

УПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКОЙ ОПЕРАТОРОВ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Сохин И.Г.

АО «Научно-исследовательский институт авиационного оборудования»,
Московская область, Жуковский, Россия
isokhin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема эффективного управления подготовкой операторов интеллектуальных мобильных роботов. Анализируются недостатки традиционного подхода к управлению подготовкой операторов. В качестве альтернативы рассматривается оригинальный метод адаптивного моделирования компетенций (АМК-метод) операторов. Даются рекомендации по применению и реализации АМК-метода для управления подготовкой операторов интеллектуальных мобильных роботов.

Ключевые слова: АМК-метод, адаптивное моделирование компетенций, байесовский вывод, вероятностное программирование, качество деятельности, компетентность, мобильный робот, нештатная ситуация, оператор, профессиональная подготовленность, статистическое моделирование.

Введение

Внедрение технологий искусственного интеллекта в эргатические системы различного назначения сопряжено с возникновением ряд новых актуальных методологических проблем взаимодействия человека-оператора с системами искусственного интеллекта. Одной из таких проблем является необходимость трансформации системы подготовки операторов, управляющих интеллектуальными мобильными роботами (далее – ИМР). Здесь под мобильным роботом понимается широкий класс роботов, способных к перемещению в пространстве. К ним, в частности, относятся современные пилотируемые и автоматические космические аппараты, авиационные, водные, железнодорожные, автомобильные и другие автоматизированные транспортные системы. Ключевой спецификой деятельности операторов ИМР в эргатической системе, в которой многие управленческие функции переданы роботу, по-видимому, станет смещение акцентов в сторону борьбы с нештатными ситуациями.

Подобное происходило с подготовкой космонавтов при переходе от аналоговых систем управления космическими аппаратами к цифровым. Этот переход сопровождался существенным усложнением алгоритмов управления и, как следствие, возрастанием разнообразия откликов системы на различные ситуации. И хотя цифровые системы управления были существенно интеллектуальнее аналоговых и обеспечивали высокую степень автоматизации процессов, система подготовки космонавтов была переориентирована на обнаружении и парировании множества нештатных ситуаций, связанных с неправильным функционировании автоматики [1].

Научно-обоснованная методология подготовки летного состава и космонавтов основана на формировании адекватного, устойчивого образа полета и готовности действовать в незнакомых нештатных ситуациях [2-5]. На практике это достигается за счет постепенного нарастания сложности тренировочных заданий путем ввода разнообразных нештатных ситуаций, связанных с неопределенностью информации, новизной, необходимостью принятия ответственных альтернативных решений в режиме реального времени. К сожалению, реализуя данную методологию на практике, в рамках традиционного подхода к управлению подготовкой операторов невозможно получать статистические оценки качества подготовленности операторов. Тем самым не обеспечивается гарантия качества подготовки операторов к действиям в нештатных ситуациях.

1. Анализ традиционного подхода к подготовке операторов

В рамках традиционного подхода система управления подготовкой операторов представлена классом моделей «вход-выход» с ограниченной обратной связью по текущему состоянию компетентности обучаемых (оцениваются только результаты действий оператора). Подобные модели динамических систем характеризуют только внешнее поведение обучаемых и описываются следующим кортежем:

$$\Sigma^1 = \langle T, U, Y, \Omega_c, \Gamma \rangle, \quad (1)$$

где T – упорядоченное множество моментов времени (порядковых номеров тренировок); U – множество значений входных величин (тренировочных заданий); Y – множество значений выходных

величин (результатов действий оператора); Ω_c – пространство функций $u(t)$, описывающих допустимые входные воздействия; Γ – пространство функций $y(t)$, описывающих изменение по времени выходных величин.

Главной особенностью традиционного подхода является рассмотрение человека-оператора как «черного ящика», у которого отсутствует внутренняя структура. Поэтому понятия качества деятельности и качество подготовленности (компетентности) оператора отождествляются. В действительности, качество деятельности и качество подготовленности хотя и взаимосвязаны, но не тождественны. Первое понятие характеризует результат деятельности, а второе – свойства самого оператора. Для пояснения приведем определения этих понятий.

