные цикличностью движения потребителей целевой информации. Разработанная методика включает реализацию имитационных циклов и требования к вероятности предотвращения несанкционированного доступа в автоматизированные системы управления (АСУ).

Ключевые слова: вероятностно-временные характеристики, иерархическая система управления, код подтверждения, перемаршрутизация, ошибки первого и второго рода.

A methodology has been developed for estimating the probabilistic-temporal characteristics of the flow of command and program information in multilevel hierarchical control systems. When modeling the passage of signals, the limitations caused by the cyclical movement of consumers of target information are taken into account. The developed methodology includes the implementation of simulation cycles and requirements for the probability of preventing unauthorized access to the automated control system (ACS).

Keywords: probability-time characteristic, hierarchical control system, confirmation code, rerouting, errors of the first and second kind/

Введение

В настоящее время в связи с неопределенностью результатов начавшейся реконфигурации глобальной экономики резко возросла значимость создания дополнительных программно-аппаратных средств, обеспечивающих информационную безопасность производственных, финансовых и

управленческих структур. Так как в условиях интенсивной цифровизации всех организационных уровней обоснование управленческих решений зависит от достоверности входных и выходных данных, то возникает необходимость разработки научно-методического аппарата для расчета вероятностно-временных характеристик соответствующих автоматизированных систем управления

(АСУ). Вопросы оптимизации сетевой структуры АСУ рассматривались во многих работах, посвященных учету пропускной способности дуг сети, топологии узлов, организации направленного перебора с отбрасыванием неэффективных вариантов [1–8]. Однако при этом не решалась задача обоснования облика подсистемы, дополнительно включаемой в структуру АСУ с целью расчета вероятностно-временных характеристик потока командно-программной информации в многоуровневых иерархических системах управления (МИСУ).

Постановка задачи

Рассмотрим функционирование некоторой иерархической системы управления с числом уровней не менее трех (рис. 1).

Наиболее распространенным частным показателем эффективности АСУ такого типа является вероятность доведения управляющего сигнала до потребителей за заданное или минимальное время [1, 2, 9, 10]. Будем полагать, что предварительное распределение управляемых объектов (3 уровень) между пунктами управления второго уровня произведено. Задача маршрутизации может рассматриваться в двух вариантах:

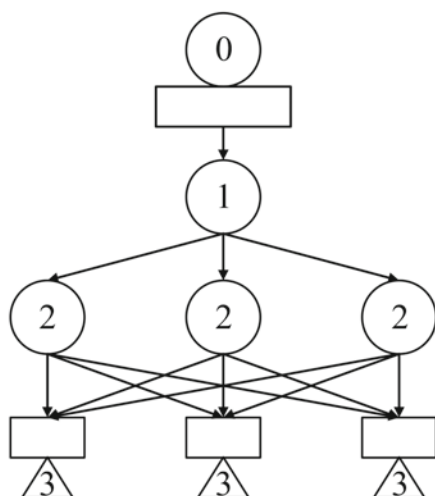


Рис. 1. Общая схема доведения информации до исполнительного уровня: 0 — центр принятия концептуальных решений; 1 — уровень решения задачи распределения маршрутов по информационным направлениям; 2 — уровень выработки управляющего сигнала для назначенного объекта; 3 — уровень доведения и реализации управляющего сигнала

– передача информации, включая управляющий сигнал, осуществляется через общую сеть Министерства связи;

– исследуемая МИСУ имеет собственную систему передачи данных (СПД).

Для первого варианта целесообразно использовать общеизвестные [5, 7, 8] алгоритмы управления коммуникациями с возможной доработкой в целях корректировки распределения сигналов в случае сбоев или информационно-технического воздействия (ИТВ). Для второго варианта вследствие однозначности подключения контролируемой информационной линии при расчетных условиях обстановки первоначально решение задачи выбора для каждого пункта управления не требуется (ниже будет показано, что это упрощение касается только прохождения информации через первый уровень).

