

# УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНОСТЬЮ ЗАДАЧ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**О.В. Жвалевский**

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН*  
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., дом 39  
E-mail: ozh@iias.spb.su

**С.Б. Рудницкий**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*  
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А  
E-mail: sbr@spiiras.ru

**Ключевые слова:** эргатическая система, оператор сложной системы, функциональное состояние, тренажер, симулятор, биологическая обратная связь, математическое моделирование.

**Аннотация:** В работе рассматривается проблема создания специализированных игровых сред (симуляторов) предназначенных для оценки текущего уровня трудоспособности оператора сложной эргатической системы. Приводятся элементы математического моделирования и рассматривается архитектура симулятора. Выбирая те или иные модели управления моторной подсистемой человека, модели ошибок оператора, модели среды симулятора и аналитические модели, можно добиться описания достаточно широкого круга реальных проблемных ситуаций.

## 1. Введение

Симулятор — это программно-аппаратная система, представляющая для пользователя вид игровой среды. Существует два типа симуляторов. К первому типу относятся симуляторы, которые частично или полностью воспроизводят рабочее место оператора определенной сложной эргатической системы. Основное назначение такого симулятора — выработка профессиональных навыков в обстановке, максимально приближенной к реальной. Ко второму типу относятся симуляторы, в которых пользователю предоставляется возможность управлять некоторыми искусственными (абстрактными) предметами, оказываясь в некоторых искусственных ситуациях. В этом случае, основное назначение симулятора — это контроль (проверка) функциональных навыков оператора и их совершенствование. В общем случае, представляется удобным создавать симуляторы третьего типа, которые совмещают как свойства симуляторов первого типа, так и свойства симуляторов второго типа. Такие симуляторы позволяют тренировать конкретные профессиональные навыки, и, одновременно, проводить проверку уровня текущей работоспособности оператора.

Симуляторы второго типа вызывают особый интерес. Действительно, если предоставить пользователю некоторую среду, законы функционирования которой заранее выбираются экспериментатором, то от пользователя можно будет получить объем экспериментальных данных, достаточный для того, чтобы классифицировать качество совершаемых им действий в подходящих для этого шкалах, оценивающих уровень его текущей производительности. Основная задача заключается в том, чтобы построить такие шкалы и соответствующим им образом организовать игровую среду. Один из подходов к решению этой задачи состоит в организации серии экспериментов

(функциональных тестов) постепенно увеличивающейся сложности и последующем анализе получаемых таким образом экспериментальных данных. Настоящая работа посвящена реализации этого подхода.

## 2. Математическое моделирование

Будем рассматривать симулятор (в общем виде) как систему, которая генерирует определенные воздействия или стимулы. Оператору необходимо так же определенным образом реагировать на эти воздействия. Например, на экране могут возникать геометрические фигуры различной формы (квадрат, треугольник и круг), а оператору нужно отмечать (нажатием на кнопку клавиатуры или манипулятора «мышь») фигуру только какой-то одной формы (например, это может быть треугольник). В соответствии с этим, с процессом отображения каждой фигуры связаны два параметра: период  $T$  — длительность, в течение которой данная фигура отображается на экране; и период  $T^*$  — длительность, в течение которой данная фигура отсутствует на экране. Оба периода образуют цикл длительностью  $\tau = T + T^*$ . Следует заметить, что с каждым появлением фигуры связаны два момента времени: момент времени  $t_i$  ( $i = \overline{1, K}$ ), когда фигура непосредственно появляется на экране, и момент времени  $t_i^*$  ( $i = \overline{1, K}$ ), когда фигура стирается с экрана, а  $K$  — это общее количество предъявляемых оператору фигур. Предполагается, что оператор реагирует на предъявляемую ему  $i$ -тую фигуру непосредственно после момента времени  $t_i$ , однако, в действительности, момент реакции оператора может наступить уже после момента времени  $t_i^*$ . Таким образом, здесь имеются два противоположных друг другу процесса. Первый процесс — это процесс генерации стимулов. Это — первичный процесс и этот процесс находится под полным контролем экспериментатора. Второй процесс — это процесс, отражающий действия оператора в ответ на предъявляемые ему стимулы. Этот процесс является уже вторичным. Изначально предполагается, что первичный процесс всегда относительно проще, чем вторичный процесс.

Можно выделить несколько различных уровней моделирования процесса порождения стимульного материала (то есть — первичного процесса).

Первый уровень соответствует регулярным потокам событий. Регулярные потоки характеризуются простой частотой совершения событий, или, что то же самое, интенсивностью потока. Пока период отображения  $T$  фигуры мал по сравнению с полным периодом  $\tau$ , мы можем рассматривать каждый стимул как точечное событие. Кроме того, полный период  $\tau$  должен быть больше, чем время реакции оператора. В то же время, если период  $T$  сравним с полным периодом  $\tau$ , то каждый стимул уже нельзя рассматривать как точечное событие.

Второй уровень соответствует простому пуассоновскому процессу. Такой процесс обладает рядом свойств: ординарность (простота), независимость (во времени) и стационарность. И, наоборот, каждый ординарный, независимый и стационарный процесс является простым пуассоновским процессом. Простой пуассоновский процесс характеризуется такой величиной как интенсивность.