Качество деятельности – совокупность существенных свойств деятельности оператора, обеспечивающих достижение поставленной цели в заданных условиях.

Профессионализм (компетентность) специалиста – совокупность свойств специалиста – личностных и квалификационных (знания, навыки, умения), определяющих успешность его профессиональной деятельности.

В результате отождествления понятий в процессе управления отсутствует обратная связь между наблюдаемыми оценками результатов деятельности оператора и оценками внутренних состояний его компетентности.

Недостатки традиционного подхода:

1. Закон управления подготовкой задается априорно программой заданий на каждую тренировку. Возможности индивидуализации программ подготовки ограничены.

2. Невозможно реализовать *адаптивное* управление подготовкой оператора с обратной связью по текущему состоянию его компетентности.

3. При многообразии условий выполнения полетных операций и наличии множества нештатных ситуаций, что характерно для обучения операторов, практически невозможно получить статистические оценки качества их деятельности из-за недостаточности однородных статистических данных.

4. В силу *недостаточности однородных статистических данных* по причинам, указанным в п.3, требования к качеству подготовки операторов не могут быть заданы количественно, например, в виде вероятностей безошибочного выполнения полетных заданий. Поэтому задаваемые требования, как правило, неконкретны. Как следствие, результаты подготовленности операторов могут не удовлетворять ожиданиям заказчиков подготовки.

5. Сертификация операторов производится по результатам их деятельности на экзамене, на котором обучаемым предъявляется ограниченная выборка тренировочных заданий. В результате полученная квалификация оператора может не соответствовать фактическому уровню его подготовленности.

Указанные недостатки традиционного подхода делают его несостоятельным при создании эффективной системы управления подготовкой и сертификации операторов ИМР, способной в полной мере гарантировать достижение требуемого *качества их профессиональной подготовленности*. Возникает необходимость разработки альтернативных методов управления подготовкой операторов ИМР, лишенных недостатков традиционного подхода.

Цель исследования – разработать альтернативный традиционному подходу метод адаптивного управления продуктивными состояниями компетентности операторов ИМР, основанный на статистическом анализе данных, полученных во время их тренировок.

2. Метод адаптивного моделирования компетенций космонавтов (АМК-метод)

Для преодоления недостатков традиционного подхода применительно к тренажерной подготовке космонавтов со спецификой деятельности в многочисленных нештатных ситуациях космического полета автором статьи был разработан альтернативный метод адаптивного моделирования компетенций (АМК-метод) операторов [7-11]. Метод защищен патентом на изобретение [6].

Впервые введено определение понятия «компетенция», которое позволило формализовать отношения между профессиональными свойствами оператора и качеством его деятельности и, таким образом, обеспечить количественную оценку качества подготовленности (компетентности) оператора.

Компетенция – составляющая *компетентности* оператора, характеризующая его проявленную способность реализовать конкретное операторское свойство с требуемым качеством в конкретных условиях. Примеры компетенций пилота: навыки пилотирования, умение читать информацию с интерфейсов, умения коммуникаций с другими участниками, знания правил полета, стрессоустойчивость в нештатных ситуациях и т.п. Профессиональная компетентность оператора представляется совокупностью (множеством) его компетенций.

Под адаптивным моделированием состояний компетентности операторов понимается формализованный процесс, включающий создание структурированной системы компетенций операторов с заданием соответствующих метрик и построение математических моделей, необходимых для адаптивного управления состояниями компетенций в ходе подготовки.