Таким образом для любого варианта облика МИСУ, функционирующей в условиях потенциальной деградации сети, возникает задача минимизации времени доведения управляющего сигнала при обеспечении требуемой вероятности его доведения. Решение данной задачи, после ее декомпозиции, может быть получено путем обоснования облика дополнительных защитных подсистем (ДЗП), определения уровня размещения ДЗП в структуре АСУ и разработки алгоритма адаптивной маршрутизации, ориентированного на возможную реконфигурацию сети после воздействия на нее противником. Предварительные исследования показали, что наиболее целесообразным может быть вариант установки ДЗП на верхнем и нижнем уровнях АСУ для блокирования несанкционированных входных сигналов и обеспечения прохождения санкционированных сигналов. Соответствующий алгоритм перемаршрутизации должен быть включен в состав специального математического обеспечения системы взаимосвязанных ДЗП.

Моделирование прохождения командно-программной информации в многоуровневых иерархических системах управления с применением метода Монте-Карло

Примем допущение, что предварительное распределение обслуживаемых объектов между пунктами управления произведено. Для несим-

метричных многоуровневых структур универсальных выражений расчета вероятности доведения сигнала не существует, т.к. при изменении обстановки и, как следствие, при переходе к новой сетевой структуре необходимо получение новой системы выражений. Аналитическое решение такой задачи потребует дополнительных временных затрат, обусловленных необходимостью вычисления характеристик распределения смешанных случайных величин, что создает риск срыва своевременной подготовки предложений для корректировке первоначального плана подготовки применения. Для устранения этого недостатка представляется целесообразным применение метода статистических испытаний. Логика его применения заключается в следующем. Разыгрывается прохождение сигналов на первом уровне. При положительном исходе розыгрыша (удовлетворяются вероятностные условия эквивалентности по надежности [12, 13] и выполняются временные ограничения, а также ограничения по моделированию потока входных сигналов и потока ИТВ, соответствующие данному уровню) осуществляется переход к следующему уровню АСУ. При отрицательном исходе данное статистическое испытание считается неудачным, в вычислительном эксперименте организуется новая попытка.

При имитации временных затрат для иерархических систем [14, 15], предназначенных для доведения информации до подвижных объектов (ПО), описанная процедура усложняется, т.к. в сегментах движения модельного времени необходимо учесть возможный уход ПО из зон досягаемости передаваемой информации (географическая недоступность, геофизические факторы, односторонняя блокировка). Закон распределения участков разрыва информационного взаимодействия может быть определен численным методом для конкретных исходных данных (по структуре АСУ и по обслуживаемым объектам), при этом также проводится дополнительная процедура статистического моделирования. После завершения работы программы моделирования рассчитывается статистическая оценка вероятности доведения управляющего сигнала, математическое ожидание и СКО времени доведения, а также соответствующие доверительный интервал и доверительная вероятность.

Алгоритм моделирования процесса прохождения потока командно-программной информации (КПИ) рассмотрим на примере линейной двухуровневой структуры. На рис. 2 представлен фрагмент алгоритма, где использованы следующие обозначения:

p_1 — вероятность успешной обработки входной информации на первом уровне;

p_2 — вероятность успешной обработки входной информации на втором уровне;

m — число успешных испытаний;

n — индекс текущего испытания;

N — объем вычислительного эксперимента.

Приведенный алгоритм соответствует варианту передачи информации при использовании собственной сети. При этом правая часть первичного временного ограничения определяется характеристиками, указанными в технической документации. При использовании общей СПД в алгоритме моделирования необходимо учесть деградацию результатов решения задач маршрутизации, основанных, например, на методе Беллмана-Мура [2, 5, 8]. Причиной могут быть не только воздействия конкурентов, но и «некорректные» действия операторов. Как правило, доведение сигналов управления от уровня к уровню осуществляется с использованием кода подтверждения фактического доведения корректного сигнала. Время ожидания «обратной квитанции» ограничено

