

Л. Е. Мистров, д-р техн. наук, проф., e-mail: mistrov_le@mail.ru,
Центральный филиал Российского государственного университета правосудия, г. Воронеж,
Е. В. Головченко, канд. техн. наук, ст. преп., e-mail: evvigo@mail.ru,
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж

Методологические основы оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы

Показана взаимообусловленная связь между конфликтной устойчивостью авиационных организационно-технических систем и обеспечивающих их применение инфокоммуникационных сетей. Предложен новый показатель устойчивости функционирования авиационных инфокоммуникационных сетей, основанный на положениях теории вероятностей и позволяющий определить нижнюю оценку конфликтной устойчивости авиационных организационно-технических систем.

Ключевые слова: устойчивость функционирования, эффективность функционирования, авиационные инфокоммуникационные сети, риск, пропускная способность

Введение

В настоящее время развитие воздушного транспорта сдерживается множеством различ-

ных причин. Основные из них можно выразить в виде объективного противоречия: с одной стороны, увеличение объемов воздушных перевозок грузов и пассажиров необходимо

для поддержания экономического роста, с другой — неуправляемые темпы роста воздушного движения вызывают значительное снижение уровня авиационной безопасности. Особенно резко это снижение проявляется, когда темпы роста воздушного движения опережают темпы развития регулятивных процессов и соответствующей инфраструктуры [1].

Разрешение указанного противоречия основывается на обеспечении взаимодействия всех участников (сторон), задействованных в воздушных перевозках. Целью такого взаимодействия является достижение и поддержание требуемого уровня авиационной безопасности при одновременном выдерживании пропорциональных темпов роста в обоих направлениях. Наиболее перспективный из известных способов обеспечения такой взаимосвязи заключается в использовании целостных, корпоративных (совместных) процессов принятия решений, в рамках которых ожидания участников авиационного сообщества будут сбалансированы и направлены на достижение оптимальных результатов на основе справедливого обеспечения доступа к требуемым ресурсам [1].

В общем случае совокупность объектов, принимающих участие в воздушных перевозках, и связей между ними представляет функциональную организационно-техническую систему (ОТС), включающую:

- авиационные предприятия, которые непосредственно осуществляют воздушные перевозки пассажиров, багажа, грузов, почты или выполняют авиационные работы;
- оперативные органы Единой системы организации воздушного движения, основными задачами которой являются планирование и координирование использования воздушного пространства, а также организация воздушного движения;
- организации, осуществляющие непосредственное обслуживание воздушных судов от прилета до вылета;
- организации, осуществляющие обслуживание пассажиров, багажа, грузов, почты или выполнение авиационных работ.

Каждая из этих организаций, в свою очередь, является сложной ОТС с собственными целями, обладающей ресурсами, имеющей в своей структуре органы, принимающие решения, и элементы, реализующие основные функции.

На стадии эксплуатации рассматриваемой функциональной системы между авиационными предприятиями проявляются конфликтные отношения за право обладания ресурсами или первоочередного использования ресурсов, обеспечивающих ОТС в целях экономического рас-

ходования собственных ресурсов и получения максимальной прибыли. Одним из наиболее перспективных способов обеспечения эффективности функционирования авиационных предприятий является использование эффективных траекторий полетов, включая полеты по произвольным, наиболее экономичным заранее заданным траекториям, а также горизонтальной эффективности на эшелоне, горизонтальной и вертикальной эффективности при снижении.

К наиболее важным задачам, решаемым в рамках рассматриваемой функциональной системы, относятся:

- управление процессами наземного обслуживания воздушных судов (ВС) от прилета до вылета и очередностью вылета;
- управление потоками ВС посредством диспетчерского обслуживания и синхронизации отдельных полетов;
- согласование прогнозов погоды для формирования ограничений на потоки движения в воздушном пространстве или по отдельным аэропортам;
- синхронизация и выбор динамических конфигураций воздушного пространства;
- определение критериев эффективности организации воздушного движения, адекватных к конкретным условиям обстановки;
- определение соразмерной односторонней реакции на произошедшие или ожидаемые события, когда временные ограничения не позволяют осуществлять дальнейшее сотрудничество в процессе реагирования на такие события.

Необходимым условием функционирования такой системы является наличие развитой системообразующей информационной инфраструктуры, а также информационных систем более высокого уровня интеграции и возможности сопряжения различных радиоэлектронных систем, обеспечивающих своевременное доведение информации до потребителей, минуя промежуточные звенья. Создание такой единой информационной инфраструктуры позволит обеспечить оперативность подготовки к выполнению задач по предназначению, адаптивное планирование применения сил и средств авиации и управление ими в реальном масштабе времени.

Существование устойчивых корпоративных решений, особенно в условиях наличия различного рода неопределенностей, без обмена информацией между всеми задействованными сторонами невозможно, поэтому необходимым условием достижения таких решений является устойчивое функционирование обеспечивающей информационной системы и ее способность предоставлять услуги с требуемым качеством.

