

# Обучение студентов моделированию распределенных информационно-управляющих систем методом имитационного моделирования

*Математическое моделирование является одним из наиболее эффективных средств исследования самых сложных систем и процессов.*

*Одним из наиболее удобных средств математического моделирования, применяемых при анализе функционирования систем рассматриваемого класса, являются имитационные модели, которые описывают структуру и поведение системы в виде программы для ПК и позволяют проводить машинные эксперименты с целью получения необходимых данных о функционировании элементов и системы в целом в течение определенных интервалов времени.*

*В настоящее время на рынке средств имитационного моделирования представлено достаточно обширное количество различных систем имитационного моделирования. Вместе с тем, выбор подходящих инструментальных средств является весьма важной задачей. Специализированными программами, в частности, являются: GPSS World, MATLAB/Simulink, а также AnyLogic.*

*Распределенные информационно-управляющие системы (ИУС) представляют собой рассредоточенные в пространстве многофункциональные взаимосвязанные совокупности стационарных и подвижных элементов с развитыми техническими средствами приема, передачи и обработки информации.*

*Задача заключается в том, чтобы при заданных структурных ограничениях, характеристиках информационных потоков, параметрах технических средств определить рациональную структуру ИУС, сис-*

*темно-плановые показатели качества развития и функционирования которой удовлетворяют заданным требованиям.*

*Для экспериментальных исследований процессов функционирования описанной системы была разработана имитационная модель. Эта модель позволяет получать и оценивать такие функциональные характеристики как степень загрузки технических средств, длительность ожидания информации в очередях на обслуживание, уровень оперативности передачи и обработки информации, время формирования единого носителя и др. Модель позволяет также оценивать качество функционирования системы в зависимости от расписания полетов, траекторий движения ЛА, характеристик технических средств, структуры системы, выхода из строя отдельных элементов и от других параметров.*

*Разработанная имитационная модель на GPSS позволяет студентам достаточно глубоко освоить предметную область - систему сбора телеметрической, баллистической и другой информации, разобраться как работают устройства передачи и сбора информации, как описывается их работа с помощью имитационной модели и как с помощью имитационной модели можно анализировать и корректировать структуру и характеристики всей моделируемой системы и отдельных ее элементов. На базе данной модели построена курсовая работа.*

**Ключевые слова:** обучение моделированию, имитационные модели, система GPSS, информационно-управляющая система, структура системы.

**Aleksey V. Gabalin**

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## Teaching modelling of distributed information and control systems to students using the method of simulation modelling

*Mathematical modelling is one of the most effective means to study the complex systems and processes.*

*One of the most convenient means of mathematical modelling used in the analysis of functioning of systems of this class are simulation models that describe the structure and behavior of the system in the form of a program for the PC and allow conducting computer experiments with the aim of obtaining the necessary data on the functioning of the elements and the system as a whole during certain time intervals.*

*Currently, the simulation tools market presents a large number of different simulation systems. However, the selection of suitable tools is very important. Specialized programs in particular are GPSS World, MATLAB/Simulink, and AnyLogic.*

*Distributed information and control systems (ICS) are dispersed in space multifunctional coherent set of stationary and moving elements with developed technical means of reception, transmission and processing of information.*

*The task is to determine a rational structure of ICS, system-planned indicators of quality of development and functioning of which meet specified requirements under given structural constraints, characteristics of information flows, and parameters of technical tools.*

*For experimental research of functioning processes of the described system a simulation model was developed. This model allows obtaining and evaluating such functional characteristics as the degree of technical means utilization, waiting time of information in queues for service, the level of efficiency of transmission and processing of information, the time of forming a single media and etc. The model also allows evaluating the performance of the system depending on the flight schedule, flight paths, characteristics of technical means, the system structure, failure of individual elements and depending on other parameters.*

*The developed simulation model in GPSS allows students to master the subject area deeply enough – the system of collecting telemetry, ballistic and other information, to understand how the devices for collecting and transmitting information operate, how their work is described with simulation models and how you can analyze and adjust the structure and characteristics of the entire simulated system and its separate elements with the use of the simulation model. A course paper is done based on the given model.*

**Keywords:** teaching modelling, simulation models, GPSS system, information and control system, system structure.

## Введение

Имитационное моделирование является одним из наиболее эффективных средств исследования сложных систем и процессов [1, 2].

В настоящее время принятие решений по управлению сложными объектами или процессами в самых различных областях требует предварительных оценок конечного результата при помощи системного анализа и имитационного моделирования. Имитационное моделирование (ИМ) — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. ИМ — частный случай математического моделирования. принципиально отличающийся тем, что использование ЭВМ в ИМ играет определяющую роль. В настоящее время ИМ переживает этап стремительного развития и популярности [3].

Существуют определенные традиции преподавания дисциплины «Имитационное моделирование» [5, 11, 12, 13]. Обычно в процессе обучения рассматриваются такие вопросы как виды моделей и методов моделирования, система массового обслуживания, этапы моделирования, тестирование и исследование свойств имитационной модели, инструментальные средства автоматизации моделирования, планирование и проведение направленных вычислительных экспериментов на имитационной модели, графическое представление результатов моделирования. Практическая составляющая курса направлена на формирование навыков проектирования и разработки математических и имитационных моделей для исследования разных экономических, технических систем. Обычно практическое обучение проводится на базе какого-либо одного метода и реализующего его пакета.