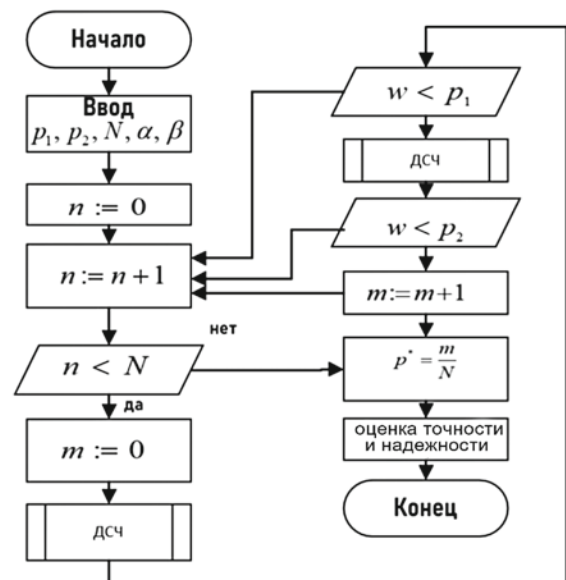


Рис. 2. Алгоритм моделирования процесса прохождения командно-программной информации

и, если по истечению времени квитанция о доставке не получена, то сигнал управления считается утерянным. Такой стандартный способ доведения сигнала позволяет осуществлять контроль передачи управляющей информации и повысить вероятность его успешного получения следующим звеном, однако время доставки управляющего сигнала в этом случае увеличивается [11].

В момент ИТВ на элементы СПД сигналы управления целевыми объектами подвергаются искажению, в этих случаях сигнал немедленно уточняется оператором и сравнивается с сигналом, полученным по другим каналам связи повторным запросом у вышестоящего пункта управления, что также приводит к увеличению времени цикла доставки сигнала и срыву выполнения информационной задачи. Описанная структурная схема доведения сигналов представлена на рис. 3, где показан процесс доведения при использовании алгоритма уточнения через другие каналы связи в случае его замены и реализации алгоритма зонирования для поиска звеньев, способных выдержать увеличившуюся нагрузку (рис. 4, 5).

Таким образом в перечень функций, выполняемых ДЗП, необходимо включить функцию обеспечения обратной связи и реализации процедуры переназначения вследствие «квитирования» или «затухания» сигнала. Вышеописанная ситуация вызывает необходимость перемаршрутизации с учетом степени загрузки комплекса средств автоматизации каждого пункта управления.

Учет вероятностно-временных ограничений на имитацию прохождения управляющих сигналов

Рассмотрим подробнее факторы, влияющие на основные значения временных ограничений Δt . Выше отмечалось, что минимальная величина Δt определяется конструктивными особенностями, но сумма требуемых значений должна уложиться в интервал, обеспечивающий своевременное функционирование управляемой системы [16, 17]. На рис. 6 представлено соотношение моментов прохождения сигнала от времени подачи команды — T_k до момент начала планового функционирования потребителя — $T_{нтр}^{пл}$,

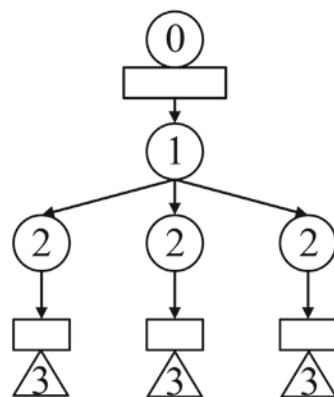


Рис. 3. Схема штатного распределения сетевой нагрузки

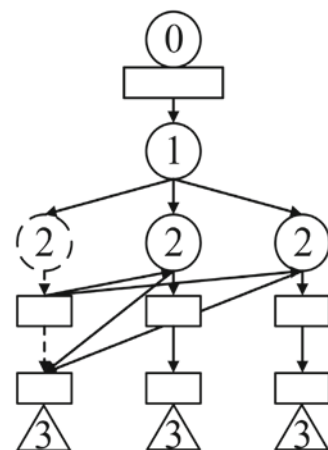


Рис. 4. Схема переключения сетевой нагрузки вследствие возможной деградации одного информационного направления после «квитирования»

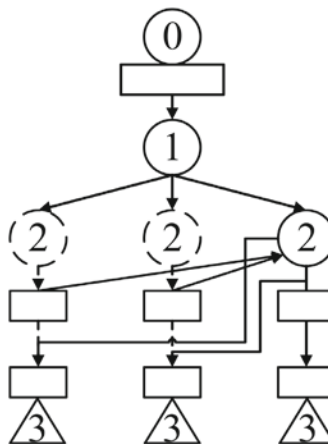


Рис. 5. Схема переключения сетевой нагрузки вследствие возможной деградации двух информационных направлений после «квитирования»

с учетом планового завершения обработки и передачи информации на i -ом уровне — $t_i^{тр}$.