Достижение заданного уровня конфликтной устойчивости функционирования авиационной ОТС (авиапредприятия) может быть обеспечено лишь при условии достижения соответствующего уровня устойчивости авиационной информационной системы. Основу последней составляет авиационная инфокоммуникационная сеть (АИС), обеспечивающая обмен информацией между элементами информационной системы и ее распределенную работу. Именно на элементы АИС непосредственно оказывают влияние различного рода деструктивные воздействия, снижая эффективность функционирования информационной системы и в целом авиационной ОТС. Обобщенная структура авиационной информационной системы, представленная на рис. 1 (см. третью сторону обложки), включает в себя информацию, хранящуюся в базах данных серверов, средства обработки информации должностными лицами органов управления авиационных основных и обеспечивающих ОТС, а также средства обмена информацией, обеспечивающих распределенную обработку информации удаленных органов управления и объединенных в авиационную АИС.

Таким образом, именно устойчивость АИС определяет устойчивость авиационной информационной системы и в общем случае создает базу для обеспечения конфликтной устойчивости соответствующей авиационной ОТС. Возникает необходимость оценки устойчивости функционирования информационной системы с точки зрения авиационной ОТС, при этом под оценкой устойчивости следует понимать и процесс оценки и непосредственно его результат. Важнейшим элементом такой оценки является обоснование показателя, который бы, с одной стороны, мог адекватно оценить степень воздействия дестабилизирующих факторов, а с другой — учесть их при оценке устойчивости авиационной ОТС. Следует отметить, что исходя из структуры информационной системы авиационной ОТС способность информационной системы обеспечивать распределенный режим работы в условиях воздействия дестабилизирующих факторов полностью определяется способностью АИС противостоять последним. Потому в основе оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы должны лежать показатели устойчивости АИС.

Таким образом, потребности практики актуализируют общую научную задачу разработки методологических основ оценки устойчивости функционирования авиационной информационной системы в виде частных задач обоснования показателей устойчивости функционирования авиационной информационной

системы и АИС, способных предоставлять услуги с заданным качеством при воздействии дестабилизирующих факторов.

Факторы, определяющие требования к показателям качества функционирования авиационных инфокоммуникационных сетей

Под *качеством АИС* понимается свойство или совокупность свойств, обуславливающих пригодность АИС для использования по назначению [2, 3]. Такими свойствами, например, могут быть число и характеристики узлов коммутации и каналов связи, особенности управления сетью и способы маршрутизации.

Качество функционирования АИС характеризует уже не саму сеть, а в целом процесс ее функционирования с учетом воздействия окружающей среды. Определяющими качеством функционирования свойствами могут быть продолжительность функционирования, ресурсоемкость и наиболее важное свойство — результативность, которая характеризует способность сети в процессе функционирования достигать поставленной цели.

Под *эффективностью АИС* понимается комплексное операционное свойство сети, характеризующее ее приспособленность к достижению цели функционирования [3], направленной на предоставление пользователям услуг связи требуемого качества, отражающее методы оценивания и получаемый результат.

Адекватность оценки, т. е. соответствие целям оценивания, во многом зависит от выбора показателя, его способности наиболее полно учитывать особенности построения, применения и функционирования АИС. Для достижения целей оценивания показатель должен иметь ясный физический смысл и отражать ее целевую направленность [4]. В то же время выбор показателя качества вытекает из принятых критериев оценки, позволяющих решать задачу соответствия АИС заданным требованиям [3].

Поэтому оценка качества функционирования АИС включает задачи выбора показателей качества функционирования АИС и комплексного показателя, характеризующего эффективность функционирования АИС, а также обоснование соответствующих им требований и критериев.

Оценка показателей качества АИС основывается на парировании учета особенностей.

Во-первых, функционирование АИС определяется конкретными ситуациями, связанными с управлением элементами авиационной ОТС при выполнении ею задач по предназна-

чению. Как правило, такие ситуации являются уникальными, поскольку полное их совпадение по месту, времени, задачам и целям — событие практически невозможное. Поэтому полученные статистические данные в одних условиях не всегда возможно адекватно использовать в других.

Во-вторых, специфика управления элементами авиационной ОТС характеризуется наибольшей нагрузкой на сети в критических ситуациях, связанных с высокой степенью неопределенности, вытекающей из случайного характера управляемого процесса и неоднозначности целей, альтернатив действий и их последствий.

В-третьих, решения, принимаемые органами управления авиационной ОТС, даже самые ответственные, принимаются в условиях довольно жесткого ограничения по времени.

Таким образом, динамичность и скоротечность процессов управления авиационными ОТС, высокая ответственность принимаемых решений ужесточают требования к адекватности показателей и точности результатов оценки качества функционирования АИС.

Анализ существующих показателей эффективности инфокоммуникационных сетей

В настоящее время для оценивания качества функционирования инфокоммуникационных сетей, в том числе и авиационных, используют различные показатели, учитывающие те или иные стороны процесса функционирования и свойства самой системы. В зависимости от целей оценивания показатели могут характеризовать процесс функционирования сети на физическом, канальном, сетевом или на транспортном уровнях эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ЭМВОС). Ввиду того, что основные принципы функционирования инфокоммуникационных сетей на множестве условий применения одинаковы, исходя из необходимости расширения области анализа рассмотрим существующие показатели оценки качества функционирования инфокоммуникационных сетей общего назначения.

В работе [5] представлен показатель удельной содержательности сигнала, передаваемого по каналам связи ИС, в виде

$$v = \frac{I}{V},$$

где I — количество информации, содержащейся в передаваемом сообщении; V — объем сигнала.