Задачи, используемые в обучении, — это, главным образом, адаптированные к учебному процессу задачи экономики: моделирование производственных систем и логистических процессов, маркетинг, моделирование бизнес-процессов; моделирование транспортных, информационных и телекоммуникационных систем.

И в авиационно-космической отрасли рассматриваются экономические задачи из области управления производственными, логистическими, и т.п. бизнес-процессами. Однако существуют задачи имитационного моделирования сложных систем, свойственные только авиационно-космической отрасли. К таким задачам можно отнести задачи управления сложным космическим аппаратом, управление беспилотниками, управление сбором телеметрической и другой информации, получаемой со спутников специального назначения и т.п. Постановка таких задач и адаптация их к учебному процессу должна осуществляться совместно со специалистами соответствующей предметной области. В настоящее время остро ощущается отсутствие хороших учебных пособий, содержащих задачи моделирования сложных систем аэрокосмического профиля.

Разработанная имитационная модель позволяет студентам достаточно глубоко освоить предметную область — систему сбора телеметрической, баллистической и другой информации, понять как работают устройства передачи и сбора информации, как описывается их работа с помощью имитационной модели, решать задачу анализа и коррекции структуры системы.

### 1. Средства имитационного моделирования

В настоящее время на рынке средств имитационного моделирования представлено достаточно обширное количество различных систем имитационного моделирования. Вместе с тем, выбор подходящих инс-

трументальных средств является весьма важной задачей. Специализированными программами, в частности, являются: GPSS World, MATLAB/Simulink с пакетом SimEvents, а также AnyLogic [5].

Классической и наиболее популярной программой имитационного моделирования является GPSS (General Purpose Systems Simulator) [6]. Модель на языке GPSS представляет собой последовательность операторов (блоков), отображающих события, происходящие в СМО при перемещениях транзактов.

К основным преимуществам GPSS можно отнести: уникальные концепции моделирования и алгоритмическую мощь; модели на GPSS компактны; легко интерпретируемые диаграммы; GPSS имеет интуитивно понятный интерфейс; существует очень большое количество уже готового программного кода, написанного на GPSS. Другие преимущества этого программного продукта — бесплатность версии GPSS World для студентов, ее доступность через Интернет, достаточное количество русскоязычной литературы, а также низкие требования к ресурсам ЭВМ [7, 8].

Одним из альтернативных современных программных продуктов является SimEvents.

SimEvents — это библиотека пакета MATLAB Simulink для моделирования систем с дискретными состояниями, использующая теорию очередей и СМО [9, 10]. Она позволяет создавать имитационные модели прохождения объекта (заявки) через сети и очереди, обеспечивает моделирование систем, зависящих не от времени, а от дискретных состояний. Среда MATLAB Simulink предоставляет инструменты визуального моделирования систем, позволяющие пользователю собирать модель из готовых блоков.

Еще одна графическая среда моделирования, использованная в настоящей работе, это AnyLogic, которая является

популярным и многофункциональным средством для имитационного моделирования бизнес-процессов [4]. AnyLogic представляет собой единственный инструмент имитационного моделирования, который поддерживает все подходы к созданию имитационных моделей: процессно-ориентированный (дискретно-событийный), системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию. Также, этот продукт включает в себя возможность визуализации результатов и существенный набор предлагаемой статистики для анализа. Создание библиотек позволяет многократно использовать уже написанные модули, что облегчает работу пользователя.

Разработанная модель в AnyLogic позволяет оценить статистические характеристики СМО. Характеристики удобно представить в графическом виде. Кроме того, AnyLogic позволяет продемонстрировать работу системы с помощью 3D-анимации.

В результате сравнения программных средств имитационного моделирования сделаны следующие выводы. По сравнению с GPSS, моделирование в MATLAB Simulink характеризуется более высокой степенью визуализации, большей гибкостью при построении моделей сложных систем, возможностью использовать мощный вычислительный инструментарий MATLAB. Сложность обучения студентов работе с библиотекой SimEvents пока обусловлена недостаточным количеством литературы. Кроме того, в отличие от GPSS World и AnyLogic, академические лицензии MATLAB являются платными.

На сегодняшний день версия AnyLogic PLE является бесплатной для студентов. Основным преимуществом данного продукта считается гибкость использования. Отличительной чертой AnyLogic от других программных средств имитационного моделирования является наличие возмож-

ность создания интерактивной анимации для улучшения наглядности моделей. Возможность расширения моделей средствами Java дает широкие возможности, которые могут стать мощным инструментом решения проблем в любой прикладной области, в руках профессионала.

Недостатки данного продукта вытекают из его достоинств, в частности из-за применения языка программирования Java. Для того чтобы ускорить овладение инструментом, необходим специальный курс обучения. Также к недостатком AnyLogic можно отнести его гибкость, обычно предлагается не один, а множество путей разработки модели, и для эффективного выбора из этого спектра нужна некоторая практика.