Величина $T_{пр}^{пл}$ определяется требованиями высших органов управления и должна учитывать не только технологические особенности применения конкретных объектов, но и специфику распорядительной информации государственных органов и технологических параметров АСУ. Например, для активных подвижных объектов (АПО), функционирующих в циклическом режиме [18], возможно технологическое смещение момента $T_{пр}^{пл}$, обусловленное физическими факторами и зависящее от начального момента T_k функционирования АСУ. Поэтому в более общей постановке величина $T_{пр}^{пл}$ должна рассматриваться как функция случайного аргумента T_k (например, распределенного по β -закону на интервале порядка несколько суток вперед). При таком подходе при обосновании решений необходимо рассматривать новый, дополнительный показатель — гарантированную вероятность $P(P(T < T_{пр}^{пл}) > P^{пл})$ выполнения задачи доведения сигнала управления за заданное время с требуемой вероятностью.

Таким образом, при рандомизации процесса прохождения управляющего сигнала необходимо учитывать дискретность модельного времени, обусловленную циклическостью смещения интервалов взаимодействия пунктов управления с обслуживаемыми объектами.

Следует отметить также, что последовательная адаптация параметров облика ДЗП в варианте планирования применения АСУ на продолжительные сроки должна учитывать увеличение числа рандомизированных циклов, обусловленное дополнительными вероятностно-временными ограничениями.

Кроме вышеописанных логических циклов, при дооснащении АСУ подсистемами ДЗП, возникает необходимость учета вероятностей ошибок первого и второго рода, непосредственно характеризующих риски пропуска несанкционированных сигналов и блокирования штатных сигналов.

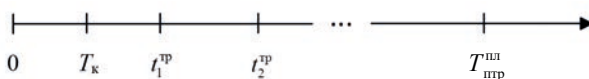


Рис. 6. Соотношение моментов прохождения сигнала

Обозначим:

x — действительное значение сигнала;

z — зафиксированная величина полученного сигнала (измеряемого параметра);

y — погрешность измерений.

Так как вследствие ИТВ будет определено не действительное значение параметра, то имеет место равенство $z = x + y$.

Закон распределения случайной величины z можно найти с помощью композиции законов распределения. На рис. 7 пунктирной линией показана кривая распределения $\phi_z(z)$ случайной величины z . Ошибки измерения приводят к деформации кривой распределения (кривая растягивается) и к ее смещению (если $y \neq 0$). Вследствие этого появляется возможность забраковать годный сигнал (ошибка 1 рода) или пропустить ложный сигнал (ошибка 2 рода).

Выясним физический смысл ошибок 1 рода и 2 рода применительно к рассматриваемой задаче. Изобразим кривую распределения $\phi_x(x)$ входного параметра (рис. 8). Пусть выходной параметр в данном измерении принял значение x_1 , находящееся в поле допуска (т.е. сигнал является штатным) вблизи верхней границы допуска u_b . Это значение будет зафиксировано с ошибкой. Кривая распределения погрешностей измерения $\phi_y(y)$ расположится симметрично относительно значения x_1 (погрешность измерения может быть допущена как в большую, так и в меньшую сторону, систематическими ошибками мы пренебрегаем).

Пусть погрешность измерения в этом конкретном случае равна y_1 . Тогда значения измеренного z_1 будут находиться вне поля допуска и правильный сигнал будет забракован (т.к. $z_1 = x_1 + y_1$).