В свою очередь, количество информации I и объем сигнала V определяются в виде

$$I = n \log_a m;$$

$$V = TFH,$$

где n — длина передаваемого сообщения; m — число элементов, образующих сообщение; a — основание кода; T — длительность передачи сообщения; F — ширина спектра сигнала, содержащего сообщение; H — отношение средних мощностей сигнал/шум.

При этом возможности каналов связи сети для передачи сообщений, характеризуемые емкостью канала V_k , должны быть достаточными для размещения передаваемого объема V :

$$V_k \geq V;$$

$$V_k = T_k F_k H_k,$$

где T_k — время, выделяемое для передачи сообщения в канале связи; F_k — полоса пропускания канала связи; H_k — возможное отношение средних уровней мощностей сигнал/шум, определяемое приемопередающими устройствами.

Удельная содержательность сигнала, переносящего информацию по каналам инфокоммуникационной сети, показывает, насколько эффективно используется сигнал данного объема для передачи сведений, т. е. плотность упаковки передаваемой информации в объеме сигнала.

Такой подход обладает достоинствами, позволяющими учесть целенаправленность функционирования инфокоммуникационной сети. Требования же информационной системы выражаются в необходимости передачи заданного количества информации. Данный подход актуален для оценки отдельных каналов связи инфокоммуникационных сетей или телекоммуникационных сетей с коммутацией каналов, но не целесообразен для оценки сетей с пакетной коммутацией и промежуточным хранением информации. Поэтому оценка качества функционирования АИС с учетом сложных и взаимосвязанных процессов на транспортном и сетевом уровнях ЭМВОС требует использования других показателей.

В работе [6] рассматривается показатель оценки эффективности функционирования ИС и ее элементов, основанный на определении отношения полезного эффекта функционирования к соответствующим затратам. Расчет данного показателя предполагает построение метрического пространства показателей

качества функционирования и вычисление обобщенного показателя — объема ИС:

$$W = \Pi \times V \times T,$$

где Π — производительность инфокоммуникационной сети; V — скорость передачи информации в инфокоммуникационной сети; T — точность передачи информации в инфокоммуникационной сети, а также показателя Ливн, представляющего собой удельную себестоимость:

$$y = \frac{C}{W},$$

где C — затраты на организацию и эксплуатацию ИС.

К достоинствам данного показателя эффективности функционирования инфокоммуникационных сетей можно отнести его практическую применимость для реально существующих или проектируемых сетей. В то же время такое объединение нескольких показателей в один может привести к компенсации недостатка одного показателя избытком другого. Кроме того, рассчитанные значения объема инфокоммуникационной сети W и, соответственно, удельной стоимости U не отражают степень достижения ее цели функционирования и качество результата. Например, произведение близких по физическому смыслу показателей — производительности и скорости передачи — не имеет ясного физического смысла и, тем более, не отражает целевую направленность рассматриваемой инфокоммуникационной сети.

В работе [7] в качестве показателя эффективности информационного обмена в инфокоммуникационных сетях предложен коэффициент полезного действия как универсальный обобщенный параметр. Данный показатель характеризует информационные возможности инфокоммуникационной сети и показывает ее степень близости к предельным возможностям передачи информации:

$$\eta = \frac{KW}{KW_{\text{полн}}} \cdot 100 \%,$$

где $KW = NG|_T$ — кибернетическая мощность инфокоммуникационной сети; N — число информационных сообщений в инфокоммуникационной сети; G — производительность инфокоммуникационной сети; T — временной интервал усреднения;

$KW_{\text{полн}} = \sum_{i=1}^n \left(N_i \cdot \sum_{k=1}^s C_{k,i} \right)$ — полная кибернетическая мощность инфокоммуникационной сети; N_i — емкости буферов запоминающего устройства; n — число буферов запоминающего устройства; $C_{k,i}$ — пропускные способности k -го канала связи инфокоммуникационной сети, обслуживающий i -й буфер; s — число каналов связи, обслуживающих i -й буфер.

В целях учета деструктивного воздействия помех значение коэффициента полезного действия η подлежит уточнению:

$$\eta_{\text{пом}} = -\eta \lg P_{\text{ош}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ош}} = N_{\text{ош}}/N_{\text{общ}}$ — вероятность ошибки приема одиночной элементарной посылки; $N_{\text{общ}}$ — общее число одиночных элементарных посылок; $N_{\text{ош}}$ — число ошибочно принятых одиночных посылок.

Данный показатель в целом не отражает целенаправленность функционирования инфокоммуникационной сети. Например, для увеличения коэффициента полезного действия направления связи необходимо приближать его производительность к суммарным пропускным способностям всех каналов связи, образующих данное направление связи. При этом требования вышестоящей (информационной или управляющей) системы, в интересах которой и функционирует данная инфокоммуникационная сеть, по числу предоставляемых видов и услуг связи, а также их качеству не принимаются во внимание.

Другим фактором, ограничивающим применение данного показателя, является практическая невозможность учитывать воздействие помех в каналах связи инфокоммуникационной сети при значениях вероятности ошибки одиночной элементарной посылки менее значения 10^{-1} [7]. Известно, что нормальная работа каналов связи может быть обеспечена при значениях вероятности ошибки не более $10^{-4} \dots 10^{-5}$ [5, 8]. В результате этого каналы связи с вероятностями ошибок более 10^{-1} уже можно считать непригодными для использования по назначению, и, соответственно, оценивать эффективность функционирования инфокоммуникационных сетей с помощью выражения (1) не имеет смысла. Исходя из этого практическое применение представленного показателя невозможно.