Хочется отметить, что к сожалению, в ИМ часто отсутствуют методически обоснованные принципы построения хороших имитационных моделей для широкого класса сложных систем. Богатые анимационные возможности позволяют студентам быстро разработать красивый динамичный интерфейс, что создает искаженное представление о хорошей имитационной модели, хотя по своим потенциальным возможностям модель может и не решать серьезных задач. Эту проблему для ряда систем можно было бы преодолеть, опираясь на знания из других дисциплин. Так, для задач дискретно-событийного моделирования методологической основой можно считать теорию систем массового обслуживания (СМО).

Под СМО понимается система, в которую в случайные моменты времени поступают заявки на обслуживание, при этом поступившие заявки обслуживаются с помощью имеющихся в распоряжении системы каналов обслуживания [4]. К СМО можно отнести сложные технические системы, в том числе и в аэрокосмической области, в частности и модель, описанная в статье.

Как правило, с помощью моделирования СМО решаются задачи оценки средней и максимальной длины очереди, частоты отказов в обслуживании, средней загрузки каналов, распределение их числа, задача развязки узких мест системы и т.д.

## 2. Распределенные информационно-управляющие системы

Распределенные информационно-управляющие системы (ИУС) представляют собой рассредоточенные в пространстве многофункциональные взаимосвязанные совокупности стационарных и подвижных элементов с развитыми техническими средствами приема, передачи и обработки информации. Независимо от типа и назначения такие системы обладают следующими особенностями [14].

*Распределенность.* ИУС располагаются на значительных территориях от регионального до глобального масштабов и включают в себя большое число управляемых, управляющих и комбинированных элементов.

*Подвижность элементов.* Элементы системы могут быть неподвижными, передвижными или движущимися. Движение элементов осуществляется постоянно или периодически по детерминированным или стохастическим траекториям.

*Наличие зон доступности.* Осуществление функциональных взаимодействий между движущимися и неподвижными (передвижными) элементами распределенных ИУС возможно, как правило, только при нахождении движущегося элемента в зоне доступности («видимости») неподвижного (передвижного) элемента. Зона доступности определяется взаимным расположением элементов в пространстве и типами используемых технических средств.

*Быстродействие.* Необходимость в оперативной выработке управляющих воздействий определяет высокие требова-



ния к времени выполнения соответствующих функций элементами и системой в целом.

*Недопустимость потерь информации.* Для распределенных ИУС, как правило, важным условием является недопустимость (строгая ограниченность) потерь информации определенных типов. Это требует специальных мер по анализу и контролю за полнотой передаваемой, обрабатываемой и принимаемой информации.

*Живучесть.* В некоторых случаях функционирование систем рассматриваемого класса протекает в условиях неблагоприятных воздействий, что приводит к нарушению штатных режимов функционирования отдельных элементов и системы в целом.

Типичными примерами распределенных информационно-управляющих систем являются: ИУС летательными аппаратами (ИУС ЛА), спутниковые системы связи, системы управления оперативными службами и др.

Проблема управления развитием структуры ИУС тесно связана с задачами формализованного описания процессов функционирования, процедур сбора, передачи и обработки информации, анализа характеристик элементов и их взаимосвязей, влияющих на системно-плановые, экономические и тактико-технические показатели качества функционирования системы в целом.

### 3. Постановка задачи

На физическом уровне задача заключается в том, чтобы при заданных структурообразующих ограничениях, объемно-временных характеристиках информационных потоков, параметрах технических средств, зависимостях экономических и тактико-технических показателей их развития и функционирования от уровня производительности определить рациональную структуру ИУС, системно-плановые показатели качества развития и функционирования которой удовлетворяют заданным тре-

бованиям. К объемно-временным характеристикам информационных потоков в первую очередь относятся: законы поступления информационных посылок (сообщений) от ИИ, уровень информационных потоков алгоритмов обработки и объемы перерабатываемой информации в узлах системы, законы отказов и восстановления элементов и т.п.

Технические средства характеризуются мощностями по приему, передаче и обработке информации и местами их размещения. Эффективность функционирования системы определяется исходя из времени реакции системы на информационные запросы, времени задержки сообщений в сети, времени ожидания обработки, степени загрузки технических средств, полноты приема информации, устойчивости функционирования системы при изменении состояний внешней среды и т.д.

Необходимо подчеркнуть, что область ограничений, в рамках которых осуществляется развитие и функционирование системы, включает ограничения как аналитического, так и алгоритмического характера и регламентирует уровень качества функционирования, класс структур, объем ресурсов и возможности технических средств.

Существенной особенностью рассматриваемых задач является присутствие в них фактора неопределенности, что обусловлено влиянием на процессы развития и функционирования реализаций случайных состояний внешней среды и других неуправляемых факторов, а также неоднозначностью исходных данных (например, нормативов потребления ресурсов, потребностей в вычислительных и других работах, которые, как правило, являются среднестатистическими).