Несколько иной подход к генерации стимульного материала заключается в рассмотрении последовательности пар  $(T, T^*)$ . Эти пары порождают альтернирующий процесс, который включает два типа периодов: первый период соответствует периоду отображения фигуры, второй период — периоду отсутствия фигуры на экране. Распределения периодов соответствующих типов полагаются независимыми. Реакция оператора также может рассматриваться как последовательность упорядоченных пар, однако, распределения периодов различных типов уже могут быть зависимыми.

Введение биологической обратной связи (БОС) позволяет непрерывно менять интенсивность первичного потока в ответ на определенную интенсивность действий оператора.

Третий уровень модельного описания соответствует уже нестационарным пуассоновским процессам. Здесь предложено несколько различных подходов к моделированию: процессы восстановления, двойные пуассоновские процессы и процессы Кокса. Во-первых, мы можем рассматривать простые пуассоновские процессы и использовать случайные приращения. Этот способ крайне полезен при организации БОС, поскольку параметры процесса приращений могут меняться в ответ на изменение текущих характеристик оператора. Во-вторых, мы можем использовать случайные периоды и рассматривать последовательность разностей (приращений времени) между двумя последовательными событиями. В-третьих, мы можем использовать модели, основанные на смесях распределений и динамически менять основную функцию распределения (которая описывается, в этом случае, как взвешенная сумма частных функций распределения), также в ответ на текущие изменения характеристик оператора.

Самый высокий (четвертый) уровень модельного описания соответствует неординарным процессам. Этот подход более всего пригоден для генерации сложных стимулов, когда каждый стимул представляется как последовательность простых стимулов или как совокупность различных аспектов фигуры (параметров и характеристик). В частности, мы можем случайным образом выбирать форму, цвет, размер и способ отображения каждой фигуры различными способами и в различных комбинациях.

Выбор модели для описания последовательности действий оператора определяется текущей исследовательской задачей. Если модель первичного процесса лежит на некотором уровне, то модель вторичного процесса должна лежать на следующем по сложности уровне. В самом общем случае, мы можем рассматривать оба процесса как пуассоновский процесс с прореживанием или как композицию (сумму) нескольких различных простых пуассоновских процессов. Таким образом, характеристики оператора могут быть в общем виде описаны в терминах обоих выбранных моделей.

### 3. Архитектура системы

Программная реализация симулятора представляет собою вариант компьютерной «игры», которая обычно состоит из «уровней» и «миссий». За основу реализации может быть, вообще, взята любая существующая компьютерная игра, дополненная модулем управления сложностью и модулем аналитической обработки. Наиболее полный вариант реализации симулятора состоит в создании специального редактора для описания стимулов (форма фигуры, ее тип, способ отображения на экране, принципы взаимодействия фигур различных типов и т.д.) и различных уровней «игры» (сценариев проведения функциональных тестов).

Особый интерес представляет реализация принципа БОС. В первом приближении, этот принцип заключается в том, чтобы менять свойства игровой среды в ответ на текущие действия оператора. Это оказывается необходимым, в частности, при оценке времени реакции оператора. Поскольку у операторов, в общем случае, различное время реакции, то, например, при увеличении частоты предъявления фигур, у различных операторов будут происходить «срывы» в определении целевой фигуры на различных частотах, но, как только предельная частота предъявления для конкретного оператора определена, появляется возможность менять и другие параметры отображения фигур. В результате, будет формироваться индивидуальный профиль для каждого оператора. В

то же время, возможность менять свойства стимульного потока в ответ на текущие действия оператора оказывается полезной и при построении тренажеров, когда оператор при помощи ряда последовательных приближений («игр») начинает выполнять некоторые заранее заданные целевые «паттерны» поведения. В этом смысле, БОС становится частью системы самоконтроля оператора и помогает ему лучше овладевать требуемыми навыками.

Дальнейшее развитие принципа БОС заключается в том, чтобы проводить мониторинг и оценивать функциональное состояние (ФС) оператора во время выполнения им функциональных тестов. Прежде всего, такое оценивание необходимо в «боевой» обстановке, когда оператор управляет некоторой частью критической инфраструктуры. В этом случае, мониторинг ФС осуществляется для того, чтобы предупредить летальный исход или предотвратить возможный ущерб. Оценка ФС оказывается полезной и при построении тренажеров. В этом случае формируется индивидуальный профиль каждого оператора, содержащий описание его типичных психосоматических проявлений как в чистой («фоновой») ситуации, когда оператор не выполняет никаких действий, так и в ситуации, когда он выполняет определенные действия (решая задачи определенного уровня сложности), находится под физической и/или психологической нагрузкой. У каждого оператора это будут свои психосоматические проявления, и их нужно будет явно учитывать при определении текущего уровня трудоспособности. Другими словами, определение текущего уровня трудоспособности должно протекать индивидуальным образом для каждого оператора, и принцип БОС позволяет организовать процесс обучения наиболее гибким образом.