В работе [9] в качестве показателя эффективности функционирования ИС предложен риск средних и общих материальных потерь, которые несет пользователь из-за неверно переданной информации. Достоинством такого

подхода является то, что оценка эффективности ИС осуществляется с учетом требований вышестоящей системы (в качестве таковой рассматривается система управления). В этом случае можно считать, что каждое передаваемое сообщение (информация) используется для принятия какого-либо решения. Задержка, искажение, потеря сообщения влечет за собой его ошибочность, что в свою очередь приводит к возникновению определенных материальных потерь (затрат). В данном случае предполагается, что в подавляющем большинстве случаев при передаче информации ее задержка или искажение приводят к негативным последствиям, поэтому эффективность функционирования системы связи целесообразно оценивать не по положительному эффекту, а по отрицательному, т. е. определять вызванный указанными выше причинами ущерб — материальные затраты. При этом под риском R понимается произведение потерь G при ошибочно переданном сообщении на вероятность p возникновения потерь в канале передачи данной системы связи [9]:

$$R = pG.$$

Данный показатель во многом свободен от вышеуказанных недостатков. Тем не менее, значительную сложность представляет установление аналитических зависимостей между качеством результата функционирования рассматриваемой ИС и возможными потерями вышестоящей системы (управления), а также определение показателя потерь. Это во многом ограничивает применимость данного показателя для оценки реальных ИС и значительно усложняет трактовку полученных численных значений.

Таким образом, существующие показатели и способы оценки эффективности ИС, в том числе и АИС и, как следствие, информационных систем не в состоянии достаточно корректно оценивать степень достижения цели ее функционирования и качество получаемого результата.

Математическая модель средних потерь пропускной способности авиационной инфокоммуникационной сети

Для адекватной оценки качества функционирования информационной системы в системе управления авиационной ОТС рассмотрим место АИС и выполняемые ею функции, используя пример, показанный на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Как видно из рис. 2, источником информации является объект и субъект управления, в общем случае образующие систему управления авиационной ОТС. Объект управления функционирует по определенным алгоритмам, взаимодействуя с окружающей средой и влияя на последнюю; в определенные моменты времени передает информацию о своем состоянии и результатах своего функционирования субъекту управления. Субъект управления на основе получаемой информации и целей функционирования принимает определенные решения и передает объекту управления управляющую информацию. АИС является в этой системе технической основой информационной системы и системы управления авиационной ОТС, предоставляя в процессе своего функционирования возможность обмена информацией между объектом и субъектом управления. Передаваемая информация может быть представлена в любой форме, соответствующей видам и услугам связи, полностью определяемой пропускной способностью каналов связи. Таким образом, результатом функционирования АИС являются требуемые для системы управления авиационной ОТС виды и услуги связи (информационные услуги), определяемые пропускными способностями каналов связи АИС.

Известно, что максимальная реализация потенциальных возможностей объекта управления полностью определяется качеством решений, принимаемых субъектом управления, которое, в свою очередь, зависит от полноты и достоверности получаемой информации о состоянии объекта и условиях выполнения задачи объектом управления, а также от качества самого субъекта управления. Поэтому очевидно, что для конкретных вышеперечисленных характеристик неограниченное увеличение пропускных способностей каналов АИС не сможет улучшить результат функционирования объекта управления. Для получения заданного результата функционирования объекта управления необходимо и достаточно, чтобы пропускные способности каналов сети были не меньше трафика между субъектом и объектом управления.

Исходя из этого обоснование показателя и критерия качества функционирования АИС базируется на следующих утверждениях:

- результатом функционирования АИС является формирование и поддержание в работоспособном состоянии каналов связи с заданной пропускной способностью;
- критерием качества сети по пропускной способности является критерий пригодности, так как увеличение пропускных спо-

способностей выше необходимого уровня не приводит к улучшению работы системы управления авиационной ОТС;

- уменьшение пропускных способностей ниже значения, необходимого для нормального функционирования системы управления авиационной ОТС, ухудшает качество ее функционирования и, как следствие, приводит к снижению качества результата выполнения задачи объектом управления;
- исходя из состава и структуры АИС можно заключить, что снижение пропускных способностей может быть вызвано, во-первых, деструктивным воздействием окружающей среды, приводя к отказу узлов и линий связи; во-вторых, несогласованностью внутренних механизмов обработки трафика на различных уровнях ЭМВОС и органов управления, приводя к перегрузкам в сети. Учитывая случайный характер деструктивных воздействий и входного трафика, процессы снижения пропускных способностей также можно считать случайными.

Все это позволяет утверждать, что снижение качества функционирования АИС приводит к ухудшению качества функционирования системы управления авиационной ОТС, определяемого потерями в управлении. Данные потери могут выражаться, например, в снижении качества принимаемых решений, вызванных потерей (или искажением) информации. В свою очередь снижение качества управления приводит к ухудшению качества функционирования объекта управления или полностью авиационной ОТС, частью которой она является.