Постановка задачи анализа и коррекции структуры ИУС в общем виде формализуется следующим образом [14]. Не-

обходимо определить оптимальную структуру сети

$$Sopt(t) = \{E^*(t), A^*(t), X^*(t), Y^*(t)\}, t \in T,$$

где

$E^*(t) \subset E \sim (t)$  — допустимое множество элементов системы в период  $t$ ;

$A^*(t) \subset A \sim (t)$  — допустимое множество взаимосвязей элементов системы в период  $t$ ;

$X^*(t) \subset X \sim (t)$  — допустимое множество собственных функциональных характеристик элементов системы в период  $t$ ;

$Y^*(t) \subset Y \sim (t)$  — допустимое множество системных функциональных характеристик в период  $t$

При выполнении ограничений ресурсного, технологического, директивного, тактического и др. типов, в рамках которых осуществляется развитие и функционирование системы

$$R[E(t), A(t), X(t), Y(t), t].$$

Таким образом, задача состоит в следующем. При заданных характеристиках информационных потоков, параметрах технических средств и зависимостях показателей их функционирования и стоимости от производительности определить оптимальную структуру сети, показатели качества функционирования которой удовлетворяют заданным требованиям. Критерии бывают трех видов: **временные** (определение структуры сети, обеспечивающей минимальную задержку передачи информации при заданных показателях стоимости и надежности); **стоимостные** (определение структуры сети минимальной стоимости при заданных средних задержках передачи сообщений, показателях надежности сети и объемах информации); **надёжные** (определение структуры сети с максимальной надежностью при заданных показателях стоимости сети и средней задержке сообщений).

На основе проведенных исследований и обобщения опыта решения практических задач управления развитием

структуры ИУС был предложен подход к решению задачи, базирующийся на построении комплекса взаимосвязанных оптимизационных (ОМ), имитационных (ИМ), расчетно-анализирующих (АН) и корректирующих (КОР) моделей.

При этом ограничения и условия развития ИУС, задаваемые в аналитическом виде, учитываются в рамках соответствующих моделей оптимизации. Алгоритмически задаваемые ограничения учитываются с помощью имитационных моделей функционирования элементов системы, которые в данном случае выступают в качестве оператора  $\tau$ . Расчетные модели обеспечивают формирование и оценку экономических и тактико-технических показателей развития и функционирования системы, на основе которых организуется процедура взаимодействия моделей комплекса. Состав и структура разработанного комплекса взаимосвязанных моделей отражает разбиение ИУС на функциональные подсистемы. На основе анализа системно-плановых показателей и внешних условий развития и функционирования ИУС определяются сценарии воздействия внешней среды на систему, которые реализуются в виде имитационных моделей, алгоритмизирующих законы нарушения штатных режимов функционирования элементов и процессы восстановления (полного или частичного) их работоспособности. Генерируемые в этих моделях воздействия учитываются при моделировании процессов функционирования элементов функциональных подсистем ИУС. Вообще говоря, задачи управления развитием структуры функциональных подсистем ИУС могут быть разбиты на две группы. К первой относятся задачи, связанные с синтезом топологической структуры и состоящие в определении состава, территориального расположения и взаимосвязей узлов системы. Ко второй группе относятся задачи синтеза фун-

кциональной структуры, т.е. распределение работ и технических средств по узлам ИУС.

Одним из наиболее удобных средств математического моделирования, применяемых при анализе функционирования систем рассматриваемого класса, являются имитационные модели, которые описывают структуру и поведение системы в виде программы для ПК и позволяют проводить машинные эксперименты с целью получения необходимых данных о функционировании элементов и системы в целом в течение определенных интервалов времени. В настоящей работе описывается имитационная модель, предназначенная для решения указанных задач.

#### 4. Описание моделируемой системы

ИУС ЛА представляет собой сложную, многофункциональную распределенную информационно-управляющую систему, осуществляющую сбор, передачу и обработку информации, поступающей с борта летательного аппарата (ЛА). Она включает в себя стационарные и передвижные пункты приема информации (ППИ), измерительные пункты и станции слежения, распределенные по значительной территории и осуществляющие сбор поступающей телеметрической и другой информации. ППИ размещаются таким образом, чтобы своими зонами радиовидимости (доступности) максимально охватывали территорию, над которой проходит траектории движения ЛА. Для обеспечения наиболее эффективного покрытия зонами радиовидимости передвижные ППИ располагаются в местах, обоснованных специальными расчетами. Типовой ППИ содержит: приемные станции (ПС) телеметрической информации и траекторных измерений; технические средства передачи команд на борт ЛА и приема информации по спутниковой связи; средства управления, баллистических рас-

четов, оперативной обработки телеметрической информации и службу единого времени.

Информация о режимах функционирования оборудования и аппаратуры, данные о научно-технических экспериментах, проводимых на борту ЛА, принимаются приемными радиотелеметрическими станциями на ППИ и по каналам связи (КС) передаются на соответствующие узлы связи (УС) для дальнейшей обработки. Часть информации может оперативно обрабатываться на ППИ. После обработки информация поступает по каналам связи в центр управления (вычислительный центр (ВЦ)), где она анализируется специалистами, на основании чего они делают заключение о состоянии технических средств ЛА и информационно-управляющей системы и принимают решение об осуществлении тех или иных управляющих воздействий.

Принципиальная схема функционирования ИУС ЛА приведена на рис. 1.

Планом полетов определяется количество контролируемых ЛА различных типов, моменты начала полетов, траектории движения ЛА, режимы функционирования передающих устройств, а также состав и объемы телеметрической и другой информации, передаваемой с борта ЛА. Для передачи информации различного типа борт каждого ЛА оборудуется определенным набором передающих устройств (ПРД) со своей циклограммой работы. Циклограмма определяет состав ПРД для ЛА и время их работы на каждом этапе функционирования. Основной информационной характеристикой ПРД является скорость передачи.

