

# ИСКУССТВЕННЫЙ СЕНСОРНЫЙ КОМПОНЕНТ В СИСТЕМЕ ЧЕЛОВЕК – МАШИНА С КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ<sup>#</sup>

О. В. Кубряк\*, С. В. Ковальчук\*\*

\*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

\*\*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

\*✉ kubriakov@mpei.ru, \*\*✉ kovalchuk@itmo.ru

**Аннотация.** Предлагается концептуальный подход к построению комбинированной обратной связи в системе человек – машина с введением искусственного сенсорного компонента обратной связи, управляемого технической подсистемой. Подход направлен на систематизацию роли комбинированной обратной связи в управлении многоагентными системами, включающими дополнительные элементы, людей и искусственных агентов. Он исследован в задаче управления вертикальной позой человека, а также в синтетических экспериментах (на модели CartPole), рассматриваемых на примере обучения с подкреплением. Изучалась изменчивость эффективности решения задачи управления в зависимости от характеристик каналов передачи информации и модификации свойств введенного искусственного сенсорного компонента обратной связи. Полученные результаты показывают концептуальное сходство наблюдений натурального эксперимента и искусственного численного эксперимента в части функционирования дополнительного канала обратной связи – как присутствие сходного эффекта перерегулирования, так и перспективы повышения качества управления путем настройки искусственного сенсорного компонента.

**Ключевые слова:** взаимодействие человек – машина, оптимальное управление, обратная связь, обучение с подкреплением, многоагентные системы.

## ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействия человека и робота, в том числе мультимодальные [1], – быстрорастущая актуальная междисциплинарная область [2, 3], которая напрямую касается развития искусственного интеллекта и машинного обучения для различных отраслей, в том числе медицины (см., например, работы [4, 5]). В этой области оценка состояний человека в системе человек – машина может рассматриваться как одна из важных прикладных задач. При этом сенсорное обеспечение целевой активности человека, потенциально включающее здесь искусственные компоненты, является важным аспектом, который может оказать существен-

ное влияние на эффективность системы человек – машина.

Замысел данной работы основан на предыдущих исследованиях биологической обратной связи (см., например, работу [6]), показавших, что влияние искусственного сенсорного компонента может касаться как повышения, так и понижения результативности испытуемого в обусловленной инструкцией задаче. Здесь предпринята попытка описать и расширить представление о природе такого искусственного сенсорного компонента, представив общий подход взаимодействия естественного и искусственного интеллектуальных агентов, совместно решающих задачу управления, – путем поддержки человека (агента естественного интеллекта), непосредственно осуществляющего управление. Основной вклад данной работы со-

<sup>#</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 24-11-00272), <https://rscf.ru/project/24-11-00272/>.

стоит в идее формализации системы обратной связи, включающей основной (естественный) и дополнительный (искусственный) каналы в рамках задачи управления. Модель агента, осуществляющего управление, может иметь любую природу, что позволяет проводить исследования в рамках подходов искусственного интеллекта (ИИ) с оценкой эффективности решения задачи управления при различных параметрах компонентов обратной связи. При этом явное рассмотрение обратной связи в различных системах человек – машина должно позволить не только обобщить данную идею на широкий класс подобных систем, но и рассмотреть роль такого взаимодействия в обобщенных многоагентных системах, включающих живых агентов (людей) и технические компоненты.

Статья организована следующим образом: после краткого обзора фундаментальных работ в рассматриваемой междисциплинарной области, сближающей физиологию и технику, даются описание предлагаемого подхода и описание базового и проводившегося численного экспериментов. Далее приводится краткий анализ полученных результатов и выводы.

## 1. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ХАРАКТЕР УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЧЕЛОВЕК – МАШИНА

Область исследования взаимодействия человека и машины развивается в основном в части информационного взаимодействия и построения информационных систем [7]. Однако вопрос взаимодействия в отдельных сценариях требует рассмотрения физиологических особенностей человека (как «живой» системы управления) и технических особенностей машины. Подобные проблемы могут возникать в задачах робототехники, разработки бионических систем (в том числе протезов), двигательной реабилитации и др. Таким образом, особенно актуализируется междисциплинарное направление исследований, связывающее биологию и технику в рамках единой взаимодействующей области. В данном разделе приводится краткий обзор по рассматриваемой теме.

### 1.1. Формирование предметной области

Попытки объяснения мышления, действий человека и функций его организма с помощью опыта, полученного при создании техники, известны с давних пор. Например, Декарт метафорически сравнивал организацию активности человека с работой механических часов [8]. Осмысление бурно развивавшейся в XX в. теории автоматического

управления и, позже, кибернетики, привели к рассмотрению человека-оператора в виде своеобразного «контроллера» с обратной связью [9]. В предвоенном и послевоенном СССР системные идеи в науках о жизни получили свое оригинальное развитие, например, как теория функциональных систем П. К. Анохина [10]. Ключевая роль здесь отводится целеполаганию, предвосхищению, прогнозированию, планированию результата, что можно считать оригинальным русским вкладом [11], иллюстрирующим единое направление двух «ветвей» общей научной идеологии об обратных связях, идущих из наук о жизни и технических наук [12]. Н. А. Бернштейн в начале 1960-х гг. отмечал, что весь период «от публикации первого труда Н. Винера до наших дней, пронизан поиском и использованием аналогий между живыми и искусственными системами, – аналогий, помогавших физиологам в осмыслении системных взаимоотношений организма, а техникам дававших в руки новые и ценные идеи по построению автоматов» [13].