Подход, представленный в работе [9], как раз и раскрывает, каким образом снижение качества функционирования сети приводит к снижению ценности передаваемой информации и, как следствие, к потерям вышестоящей системы, в рассматриваемом случае системы управления авиационной ОТС. Но выявление механизма, связывающего потери системы управления с ухудшением качества АИС, является основной сложностью практического применения данного подхода. На практике довольно сложно определить начальную ценность информации и характер ее зависимости от задержки передачи. Начальная ценность почти полностью будет определяться конкретными условиями обстановки, решаемой задачей и способом применения авиационной ОТС, выразить которые в конкретном значении практически невозможно. К тому же о характере данной зависимости можно всего лишь предполагать, поскольку она также будет зависеть от

тех же условий. Поэтому выявить устойчивую повторяющуюся связь между качеством функционирования сети и качеством функционирования системы управления можно только на уровне этих систем с точки зрения достижения ими определенного результата.

Поскольку результатом функционирования АИС является ее пропускная способность, в результате различных случайных явлений, обусловленных несогласованностью работы внутренних протоколов, воздействием деструктивных воздействий и других причин, будут происходить потери пропускной способности. В этом случае для системы управления, функционирующей в конкретных условиях обстановки, важно знать, насколько в этих условиях может снизиться пропускная способность сети.

В связи с этим целесообразным для оценки качества функционирования АИС является использование значения потерь ее пропускной способности $P(\lambda, \gamma)$, где λ — требуемая пропускная способность или входной трафик АИС; γ — реально достигаемая пропускная способность (производительность) сети или ее оценка.

Функция потерь $P(\lambda, \gamma)$ представляет собой априорную оценку последствий функционирования системы управления авиационной ОТС при использовании АИС, характеризуемой способом ее применения в конкретных условиях обстановки. Вероятностный характер причин, вызывающих потери пропускной способности сети, позволяет ввести вероятностную меру на пространстве событий Γ , приводящих к потерям, сопоставив при этом каждому из них определенное значение потерь $P \in \Pi$. Задание вероятностных мер для возможных событий позволяет априорно определить ожидаемое значение потерь для каждой сети или способа ее применения на основе вычисления различных математических функций потерь $P(\lambda, \gamma)$ или рисков, которые являются оценкой ожидаемых последствий [10]. Это позволяет системе управления осуществлять выбор АИС или способ ее применения на основе минимального значения потерь или рисков. При этом не только оперативно-техническое, но и организационное управление АИС также может осуществляться на основе минимизации величины соответствующих рисков.

Такое понимание рисков полностью соответствует определению работы [11], где под риском понимается следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей. В данном случае под целью функционирования АИС понимается создание или поддержа-

ние информационных направлений с требуемыми пропускными способностями.

В качестве примера рассмотрим случай, когда снижение пропускных способностей АИС может произойти в результате двух событий — потери связности сети, вызванной отказом элементов сети в результате деструктивных воздействий, и перегрузки сети, обусловленной несогласованностью работы ее протоколов.

Рассмотрим множество событий Γ , определяющих состояние сети:

Γ_0 — обмен в сети осуществляется без снижения пропускной способности, сеть связная;

Γ_1 — обмен в информационном направлении не осуществляется по причине несвязности сети, вызванной воздействием дестабилизирующих факторов, при этом перегрузка в сети отсутствует;

Γ_2 — обмен в информационном направлении осуществляется, но пропускная способность направления снижена в результате перегрузки сети, при этом связность сети не ухудшилась;

Γ_3 — обмен в информационном направлении не осуществляется по причине несвязности сети, вызванной воздействием дестабилизирующих факторов на элементы сети, при этом пропускная способность сети уменьшилась в результате ее перегрузки.

Все вышеперечисленные события составляют полную группу, при этом каждое из них имеет определенное значение вероятности:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1.$$

Вероятность P_0 нахождения АИС в состоянии Γ_0 определяется вероятностью связности сети $P_{св}$ и вероятностью того, что АИС не находится в состоянии перегрузки (или состоянии блокирования):

$$P_0 = P_{св}(1 - P_{бл}). \quad (2)$$

Связность сети определяется, во-первых, устойчивостью ее элементов, характеризуемых коэффициентами готовности, а во-вторых, числом направлений связи для каждого информационного направления, т. е. числом путей (маршрутов) между каждой парой отправитель—получатель информации. Под состоянием перегрузки или блокирования сети будем понимать такое ее состояние, при котором часть входного трафика сетью отвергается, в результате чего происходит снижение пропускной способности.

Вероятность P_1 нахождения АИС в состоянии Γ_1 определяется устойчивостью функционирования сети в условиях воздействия вну-

тренних и внешних дестабилизирующих факторов [8] в отсутствии блокировки сети:

$$P_1 = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}). \quad (3)$$

Вероятность P_2 нахождения АИС в состоянии Γ_2 определяется возможностями сети по обработке и хранению информации, которые характеризуют вероятностью блокировки, т. е. состояния, в котором сеть не может принять новую информацию при условии, что сеть связна:

$$P_2 = P_{св}P_{бл}. \quad (4)$$

Вероятность P_3 нахождения АИС в состоянии Γ_3 определяется вероятностью нахождения сети в несвязном состоянии и вероятностью блокировки сети:

$$P_3 = (1 - P_{св})P_{бл}. \quad (5)$$

Каждая из вышеперечисленных ситуаций с известной вероятностью может привести к определенным потерям пропускной способности сети. Исходя из того, что АИС должна обрабатывать предлагаемый трафик, обеспечивая заданное качество предоставляемых пользователям услуг и видов связи, то очевидно, что и потери необходимо оценивать относительно последнего. В этом случае пусть λ — входной трафик сети, γ — реально достигаемая пропускная способность или производительность сети, тогда относительные потери пропускной способности для событий Γ_2 и Γ_3 можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Gamma_2 : \Pi_2 &= \frac{\lambda - \gamma}{\lambda}; \\ \Gamma_3 : \Pi_3 &= \frac{\gamma}{\lambda}, \end{aligned} \quad (6)$$