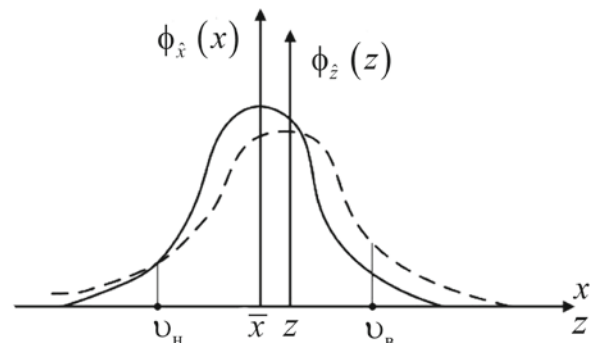


Рис. 7. Деформация кривой распределения параметров сигнала

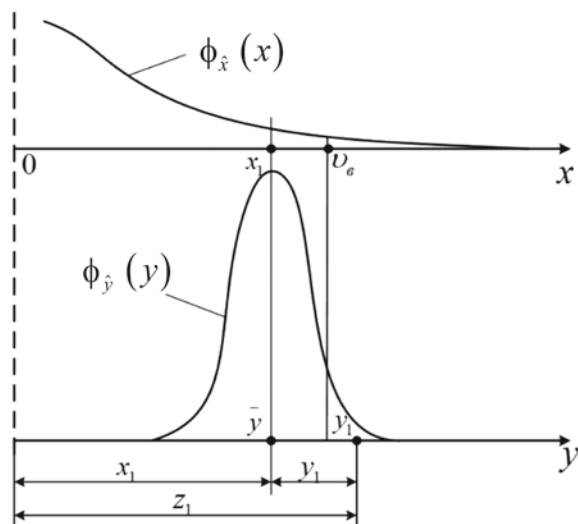


Рис. 8. Ошибочная идентификация правильного сигнала

Такую же картину можно изобразить и для случая, когда значение выходного параметра x_2 окажется вблизи нижней границы допуска v_n .

Таким образом, риск «ложной тревоги» α представляет собой вероятность события $(z < v_n)$ или $(z < v_b)$ при $(v_n \leq x \leq v_b)$:

$$\alpha = P([(z < v_n) \cup (z < v_b)]) / (v_n \leq x \leq v_b).$$

Аналогично можно найти выражение для риска «пропуска несанкционированного сигнала» β . Он представляет собой вероятность события $(v_n \leq x \leq v_b)$ при $x < v_n$ при $x > v_b$ т.е.

$$\beta = P((v_n \leq z \leq v_b) / [(x < v_n) \cup (x > v_b)]).$$

Величина этих рисков зависит от степени сложности передаваемого сигнала, процесса, параметров целенаправленных помех, точностных характеристик метода измерения и измерительных приборов (в т.ч. ДЗП), от величины поля допуска. Для учета риска «пропуска несанкционированного сигнала» и риска «ложной тревоги» в алгоритме моделирования процесса прохождения командно-программной информации должны быть предусмотрены блок имитации входного потока, блок имитации массива погрешностей измерений и организованы циклы проверки выполнения неравенств $\alpha < \alpha^{tp}$ и $\beta < \beta^{tp}$. Требуемые значения P^{tp} , α^{tp} , β^{tp} задаются в руководящих документах [12, 13], а величины α и β — либо определяются методом, основанным на использовании условных

законов распределения, либо определяются методом основанным на использовании теоремы умножения вероятностей [10, 15, 19].

При моделировании процессов управления в интересах планирования на продолжительные сроки представляется целесообразным, исходя из технологии функционирования мобильных управляемых объектов, учитывать увеличение числа рандомизированных циклов, обусловленное учетом дополнительных вероятностно-временных ограничений.

Заключение

Для решения задачи предотвращения несанкционированного доступа в структуру АСУ должны быть включены ДЗП, не только блокирующие прохождение ложных сигналов, но и обеспечивающие организацию обратной связи и перемаршрутизацию санкционированных сигналов.

При моделировании в интересах планирования на продолжительные сроки представляется целесообразным, исходя из физики функционирования мобильных объектов управления, осуществляющих взаимодействие (информационное, вещественное, энергетическое) с множеством управляющих объектов, поэтапно учитывать вероятностно-временные ограничения на каждом уровне АСУ.