На ППИ осуществляется прием информации, передаваемой с борта ЛА, с помощью своих ПС, где параллельно информация записывается на внешний носитель и передается в КС. Прием информации на ППИ с борта ЛА, находящегося в полете, определяется зонами видимости ППИ.

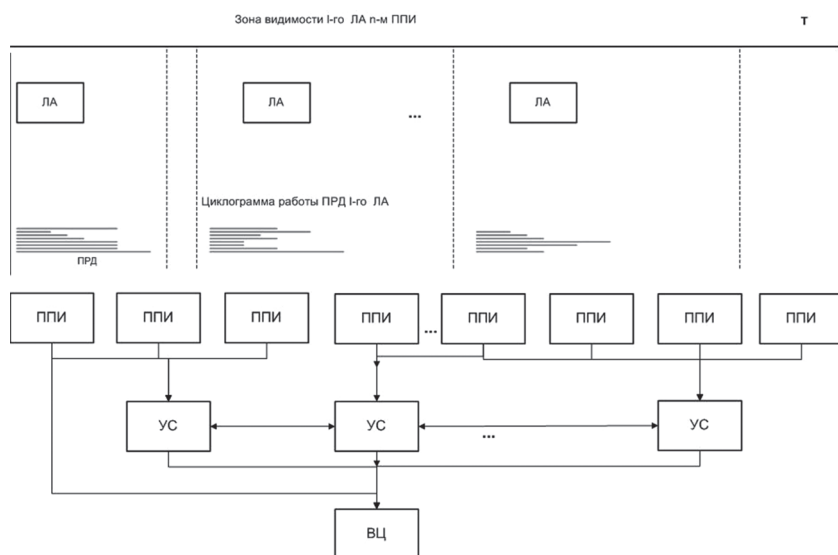


Рис 1. Схема функционирования ИУС ЛА

Таким образом одна и та же информация, передаваемая с борта ЛА, может приниматься одновременно однотипными ПС на тех ППИ, в зоны видимости которых вошел в данный момент ЛА. Поэтому одной из важных задач является формирование «единого носителя информации», который представляет собой запись такой последовательности информационных посылок (ИП), которая наиболее полно и достоверно отображает поток информации, передаваемой с борта ЛА. С этой целью на ППИ при записи на внешний носитель и передаче в КС информационная посылка дублируется и фрагментируется. Временные характеристики фрагментов определяются зонами видимости ППИ, на ПС которых эти фрагменты принимаются; такое фрагментирование будем называть «горизонтальным». Фрагментирование ИП при передаче в КС, пропускная способность которого ниже скорости передачи, назовем «вертикальным». Количество вертикальных фрагментов определяется отношением скорости передачи с борта ЛА к пропускной способности КС. В центре управления из отдельных фрагментов собирается единый носитель информации, который затем проверяется на полноту и достоверность.

Прием информации, передаваемой с борта ЛА, осуществляется ПС, тип которой соответствует типу ПРД на борту ЛА. В процессе функционирования системы ПС и КС могут находиться в различных состояниях (холодный резерв, набор готовности, рабочее состояние и др.).

### 5. Построение имитационной модели

Для экспериментальных исследований процессов функционирования описанной системы разработана имитационная модель. Эта модель позволяет получать и оценивать такие функциональные характеристики как степень загрузки технических средств, длительность ожидания ИП в очередях на обслуживание, уровень оперативности передачи и обработки информации, время формирования единого носителя и др. Модель позволяет также оценивать качество функционирования системы в зависимости от расписания полетов, траекторий движения ЛА, степени резервирования технических средств и их характеристик, структуры системы, выхода из строя отдельных элементов и от других параметров.

В настоящей работе предусматривается наличие в системе

нескольких ЛА, а также учет задержек при переключении ПС с ЛА на ЛА, что влечет за собой существенное усложнение алгоритмов функционирования. В этих условиях более удобным и эффективным является использование в качестве инструментального средства моделирования языка GPSS World [7, 8]. На выбор языка моделирования повлияли также следующие положения: задача повторяется при различных исходных данных и модель должна быть концептуально более выразительной; информационные посылки движутся в сетях и описываются компонентами сети и связанными с ними очередями; средняя продолжительность событий относительно невелика и для задания системного времени целесообразно применять метод фиксированных временных интервалов.

Предлагаемая модель состоит из моделей отдельных функциональных блоков системы. В ней описываются и анализируются процессы функционирования: передатчиков, находящихся на борту ЛА; приемных станций различных типов, находящихся на ППИ; каналов связи от приемных станций до узлов связи, от приемных станций до центра управления, от узлов связи до центра управления и между узлами связи; центра управления. Рассмотрим более подробно модели функциональных блоков, соответствующие перечисленным элементам системы (ЛА, ПС, КС и др.) рис. 2.