т. е. в ситуации Γ_2 при сохранении связности сети теряется часть пропускной способности. Наоборот, в ситуации Γ_3 , когда при возникновении в сети перегрузки происходит еще и потеря связности, в результате происходит потеря всей реально достигнутой пропускной способности γ . Для события Γ_1 , когда происходит потеря связности, но реально достигнутая пропускная способность полностью соответствует входному трафику, потерю пропускной способности запишем следующим образом:

$$\Gamma_1 : \Pi_1 = \frac{\gamma}{\lambda} \Big|_{\gamma=\lambda} = 1. \quad (7)$$

Следует отметить, что вполне возможно оценивать потери не относительно входной нагрузки λ , а относительно максимальной пропускной способности сети μ . В этом случае потери будут характеризовать не потери качества связи для пользователей сети, а снижение возможностей сети по передаче информации относительно их максимальных значений.

Обобщая выражения (2)–(7) и учитывая, что для события Γ_0 потери пропускной способности будут нулевыми, запишем выражение для определения средних потерь пропускной способности АИС:

$$R = \sum_{i=1}^3 P_i \Pi_i$$

или

$$R = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}) + P_{св} P_{бл} \frac{\lambda - \gamma}{\lambda} + (1 - P_{св}) P_{бл} \frac{\gamma}{\lambda}. \quad (8)$$

Вероятность блокировки сети исходя из определения, данного выше, можно определить следующим образом. На рис. 3 показана нагрузка λ , определяемая как число пакетов, поступающих в сеть в единицу времени. При вероятности блокировки $P_{бл}$ нагрузка, принимаемая сетью и поступающая ее пользователям, будет равна $\lambda(1 - P_{бл})$, соответственно отбрасываемая нагрузка будет определяться как $\lambda P_{бл}$. Поэтому для АИС, представленной любой консерватив-

ной моделью, реально достижимая пропускная способность будет определяться как [12]:

$$\gamma = \lambda(1 - P_{бл}).$$

При расчетах вероятность блокировки сети можно найти, используя конкретную модель системы массового обслуживания, например, для модели М/М/1 вероятность блокировки будет определяться как [12]

$$P_{бл} = \frac{(1 - \rho)\rho^N}{1 - \rho^{N+1}},$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ — коэффициент использования сети, μ — максимальная пропускная способности сети; N — заданная длина очереди (число пакетов, находящихся в сети, либо размер буферных устройств в узлах сети).

Таким образом, с помощью выражения (8) можно оценить риск потери реально достигаемой пропускной способности (производительности) АИС по отношению к потребителям, т. е. системе управления авиационной ОТС. В этом случае снижение пропускной способности сети однозначно приведет к ухудшению качества и/или уменьшению числа предоставляемых услуг и видов связи. Поэтому такой риск можно еще назвать риском потери качества предоставляемых услуг и видов связи.

Если определим риск в соответствии с выражением

$$R = (1 - P_{св})(1 - P_{бл}) \frac{\gamma}{\mu} + P_{св} P_{бл} \frac{\lambda - \gamma}{\mu} + (1 - P_{св}) P_{бл} \frac{\gamma}{\mu},$$

т. е. вместо значения входного трафика λ подставим значение максимальной пропускной способности сети μ , то получим риск потери пропускной способности сети относительно ее максимальных возможностей по передаче информации.

Результаты расчетов средних потерь пропускной способности авиационной инфокоммуникационной сети

На рис. 4 представлены зависимости средних потерь пропускной способности

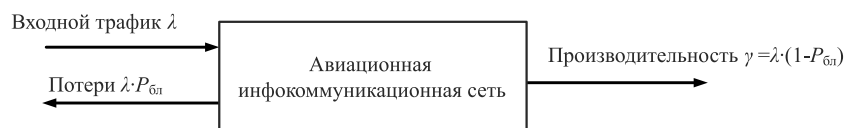


Рис. 3. Процесс обработки входного трафика сетью

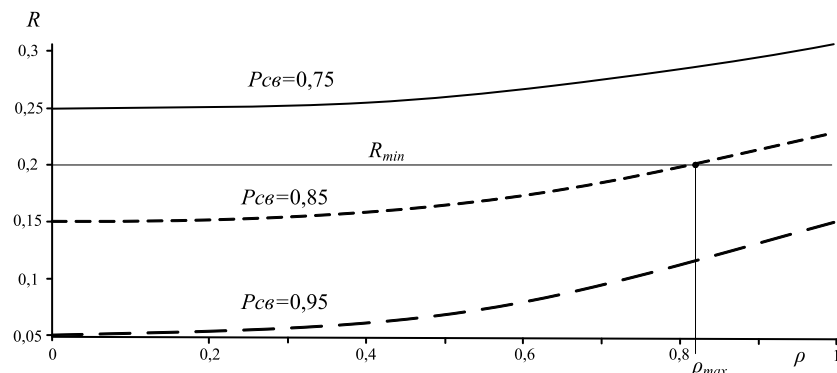


Рис. 4. Зависимости средних потерь пропускной способности R от входного трафика ρ

способности R от относительного значения входного трафика ρ для различных значений вероятности связности сети P_{CB} .