Этапы прохождения сигналов через первый уровень:

- ввод данных для моделирования входного сигнала и ИТВ противника;
- моделирование событий $\alpha < \alpha^{tp}$, $\beta < \beta^{tp}$;
- моделирование события $w < P_1$;
- моделирование события $\Delta t < t_1^{tp}$.

Содержание этапов для второго уровня, при условии продолжения воздействий противника аналогично содержанию этапов первого уровня.

Таким образом, число циклов при имитации адаптационного доведения сигналов должно составлять не менее величины $4K + 1$, где K — число уровней АСУ. Однако объем циклов может увеличиться при рандомизации параметров оперативных требований, например, при пересчете координат зон информационного взаимодействия, обусловленного перемещениями обслуживаемых объектов. В этом случае используется теория стохастической индикации [1, 17].

Список источников

1. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
2. Цимбал В.А., Москвин А.А. Математическое моделирование нахождения вероятностно-временных характеристик информационного обмена для протоколов типа X.25 // Материалы XX Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». 2018. Т. 1. С. 131–136.
3. Грудинин И.В., Суровикин С.В. Управление ресурсами информационно-управляющей подсистемы АСУ огнем в интересах обеспечения ее живучести // Известия Института инженерной физики. 2016. № 3 (41). С. 57–62.
4. Макаренко С.И., Квасов М.Н. Модифицированный алгоритм Беллмана-Форда с формированием кратчайших и резервных путей и его применение для повышения устойчивости телекоммуникационных систем // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14, № 3. С. 264–274.
5. Офицеров А.И., Басов О.О., Бачурин С.С. Концептуальные основы обеспечения комплексной безопасности критически важных объектов // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (1). С. 154–163.
6. Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р. Надежность изделий и систем: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2023. 184 с.
7. Бянкин А.А., Ломтев В.Н., Лоскутов А.И. Модель процесса интеллектуальной обработки диагностической информации в экспертных системах при структурной идентификации автономных динамических объектов // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2022. Вып. 694. С. 157–164.
8. Youssef Ait El Mahjoub, Leo Le Corre, Hind Castel — Taleb Stochastic Modeling And Optimization For Power And Performance Control In DVFS Systems. URL: <https://scs-europe.net/conf/ecms2023/ecms2023-accepted-papers> (дата обращения: 24.07.25).
9. Рыжов Г.Б., Вдовенко Г.В. К вопросу о боевой устойчивости системы управления группировкой войск (сил) в операции // Известия РАН. 2025. № 3 (138). С. 3–12.
10. Медведев А.А. Инновационные подходы при создании ракетно-космической техники. Унификация как проектный параметр управления эффективностью: монография. Королев: Изд. ДСиК, 2020. 400 с.
11. Волков В.Ф., Федер А.Л., Шуваев Н.А. Методика уточнения требований к параметрам системы предотвращения несанкционированного доступа на этапе опытной эксплуатации автоматизированных систем специального назначения // Известия РАН. 2024. № 3 (138). С. 86–91.
12. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по их защите информации. Утв. решением председателя Государственной технической комиссии при президенте РФ от 30 марта 1992 года.
13. ГОСТ 34100.3–2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М. Стандартинформ. 2018. 112 с.
14. Борчин А.С. Проблемы проектного управления в современных IT-компаниях и направления совершенствования управления проектами // Современные технологии управления. 2022. № 1 (97). С. 34–42.
15. Басов О.О., Бачурин С.С. Концептуальные основы обеспечения безопасности критически важных объектов // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (1). С. 154–163.
16. Волков В.Ф., Пономарев А.С., Применение метода стохастического динамического программирования при оценивании риска невыполнения программы разработки новых типов вооружения в заданный срок // Вооружение и экономика, 2020. № 3 (53), С. 31–47.
17. Волков В.Ф., Пономарев А.С., Борунова Е.В. Оптимизация согласованного применения целенаправленных операций и процедур контроля состояния критически важных технических систем // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 11–12. С. 71–78.
18. Кадочникова Д.С. Метод определения орбиты космического объекта в территориально-распределенной системе наблюдения // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2024. Вып. 691. С. 42–50.
19. Юсупов Р. М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. 2017. № 51. С. 5–34.