Исходя из программы полетов, в блоке ЛА (ПРД) «выполняются» следующие действия: создаются генераторы информационных сообщений для всех ПРД каждого ЛА; определяется время появления каждого ЛА в пределах действия системы; разбиваются на «горизонтальные» фрагменты сгенерированные сообщения; создаются и объединяются в группы «горизонтальные» фрагменты — дубли для всех ППИ, в зоне видимости которых на-



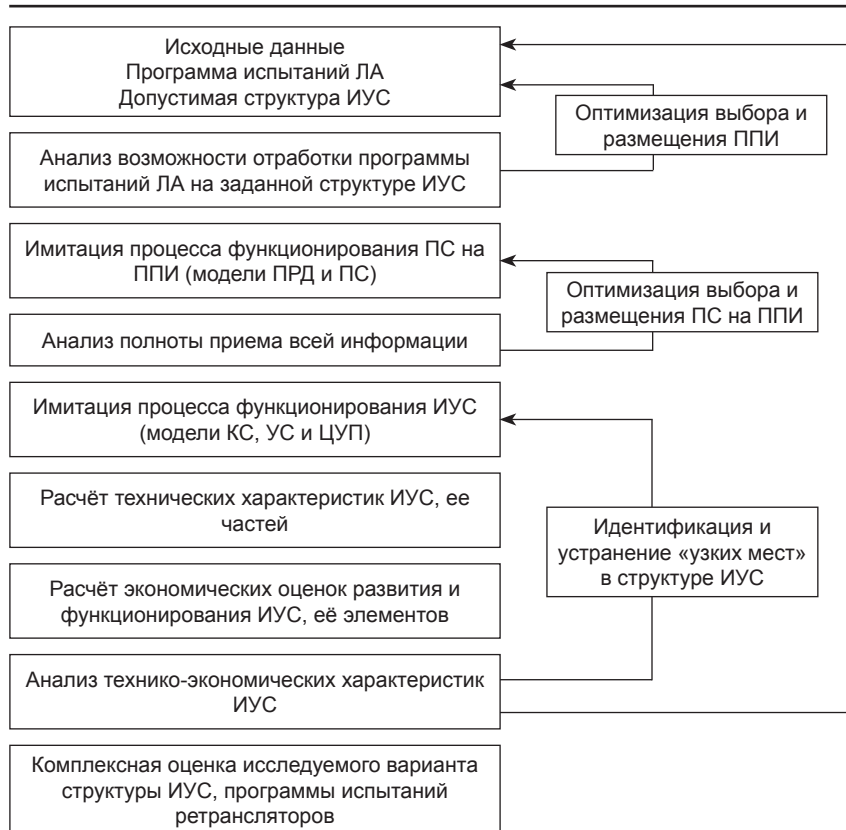


Рис 2. Схема модели

ходится ЛА; отправляются на ПС (ППИ) «горизонтальные» фрагменты. В блоке ПС (ППИ) сначала определяется номер принимающей ПС. Как только «горизонтальный» фрагмент попадает на ПС, всем фрагментам из его группы понижается приоритет обработки (с целью равномерного распределения числа дублей фрагментов).

Далее фрагмент «задерживается» на ПС на время обработки, после чего происходит сравнение скоростей ПРД и КС. Если скорость ПРД меньше или равна скорости КС, то «горизонтальный» фрагмент передается в КС целиком. В противном случае он делится на «вертикальные» фрагменты (пакеты), которые последовательно устанавливаются в очередь к КС. Число таких пакетов определяется соотношением скоростей ПРД и КС. Когда очередь подходит, пакет попадает непосредственно на обработку в КС. Время обработки в КС определяется как произведение «длины» пакета на отношение скорости ПРД к скорости КС. В блоках КС1 и КС2 (каналы связи

с разными скоростями передач) определяется номер необходимого КС и номер очереди пакета на обработку, осуществляется задержка пакета на время обработки, определяется следующий функциональный блок в технологической цепочке обработки пакета и пакет передается этому блоку (УС или ВЦ). В УС пакет может поступить либо от ПС, либо от другого УС.

И в том и в другом случае в блоке УС определяется номер необходимого УС (то есть того, который должен принять поступающую информацию) и на этом УС пакет задерживается на время обработки. Следует отметить, что количество обрабатываемых на УС пакетов не ограничивается и поэтому очередь к УС не учитывается в модели. Последним функциональным блоком модели является центр управления, представляющий собой специализированный вычислительный центр (ВЦ).

Также как и УС, ВЦ может одновременно обрабатывать неограниченное число пакетов,

то есть очереди к ВЦ не возникает. Задержка во времени на обработке в ВЦ состоит из двух частей: первая – произведение длины пакета на отношение производительности ПРД к производительности ВЦ, вторая – константа, отражающая время переключения обработки с пакета одного ПРД на пакет другого (следует отметить, что для УС и ВЦ при необходимости могут быть использованы более детальные модели их функционирования).

После обработки поступившей информации на ВЦ формируются выходные статистические матрицы, предназначенные для анализа качества функционирования системы и выработки управляющих воздействий. Для всех ПРД каждого ЛА определяется: количество исходных пакетов; количество пакетов, обработанных на ВЦ; количество избыточных пакетов и пакетов-дублей для каждого горизонтального фрагмента; анализируется полнота приема информации, загрузка технических средств приема, передачи и обработки, размеры очередей и т.п. После окончания работы модели собранная статистическая информация для удобства пользователя выводится на монитор и на печать в виде соответствующих таблиц и диаграмм.

На рис. 3 изображен пример выходной диаграммы загрузки устройств, которая позволяет идентифицировать «узкие места» в системе.