Из представленных зависимостей следует, что при небольших значениях входного трафика λ средние потери полностью определяются связностью сети, т. е. способностью сети устойчиво функционировать при воздействии различных дестабилизирующих факторов. При увеличении интенсивности входного трафика λ потери пропускной способности будут обуславливаться уже не столько ее связностью, а способностью функционировать в состоянии перегрузки за счет использования эффективных сетевых протоколов. В этом случае высокая связность сети обуславливает более быстрый рост средних потерь пропускной способности. Следовательно, с одной стороны, увеличение количества обмениваемой информации обуславливает более быстрое и точное нахождение оптимального коалиционного решения, а с другой стороны, приводит к снижению устойчивости информационной инфраструктуры и, как следствие, приводит к снижению конфликтной устойчивости рассматриваемой авиационной ОТС.

Например, для информационного направления со связностью 0,85 минимальное значение потерь задано значением $R_{\min} = 0,2$. Для поддержания такого значения потерь пропускной способности нагрузка не должна превышать значения $\rho \leq 0,82$.

Оценить эффект технических и организационных мероприятий по обеспечению устойчивости сети можно следующим относительным показателем:

$$r = \frac{R_1 - R_0}{R_0},$$

где R_0 , R_1 — начальное и конечное значения средних потерь пропускной способности сети; r — коэффициент эффективности мероприятий по обеспечению устойчивости сети, характеризующий степень изменения средних потерь пропускной способности.

Заключение

В представленных методологических основах научные подходы и методы обеспечивают формирование показателей и проведение оценки устойчивости функциональной авиационной информационной системы, для ситу-

аций, в которых могут снижаться пропускные способности АИС.

Предложенные показатели устойчивости функционирования АИС и рисков потери достигаемой пропускной способности (производительности) и технической пропускной способности позволяют учесть:

- целевую направленность сети — реально достигаемую пропускную способность или производительность, которая характеризует результат функционирования сети, заключающийся в предоставлении требуемого числа видов и услуг связи;
- качество результата функционирования: оценка производительности сети для фиксированного значения задержки передачи пакетов определяет качество предоставляемых видов и услуг связи;
- степень достижения результата: вероятность связности характеризует нижнюю границу средних потерь пропускной способности, а также возможность создания такой структуры сети, которая обеспечит заданную производительность.

Указанные свойства данных показателей позволяют осуществить оценку необходимого условия конфликтной устойчивости авиационной ОТС, основанную не только на оценке устойчивости информационной инфраструктуры, но и на качестве предоставляемых ею услуг.

Список литературы

1. **Глобальный** аэронавигационный план на 2013—2028 гг. Doc 9750-AN/963. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2013. 128 с.
2. **ГОСТ Р 53724—2009**. Качество услуг связи. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
3. **Морозов Л. М., Петухов Г. Б., Сидоров В. Н.** Методологические основы теории эффективности. Ленинград: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1982. 236 с.
4. **Вентцель Е. С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.
5. **Харкевич А. А.** Очерки общей теории связи. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. 272 с.
6. **Карганов В. В., Расчесова А. Г., Кудряшов В. А.** Показатель оценки эффективности систем связи и их элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 1 (236). С. 7—14.
7. **Межуев А. М., Пасечников И. И., Родзевич А. И., Роза А. Н., Коновальчук Е. В.** Патент RU 2602347 С1. Способ оценки эффективности информационного обмена системы связи / Номер заявки: 2015132753/08; Дата регистрации: 05.08.2015; Дата публикации: 20.11.2016 Бюл. № 32.
8. **ГОСТ Р 53111—2008**. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2009. 19 с.

9. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 598 с.

10. ГОСТ Р 51897—2011. Менеджмент риска. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

11. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.

12. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. 336 с.

L. E. Mystrov, Dr. Sc., Professor, e-mail: mistrov_le@mail.ru,
Central Branch of the Russian State University of Justice, Voronezh,
E. V. Golovchenko, Ph.D., Senior of lecturer, e-mail: evvigo@mail.ru,
Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy
named after Professor N. Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina", Voronezh

Methodological Bases of Evaluation of the Sustainability of the Operation of the Aviation Information System

The article shows the interdependent relationship between the conflict stability of aviation organizational and technical systems and their support for the use of information and communication networks. A new indicator of the stability of the functioning of aviation information and communication networks is proposed, based on the provisions of probability theory and allowing to determine the lower estimate of the conflict stability of aviation organizational and technical systems.

Keywords: operational stability, operational efficiency, aviation information and communication networks, risk, throughput

DOI: 10.17587/it.26.430-440

References

1. Global Air Navigation Plan of 2013—2028 years. Doc 9750-AN/963, Montreal, International Civil Aviation Organization, 2013, 128 p. (in Russian).