В основе АМК-метода лежит адаптивно-компетентностный подход, при котором репрезентативная выборка тренировочных заданий, моделируемых на тренажерах в процессе тренировок, выбирается динамически, исходя из текущего состояния подготовленности (компетентности) операторов. Данный подход и связанные с ним технологии основаны на переходе от традиционной динамической системы «вход-выход» к динамической системе с внутренними пространствами состояний «вход-состояние компетентности оператора-выход». В новой технологии управления подготовкой оператор рассматривается не как традиционный «черный ящик», а как объект, имеющий внутреннюю структуру компетенций:

$$\Sigma^2 = \langle T, U, Y, X, \Omega_c, \Gamma, \psi, \phi \rangle. \quad (2)$$

В (2) в дополнение к (1) используются следующие обозначения: $X = F(U, Y)$ – множество переменных величин, характеризующих состояние компетенций оператора; $\psi: U \rightarrow X$ – переходная функция, характеризующая зависимость элементов множества состояний X от входных величин U и прежнего состояния; $\phi: U \times X \rightarrow Y$ – выходная функция, характеризующая зависимость элементов множества выходов Y от входной величины и состояния.

Тройка $\langle X, \psi, \phi \rangle$ в (1) в дополнение к внешним свойствам описывает структурные свойства системы и может быть определена другими составляющими системы. Особенностью систем в пространстве состояний, в отличие от моделей «вход-выход», является принципиальная возможность оторванности (абстрактности) структуры и переменных модели от наблюдаемых величин в реальном мире. Абстрактность моделей «вход-состояние-выход», позволяющая математически формализовать и интерпретировать поведение сложной динамической системы, является их несомненным достоинством.

Концептуальная модель метода адаптивного управления состояниями компетенций космонавтов (экипажа ПКО – пилотируемого космического объекта) представлена на рис. 1.

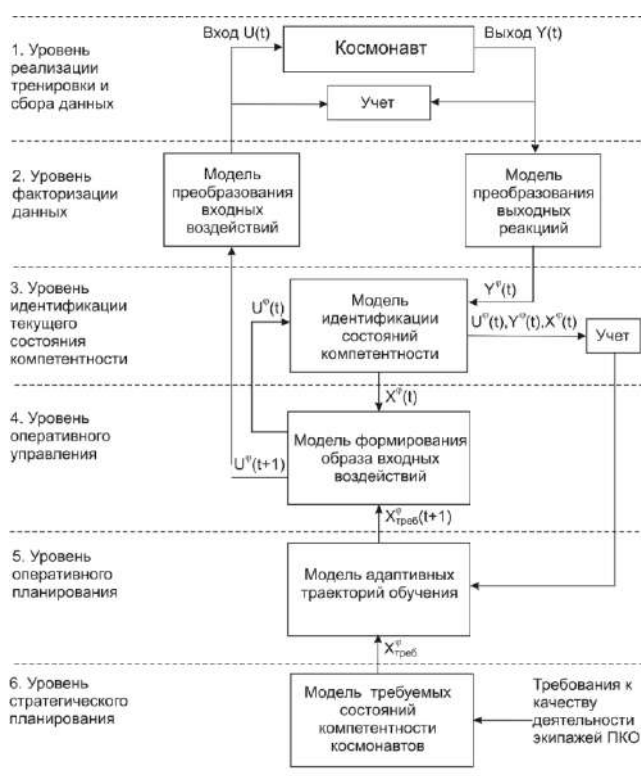


Рис. 1. Концептуальная модель АМК-метода

Моделирование состояний компетентности космонавтов в ходе их тренировок на тренажерах представлено как многоуровневый двусторонний процесс прямого и обратного «восхождения от абстрактного к конкретному». Подготовка космонавтов на тренажерах рассматривается как

дискретный процесс с рекуррентным изменением входных воздействий $U(t)$ от очередной тренировки к следующей. На нижнем уровне реализации отдельной тренировки моделируются объекты реальной предметной деятельности космонавтов и осуществляется сбор конкретных данных. На вышестоящих уровнях полученные данные трансформируются в абстрактные информационные объекты, представленные математическими образами. Сущность управления состояниями компетенций космонавтов заключается в осуществлении математических операций над абстрактными информационными объектами. Реализация сложных вычислительных процедур АМК-метода в современных условиях может быть обеспечена технологиями статистического анализа больших данных (Data Science) и искусственного интеллекта.