## Заключение

Предлагаемая в статье модель функционирования информационно-управляющей системы служит основой для решения ряда задач синтеза и анализа структуры систем рассматриваемого класса. Например, для решения задачи выбора и оптимальной корректировки составов ПС, ППИ и КС, обеспечивающих заданную полноту приема и передачи информации, формируемой в виде:  $F(S) \rightarrow opt$ ,

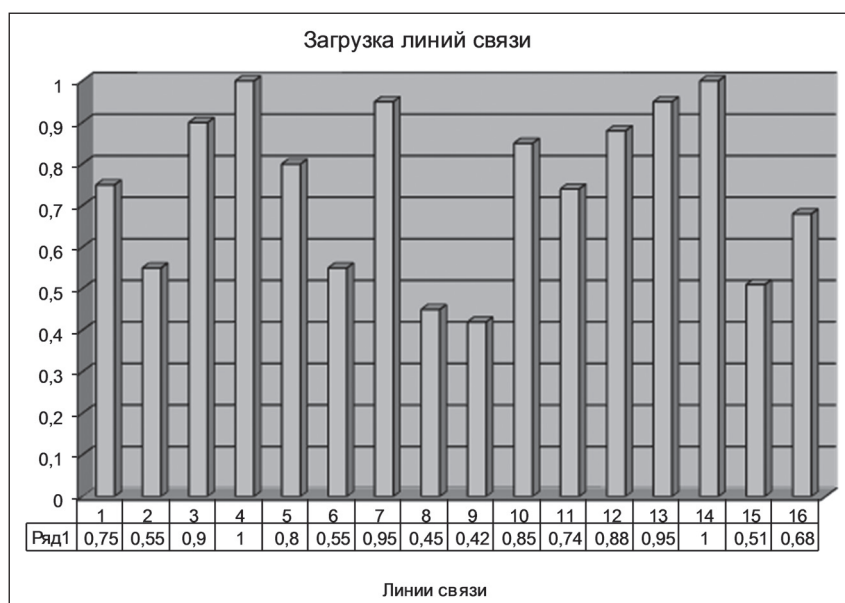


Рис. 3. Выходные диаграммы загрузки устройства

$Q(S \cup S1) \geq Q_{\sim}$ , где  $S$  – исходная структура системы,  $S1$  – дополнительный состав ПС и КС,  $Q(S \cup S1)$  – степень полноты приема и передачи информации на скорректируемой структуре; или задачи идентификации и оптималь-

ной развязки «узких мест», то есть оптимальной коррекции  $S$ , обеспечивающей выполнение алгоритмически заданного ограничения  $T_{зад}$  на длительность обработки программы испытаний  $T(S \cup S1)$ :  $F(S) \rightarrow opt, T(S \cup S1) \leq T_{зад}$ .

Наряду с тактико-техническими оценками качества функционирования рассматриваемой системы, разработанная имитационная модель позволяет получать оценки ряда экономических характеристик качества таких, как амортизационные отчисления (зависят от общего времени отработки программы  $T(S)$ ), эксплуатационные расходы (зависят от загрузки технических средств), а также установить удельную стоимость сеанса связи и т.д.

Исходная имитационная модель написана на GPSS. Система моделирования работает с уже готовой имитационной программой при различных вариантах исходных данных. Комплекс моделей внедрен при проектировании ряда систем [15–17], а также в учебный процесс Московского Авиационного Института. Проводя имитационные эксперименты студенты решают задачи по решению задачи коррекции структуры системы.

### Литература

1. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: Корона, 2004.
2. Советов Б.Я. Имитационное моделирование систем. Петродворец: ВУНЦ ВМФ, 2010.
3. Киндинова В.В., Кринецкий Е.О., Кузнецова Е.В. Проблемы преподавания имитационного моделирования при подготовке специалистов аэрокосмической области. Материалы международной конференции по неравномерным процессам в соплах и струях. М.: МАИ, 2016. С. 555–556.
4. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
5. Кузнецова Т.А., Мещеряков В.А. Сравнение программных средств имитационного моделирования систем массового обслуживания. Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов. Омск: Фонд национальной стратегии развития. 2015. С. 187–192.
6. Мещеряков В.А., Денисов В.П. Экономико-математические методы: основные понятия и применение в выпускной квалификационной работе: учебное пособие. Омск: ОмГТУ, 2010. 84 с.

### References

1. Ryzhikov Yu.I. Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i tekhnologii. Saint Petersburg: Korona, 2004. (In Russ.)
2. Sovetov B.Ya. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Petrodvorets: VUNTs VMF, 2010. (In Russ.)
3. Kindinova V.V., Krinetskii E.O., Kuznetsova E.V. Problemy prepodavaniya imitatsionnogo modelirovaniya pri podgotovke spetsialistov aerokosmicheskoi oblasti. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii po neravnomernym protsessam v so-plakh i struyakh. Moscow: MAI, 2016. P. 555–556. (In Russ.)
4. Karpov Yu.G. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005. 400 p. (In Russ.)
5. Kuznetsova T.A., Meshcheryakov V.A. Sravnenie programnykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya sistem massovogo obsluzhivaniya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov. Omsk: Fond natsional'noi strategii razvitiya. 2015. P. 187–192. (In Russ.)
6. Meshcheryakov V.A., Denisov V.P. Ekonomiko-matematicheskie metody: osnovnye ponyatiya i primenenie v vypusknnoi kvalifikatsionnoi rabote: uchebnoe posobie. Omsk: OmGTU, 2010. 84 p. (In Russ.)