На рис. 1 сведены воедино различные элементы построения эргатических систем на основе БОС в виде структурной схемы, которая является конечной целью математического моделирования. БОС формирует здесь кольцо управления, что делает замкнутой и, в определенном смысле, самонастраивающейся систему оператор/симулятор. В то же время, выбирая те или иные модели управления моторной подсистемой человека, модели ошибок оператора, модели среды симулятора и аналитические модели, можно добиться описания достаточно широкого числа реальных проблемных ситуаций.

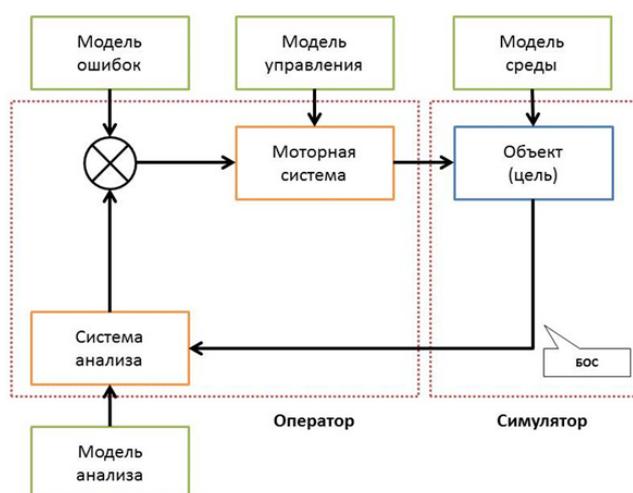


Рис. 1. Обобщенная (структурная) схема симулятора на базе БОС.

## 4. Заключение

Объективная оценка текущей эффективности оператора сложной эргатической системы должна основываться на применении объективных шкал, оценивающих сложность выполняемых оператором задач. Для того, чтобы строить такие шкалы, целесообразно создавать специализированные игровые среды (симуляторы), предлагающие оператору разного рода серии функциональных тестов постепенно увеличивающегося уровня сложности. В первом приближении, эксперимент заключается в предъявлении оператору определенных стимулов и измерении характеристик, описывающих реакцию оператора на предъявляемые ему стимулы [1]. Таким образом, основная задача заключается в выборе подходящего стимульного материала, организации серии функциональных тестов подходящего типа, обосновании способа адекватного описания реакции оператора и разработке адекватного метода математического анализа экспериментальных данных. Прежде всего, целесообразно использовать теорию планирования эксперимента [2], а также специализированные техники построения самих экспериментов [3]. В свою очередь, анализ экспериментальных данных должен базироваться на глубоком анализе ошибок классификации (включая и построение всевозможных ROC-кривых и их более «продвинутых» аналогов) [4-7], каждый раз предлагая подходящую классификацию предметных ситуаций и действий оператора. Кроме того, особую роль в формировании стимульного материала и последующем математическом анализе экспериментальных данных играет математическое моделирование процессов порождения стимулов и процессов, описывающих действия операторов. Следуя [8], необходимо рассматривать точечные процессы (пуассоновские процессы) [9], очереди [10], процессы восстановления [11], а также и их более сложные аналоги, вроде смешанных процессов Пуассона [12], неординарных процессов и процессов с прореживанием.

Исследование выполнено в рамках проекта FFZF-2022-0003.

## Список литературы

1. Zhvaleyevsky O., Roudnitsky S. Modelling And Simulation with Biofeedback for Operators Of Human-Machine Systems // In: Hasan Ayaz (Ed) Neuroergonomics and Cognitive Engineering. AHFE (2022) International Conference. AHFE Open Access. 2022. Vol. 42. AHFE International, USA. <http://doi.org/10.54941/ahfe1001815>.
2. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Наука, 1970. 288 с.
3. Воронов И.А. Эксперимент и методы обработки многомерных данных в исследованиях человека с применением SPSS: медико-биологические исследования, психология, физическая культура и спорт. СПб.: ГОУВПО СПбГУТ, 2008. 100 с.
4. Baldi P., et al. Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: an overview. *Bioinformatics*. 2000. Vol. 16. P. 412-424.
5. Swamidass S.J., Azencott C.-A., Daily K., Baldi P. A CROC stronger than ROC: measuring, visualizing and optimizing early retrieval // *Bioinformatics*. 2010. Vol. 26, No. 10. P. 1348–1356. doi:10.1093/bioinformatics/btq140.
6. Powers D.M.W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation // *J. Mach. Learn. Technol.* 2011. Vol. 2. P. 2229-3981. doi:10.9735/2229-3981.
7. Grandini M., Bagli E. Metrics for multi-class classification: an overview // *ArXiv*. 2020. Pp. abs/2008.05756 (2020) Pp. abs/1905.07213.
8. Хименко В.И. Случайные данные и анализ. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 424 с.
9. Cox D.R., Isham V. *Point Processes*. Chapman & Hall/CRC, 1980.
10. Cox D.R., Smith W.L. *Queues*. Methuen, 1961.
11. Cox D.R. *Renewal Theory*. Methuen, 1962.
12. Grandell J. *Mixed poisson processes*. CRC Press, 1997. Vol. 77.