Нижний (первый) уровень модели представлен объектами реальной предметной деятельности космонавтов в системе «ЦУП-экипаж-ПКО». На этом уровне инструктором реализуется программа тренировки на тренажере и собираются данные об ошибках космонавтов. Входами $U(t) \subset U$ являются временные потоки полетных операций и нештатных ситуаций, моделируемых на тренажерах и являющихся входными воздействиями на космонавтов на t -й тренировке. Пространственно-временная структура U входов изоморфна структуре деятельности космонавтов в космическом полете. Выходами $Y(t)$ являются ошибки космонавтов, зафиксированные в ходе t -й тренировки.

На втором уровне происходит изоморфное преобразование входных и выходных данных, определенных на структуре реальных и абстрактных объектов. Вектор-образ $U^o(t+1) = \langle u_1, \dots, u_n \rangle$, отражающий сложность входных сигналов в пространстве оценочных признаков u , порождает множество реальных полетных операций и нештатных ситуаций $U(t+1)$, сложность которых соответствует сложности вектора $U^o(t+1)$. Признаками u сложности заданий могут быть – одновременное выполнение нескольких операций, например, ведение радиобмена на фоне управления объектом; неопределенность действий, возникшая в связи с нештатной ситуацией; срочное принятие критически важных решений и др. Вектор-образ $Y^o(t) = \langle y_1, \dots, y_m \rangle$ характеристик ошибок космонавтов содержит такие оценочные признаки ошибки, как критичность исхода $\langle S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 \rangle$ в отношении выполнения полетного задания (S_0 – штатное функционирование, S_1 – снижение качества, S_2 – невыполнение программы, S_3 – нарушение условий безопасности, S_4 – катастрофа), причинность возникновения вследствие недостаточной компетенции (например, ошибка, вызванная стрессом), момент возникновения в циклограмме тренировки, место в структуре деятельности (конкретная операция полетного задания) и т.п.

Временные ряды векторов $U^o(t)$ и $Y^o(t)$ используются на третьем уровне для идентификации состояний компетентности космонавтов как нелинейных функций $X^o(t) = f\{U^o(t), Y^o(t); U^o(t-1), Y^o(t-1); \dots; U^o(t=0), Y^o(t=0)\}$.

На уровне оперативного управления тренировкой формируется вектор входных воздействий $U^o(t+1) = \langle u_1, \dots, u_n \rangle$ для очередной тренировки по разности текущего $X^o(t)$ и требуемого $X_{mp}(t)$ состояний компетентности космонавта.

На уровне оперативного планирования подготовки космонавтов выбирается траектория обучения в фазовом пространстве компетенций, отвечающая требованиям и ограничениям подготовки и индивидуальным возможностям конкретного космонавта.

Формирование требуемых состояний компетенций космонавта на основании заданных требований к качеству его деятельности осуществляется на самом верхнем уровне планирования.

На основе АМК-метода появляется возможность получения статистических оценок состояния компетенций экипажей и прогнозных оценок вероятности успешного выполнения полетных заданий. По сути, это означает создание цифрового двойника экипажа, который может использоваться для совершенствования как процессов подготовки, так и процессов обеспечения безопасности и надежности космических полетов в целом.

Например, оценка каждой компетенции может быть представлена как дискретная функция распределения $F(X_i(t)) = P(U = U_u^\alpha, Y = S_j)$ условных вероятностей ошибок, причиной которых явилась недостаточность данной компетенции, по уровням сложности задания U_u^α и критичности исходов S_j . На рис. 2 представлен пример временного среза оценки отдельно взятой компетенции экипажа.