2. GOST R 53724—2009. The quality of communication services. General Provisions, Moscow, Standardinform, 2011, 12 p. (in Russian).

3. Morozov L. M., Petuchov G. B., Sidorov V. N. The Methodological bases of theory of efficiency, Leningrad city, VIKI name of Mozhaik, 1982. 236 p. (in Russian).

4. Ventzel E. S. Research of operation: the objective, the principles, methodology. Moscow, Science, 1988, 208 p. (in Russian).

5. Kharkevich A. A. Essays on the general theory of communication, Moscow, State publishing house of technical and theoretical literature, 1955, 272 p. (in Russian).

6. Karganov V. V., Raschesova A. G., Kudryashov V. A. Indicator for evaluating the effectiveness of communication systems and their elements, *Scientific and technical statements of SPbSPU*, 2016, no. 1 (236), pp. 7—14 (in Russian).

7. Mezhev A. M., Pasechnikov I. I., Rodzevich A. I., Rose A. N., Konovalchuk E. V. Patent RU 2602347 C1, A method for evaluating the effectiveness of information exchange of a communication system, Application number: 2015132753/08, Date of registration: 08/05/2015, Date of publication: 11/20/2016, Bull. Number 32. (in Russian).

8. GOST R 53111—2008. Stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. Moscow, Standardinform, 2009, 19 p. (in Russian).

9. Golovin O. V., Prostov S. P. Systems and devices for short-wave radio communication, Moscow, Hotline-Telecom, 2006, 598 p. (in Russian).

10. GOST R 51897—2011. Risk management. Terms and Definitions, Moscow, Standardinform, 2012, 16 p. (in Russian).

11. Repin V. G., Tartakovsky G. P. Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems, Moscow, Soviet Radio, 1977, 432 p. (in Russian).

12. Schwartz M. Communication Networks: Protocols, Modeling and Analysis, vol. 1, Moscow, Science. Ch. ed. Phys.-Math. lit., 1992, 336 p. (in Russian).

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор Е. В. Конова.

Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 11.05.2020. Подписано в печать 23.06.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ720. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Л. Е. Мистрова, Е. В. Головченко

«МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ»

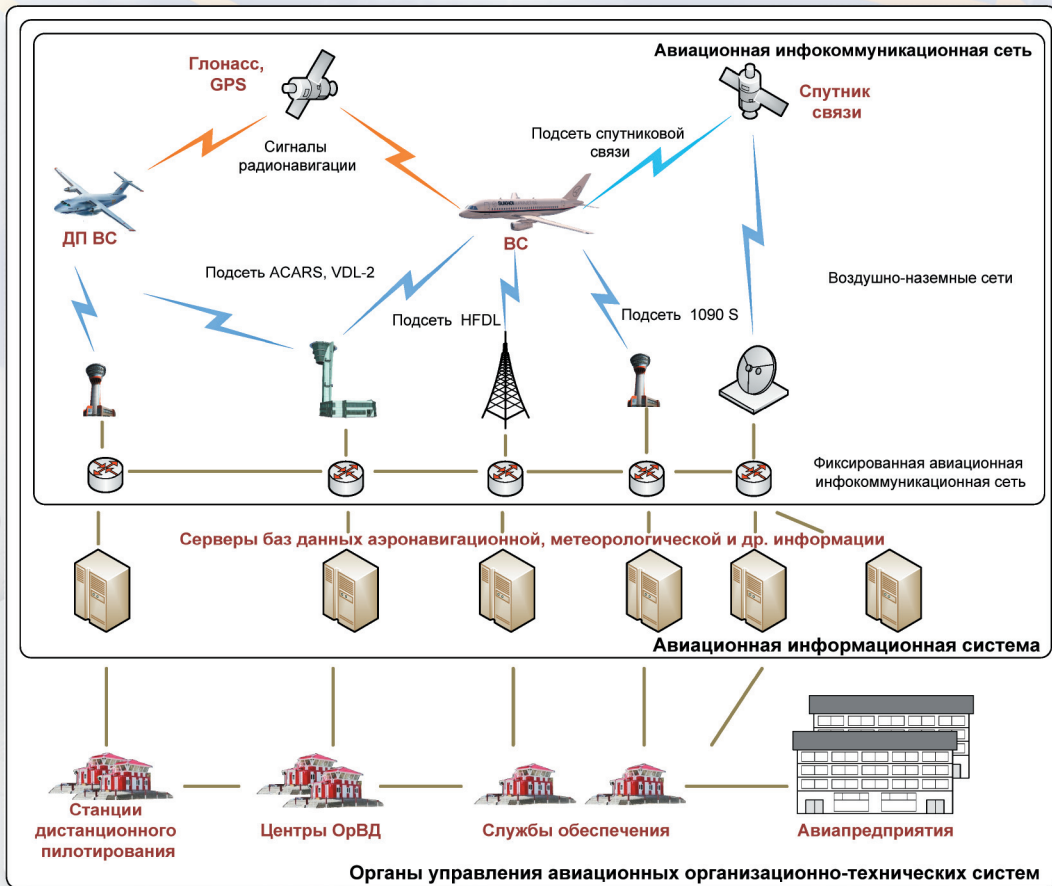


Рис. 1. Обобщенная структура авиационной информационной сети



Рис. 2. Обобщенная структура системы управления авиационной ОТС