7. *Томашевский В.Н.* Имитационное моделирование в среде GPSS М. Бестселлер, 2010.

8. *Рыжиков Ю.И.* Оценка системы моделирования GPSS WORLD // Информационно-управляющие системы. 2003. №2–3. С. 30–38.

9. *Мещеряков В.А., Денисов В.П., Денисова Л.А.* Обучение студентов имитационному моделированию систем массового обслуживания в MATLAB // Сб. матер. 1 форума Сибири. Омск: ООО «Асмин Принт». 2013. С. 179–181.

10. *Мещеряков В.А.* Программное обеспечение научного творчества студентов при изучении экономико-математических дисциплин // Восемнадцатые Апрельские Экономические Чтения. Матер. межд. научн.-практ. конф. (23 апреля 2013 г.) Омск: ООО «Компания «ПАРАГРАФ», 2013. С. 227–229.

11. *Наумов В.Н.* Об обучении студентов направления «Бизнес-информатика» моделированию систем // Бизнесинформ. 2012. №7. С. 189–193.

12. *Лычкина Н.Н.* Имитационное моделирование экономических процессов. Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2012. 254 с.

13. *Горбунов А.Р., Лычкина Н.Н.* Парадигмы имитационного моделирования: новое в решении задач стратегического управления // Бизнес-информатика. 2007. №2. С. 60–66.

14. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А.* Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985.

15. *Габалин А.В.* Вопросы оптимизации структуры распределенных систем обработки информации // Прикладная информатика. 2007. №6.

16. *Габалин А.В.* Применение математических моделей для управления сложными системами // 54 научная конференция МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе». Секция корпоративных систем управления. Матер. конф. М.: МФТИ, 2011.

17. *Габалин А.В.* Применение математического моделирования на этапе проектирования информационных систем // Тезисы научной сессии НИЯУ, секция информационно-телекоммуникационные системы. М.: МИФИ, 2011. Т. 3.

7. *Tomashevskii V.N.* Imitatsionnoe modelirovanie v srede GPSS Moscow. Bestseller, 2010. (In Russ.)

8. *Ryzhikov Yu.I.* Otsenka sistemy modelirovaniya GPSS WORLD // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2003. №2–3. P. 30–38. (In Russ.)

9. *Meshcheryakov V.A., Denisov V.P., Denisova L.A.* Obuchenie studentov imitatsionnomu modelirovaniyu sistem massovogo obsluzhivaniya v MATLAB // Sb. mater. 1 foruma Sibiri. Omsk: OOO «Asmin Print». 2013. P. 179–181. (In Russ.)

10. *Meshcheryakov V.A.* Programmnoe obespechenie nauchnogo tvorchestva studentov pri izuchenii ekonomiko-matematicheskikh distsiplin // Vosemnadtsatyie Aprel'skie Ekonomicheskie Chteniya. Mater. mezhd. nauchn.-prakt. konf. (23 April, 2013) Omsk: OOO «Kompaniya «PARAGRAF», 2013. P. 227–229. (In Russ.)

11. *Naumov V.N.* Ob obuchenii studentov napravleniya “Biznes-informatika” modelirovaniyu sistem // Biznesinform. 2012. №7. P. 189–193.

12. *Lychkina N.N.* Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov. Uchebnoe posobie. Moscow: INFRA-M, 2012. 254 p. (In Russ.)

13. *Gorbunov A.R., Lychkina N.N.* Paradigmy imitatsionnogo modelirovaniya: novoe v reshenii zadach strategicheskogo upravleniya // Biznes-informatika. 2007. №2. P. 60–66. (In Russ.)

14. *Tsvirkun A.D., Akinfiev V.K., Filippov V.A.* Imitatsionnoe modelirovanie v zadachakh sinteza struktury slozhnykh sistem. Moscow: Nauka, 1985. (In Russ.)

15. *Gabalin A.V.* Voprosy optimizatsii struktury raspredelennykh sistem obrabotki informatsii // Prikladnaya informatika. 2007. №6. (In Russ.)

16. *Gabalin A.V.* Primenenie matematicheskikh modelei dlya upravleniya slozhnymi sistemami // 54 nauchnaya konferentsiya MFTI “Problemy fundamental’nykh i prikladnykh, estestvennykh i tekhnicheskikh nauk v sovremennom informatsionnom obshchestve”. Sektsiya korporativnykh sistem upravleniya. Mater. konf. Moscow: MFTI, 2011. (In Russ.)

17. *Gabalin A.V.* Primenenie matematicheskogo modelirovaniya na etape proektirovaniya informatsionnykh sistem // Tezisy nauchnoi sessii NIYaU, sektsiya informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy. Moscow: MIFI, 2011. T. 3. (In Russ.)

#### Сведения об авторе

*Алексей Валерьевич Габалин*

*Научный сотрудник*

*Институт проблем управления РАН,  
Москва, Россия*

*Тел.: 8 (495) 334-89-70*

*Эл. почта: gabalina@bk.ru*

#### Information about the author

*Aleksey V. Gabalin*

*Researcher*

*V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*Tel.: 8 (495) 334-89-70*

*E-mail: gabalina@bk.ru*