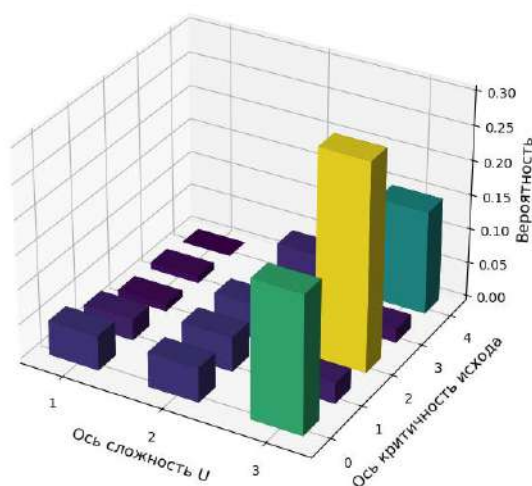


Рис. 2. Временной срез оценки компетенции экипажа

Имея в ходе подготовки распределение ошибок экипажа по разным компетенциям, можно адаптивно управлять состояниями его подготовленности, проектируя оптимальную траекторию обучения. Например, текущее состояние верхнего уровня компетенций экипажа может быть представлено в виде диаграммы (рис. 3). Диаграмма позволяет выявлять «слабые места» в состоянии компетентности конкретного экипажа и персонализировать программы его обучения, подбирая адекватные тренировочные задания.

Оценка компетенций экипажа по 5-бальной шкале



Рис. 3. Пример диаграммы оценки текущего состояния компетенций экипажа

Путем композиции компетенций, которые задействованы в структуре выполнения конкретного полетного задания экипажа, могут быть аналитически вычислены прогнозные оценки вероятности совершения им критических ошибок и, как следствие, оценена вероятность успешного выполнения этого задания.

3. Рекомендации по применению и реализации АМК-метода для управления подготовкой операторов ИМР

На основе АМК-метода может быть создана АСУ ПО – автоматизированная система управления подготовкой операторов ИМР, ориентированная на непрерывное улучшение процессов как практического, так и теоретического обучения. Цикл непрерывного улучшения процессов подготовки представлен на рис. 4.



Рис. 4. Цикл непрерывного улучшения процессов подготовки операторов

На основании исходных данных на подготовку разрабатывается структура необходимых компетенций и базовая программа подготовки операторов ИМР, рассчитанная на среднестатистического оператора. На тренировках производится моделирование компетенций операторов посредством предоставления им специально сформированных тренировочных заданий. В ходе реализации разработанной программы осуществляется систематизированный сбор данных о результатах деятельности обучаемого оператора на тренировках, фиксируются и систематизируются ошибки. Собранные данные подвергаются статистическому анализу с целью оценки текущего состояния компетенций обучаемого и сравнения с требуемым состоянием, определяемым базовой среднестатистической траекторией обучения. При существенных расхождениях текущего и требуемого состояний проводится корректировка программы подготовки. Задачей адаптивно-оптимального управления подготовкой оператора является построение траектории обучения, которая приводит состояние компетентности оператора в область заданных целевых состояний в условиях временных и других ограничений ресурсов подготовки. Возможна также адаптивная оптимизация базовых программ подготовки операторов на основании статистического анализа уже реализованных программ.

Имеется множество вариантов реализации АМК-метода в целях создания АСУ ПО. Все зависит от структур данных и способов их обработки. Самый простой вариант решения, когда все оценки делаются инструкторами «вручную» и затем выполняется статистическая обработка полученных данных. Для этого достаточно использования таблиц *Excel* (как было реализовано в Центре подготовки космонавтов). Для представления более сложных структур данных потребуется использование различных библиотек для *Python*, таких как *Pandas*, *NumPy*, *Matplotlib* и других [12]. Для статистического анализа имеются разнообразные методы статистического моделирования от классической частотной статистики до машинного обучения, содержащиеся в библиотеках *SciPy*, *Scikit-learn*, *Statsmodels*. Перспективным для реализации АМК-метода представляется направление байесовского статистического моделирования и вероятностного машинного обучения [13]. Байесовский вывод, который позволяет обновлять вероятности гипотез о состояниях компетенций оператора по мере поступления новых данных в ходе тренировок, имеет преимущества при малых (недостаточно больших) данных и неопределенности процессов формирования компетенций операторов. Для построения сложных байесовских моделей и вероятностного программирования на *Python* можно воспользоваться мощной библиотекой *PyMC*.

Для создания АСУ ПО целесообразно использовать гибкий *Agile* подход к управлению проектом, разбивая проект на небольшие итерации (спринты), последовательно наращивая функционал и адаптируя систему под конкретные задачи подготовки операторов. В команду разработчиков *Agile*-проекта рекомендуется включать: системных аналитиков – интеграторов проекта, экспертов-инструкторов практической подготовки операторов ИМР, ИИ-инженеров, владеющих методами машинного обучения и статистического моделирования, разработчиков программного обеспечения *DevOps*.

4. Заключение

Инновационный метод адаптивного моделирования компетенций открывает новую парадигму подготовки операторов эргатических систем с искусственным интеллектом. В отличие от традиционной парадигмы подготовки, основанной на моделях «вход-выход» с ограниченной обратной связью по текущему состоянию подготовленности операторов, применение АМК-метода, основанного на моделях «вход-состояние компетентности-выход», позволяет с опорой на использование современных технологий статистического моделирования обеспечить адаптивное управление

состояниями компетентности операторов и, тем самым, гарантировать достижение требуемого, количественно заданного, качества профессиональной подготовленности обучаемых.

Моделирование компетенций помогает структурировать обучение, а статистический анализ – оптимизировать его на основе данных. Сочетание моделирования компетенций и статистического анализа превращает подготовку операторов ИМР в наукоемкий процесс, где:

- каждый навык формализован и измерим;
- обучение персонализируется на основе данных;
- риски ошибок прогнозируются и минимизируются.

АМК-метод достаточно универсален. Его применение может масштабироваться как в отношении разных типов ИМР и решаемых с их помощью задач, так и в отношении других эргатических систем с искусственным интеллектом, в которых предъявляются высокие требования к уровню профессиональной компетентности операторов.

Литература

1. *Сохин И.Г.* Ожидаемые проблемы человеко-машинного взаимодействия в системах Искусственного Интеллекта // Эргодизайн. – 2024 – № 3 (25). – С. 374–385. DOI:10.30987/2658-4026-2024-3-374-385.
2. *Пушкин В.Н.* Оперативное мышление в больших системах. – М., 1965. – 376 с.
3. *Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф., Пономаренко В.А.* Образ в системе психической регуляции деятельности. – М: Наука, 1986. – 176 с.
4. *Пономаренко В.А., Завалова Н.Д.* Практическая психология: Проблемы безопасности летного труда. – М: Наука, 1994. – 208 с.
5. *Картамышев П.В., Игнатович М.В., Оркин А.И.* Методика летного обучения. – М: Транспорт, 1987.– 279 с.
6. Патент на изобретение № 2599135. Способ адаптивного управления тренажерной подготовкой операторов сложных систем. Авторы: Долгов П.П., Саев В.Н., Сохин И.Г., Суворова Т.А. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 12.09.2016 г.
7. *Сохин И.Г.* Моделирование состояний компетентности космонавтов в процессе тренажерной подготовки // Космонавтика и ракетостроение. – 2011. – Т. 65, № 4. – С. 180–185.
8. *Сохин И.Г.* Адаптивно-компетентностный подход к решению проблемы управления качеством подготовки космонавтов в интересах гарантированного обеспечения заданного уровня безопасности и надежности космических полетов // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1(3). – С. 36–48.
9. *Сохин И.Г.* Адаптивное управление тренажерной подготовкой космонавтов в интересах гарантированного обеспечения безопасности космических полетов // Труды 12 Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва). ИПУ РАН, 2014. – С. 9131–9139.
10. *Сохин И.Г.* Метод адаптивного управления тренажерной подготовкой космонавтов по состоянию их операторских компетенций // Психология труда, инженерная психология и эргономика: труды Международной научно-практической конференции – Санкт-Петербург, 2014. – С. 333–340.
11. *Сохин И.Г.* Моделирование процессов тренажерной подготовки летных экипажей в интересах гарантированного обеспечения безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204(6). – С. 85–89.
12. *Уэс Маккинни.* Python и анализ данных: Первичная обработка данных с применением pandas, NumPy и Jupiter / пер. с англ. А. А. Слинкина. 3-е изд. – М.: МК Пресс, 2023. – 536 с.: ил.
13. Вероятностное программирование и байесовские методы для хакеров. <https://dataorigami.net/Probabilistic-Programming-and-Bayesian-Methods-for-Hackers/> (дата обращения 16.04.2025).