### 1.2. Границы физиологии и техники

Современный всплеск мирового интереса к искусственному интеллекту и развитие робототехники вновь востребуют взаимное сближение физиологии с техникой, которое проявляется в попытках обобщений имеющегося опыта и наработки теоретической базы [4, 14, 15]. Это касается и части ответов к вопросу о «водоразделе», сформулированному когда-то Н. А. Бернштейном: «Окончился ли, нет ли, этот «медовый месяц» выявления и практического применения аналогий и сходств, – но в литературе самого последнего времени начинают все чаще проскальзывать и вопросы противоположного направления: существует ли, все-таки, существенная, принципиальная разница между живыми и неживыми системами, и если существует, – то где пролегает тот водораздел, который образует границу между теми и другими?» [13]. Можно чуть модифицировать этот вопрос, задавшись целью найти условия, при которых взаимодействие живого и искусственного обеспечивалось бы чем-то, что очень условно можно сравнить с «биологической конвергенцией», своеобразным сближением или даже наложением систем управления. То есть, например, когда заданная инструкцией активность человека «включается» в контур общей с машиной системы управления, а результат технической системы управления машиной сближен с конечным полезным эффектом общей системы [6]. В этом случае можно получить измеряемые параметры такой «общей» системы, которые бы более точно, в сравнении с одночисленной ха-



рактикой (такой как, например, температура тела), описывали живую систему и ее действие, приближаясь по смыслу к идее цифрового двойника в технике. Подходы здесь могут базироваться на идеях антиципации, возможности прогноза, свойственных живым системам и, по-видимому, развитому искусственному интеллекту [16].

### 1.3. Биологическая обратная связь и сенсорные перераспределения

Биологическая обратная связь предполагает дополнительную (к обычно воспринимаемой сигнализации от органов чувств) информацию для испытуемого о каких-либо его собственных физиологических параметрах (регистрируемых с помощью прибора), представляя, таким образом, опосредованное участие машины в организации процесса управления какой-то функцией организма. Это может быть визуальное представление испытуемому на экране изображения, связанного сигналами электроэнцефалограммы, электрокардиограммы, пневмограммы и т. д., или, как в примере, приведенном авторами в работе [6], биомеханических параметров – отображения положений общего центра давления стоящего человека на опору. Сегодня полагают, что человек не имеет (условно) «датчика центра тяжести» в виде отдельного чувствительного органа. Естественное управление вертикальной позой производится на основе анализа комплексной информации – от зрения, вестибуляров и проприоцепторов. При этом в системе контроля осанки могут выделять два разных уровня [17]: один уровень касается распределения тонической мышечной активности («поза»), а второй – компенсации внутренних или внешних возмущений («равновесие»). Таким образом, если рассмотреть, например, близкую к кибернетическим представлениям биологическую концепцию [12] – схему функциональной системы по П. К. Анохину [10], то в контексте регуляции вертикальной позы человека можно рассуждать и о двух отдельных «функциональных системах», имея в виду отклонения от прямостояния. При этом естественный сенсорный компонент регуляции в обоих случаях («поза» и «равновесие») представлен одними и теми же чувствительными органами, активность которых отличается в разных режимах. Например, в случае вертикального стояния вестибуляры «включаются» при отклонении головы. С изменением условий меняется «сенсорный вес» поступающих в мозг по разным каналам сигналов, в том числе при моделировании уменьшенной гравитации путем расположения тела человека на специальном стенде параллельно реаль-

ной и под углом к условной «поверхности планеты». В этом случае формируется новое представление о вертикальности, независимое от отолитов вестибулярного аппарата, которое, как считается, базируется на опорной афферентации согласно обобщению работ И. Б. Козловской [18]. При нахождении человека на наклонной поверхности в «обычных» условиях сенсорный перевес для контроля равновесия основывается, как полагают, на скорости отклонения [19]. Возникновение колебаний позы у здоровых людей при спокойном стоянии может быть вызвано «вестибулярным шумом», когда вестибулярный вклад в равновесие выше [20].

Известно также, что влияние на регуляцию функции одних сенсорных каналов у человека может быть мощнее – в этой связи выделяется роль зрения при регуляции вертикальной позы [6, 21]. Явления «сенсорного перевеса» и особенностей функций чувствительных органов демонстрируют адаптивность живой системы управления, чувствительность и восприимчивость к новым условиям и многоканальность.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Формирование искусственного сенсорного компонента

В связи с изложенной выше проблематикой идея искусственного сенсорного компонента обратной связи включает возможность организации намеренного «сенсорного перевеса» в стандартизованной (заданной инструкцией) деятельности испытуемого с использованием технологий биологической обратной связи. Она осуществляется в данном случае путем добавления значимой для регуляции функции объективно измеренной информации в выбранный естественный сенсорный канал. При этом один из вариантов реализации идеи сфокусирован на создании намеренного доминирования зрения в контроле вертикальной позы (рис. 1). Здесь добавление искусственных сенсорных компонентов может обеспечить целенаправленное, отличное от естественного (от обычного) сенсорное обеспечение функции с возможностью конструирования и точной количественной оценки параметров искусственной части. Внешние по отношению к человеку сенсоры – датчики силы стабилоплатформы, на которой стоит человек, – регистрируют данные о положении центра давления на опору, на основе чего испытуемому на экране предоставляется готовая (преобразованная компьютерной программой) информация о поддержании заданной позы или об отклонениях.

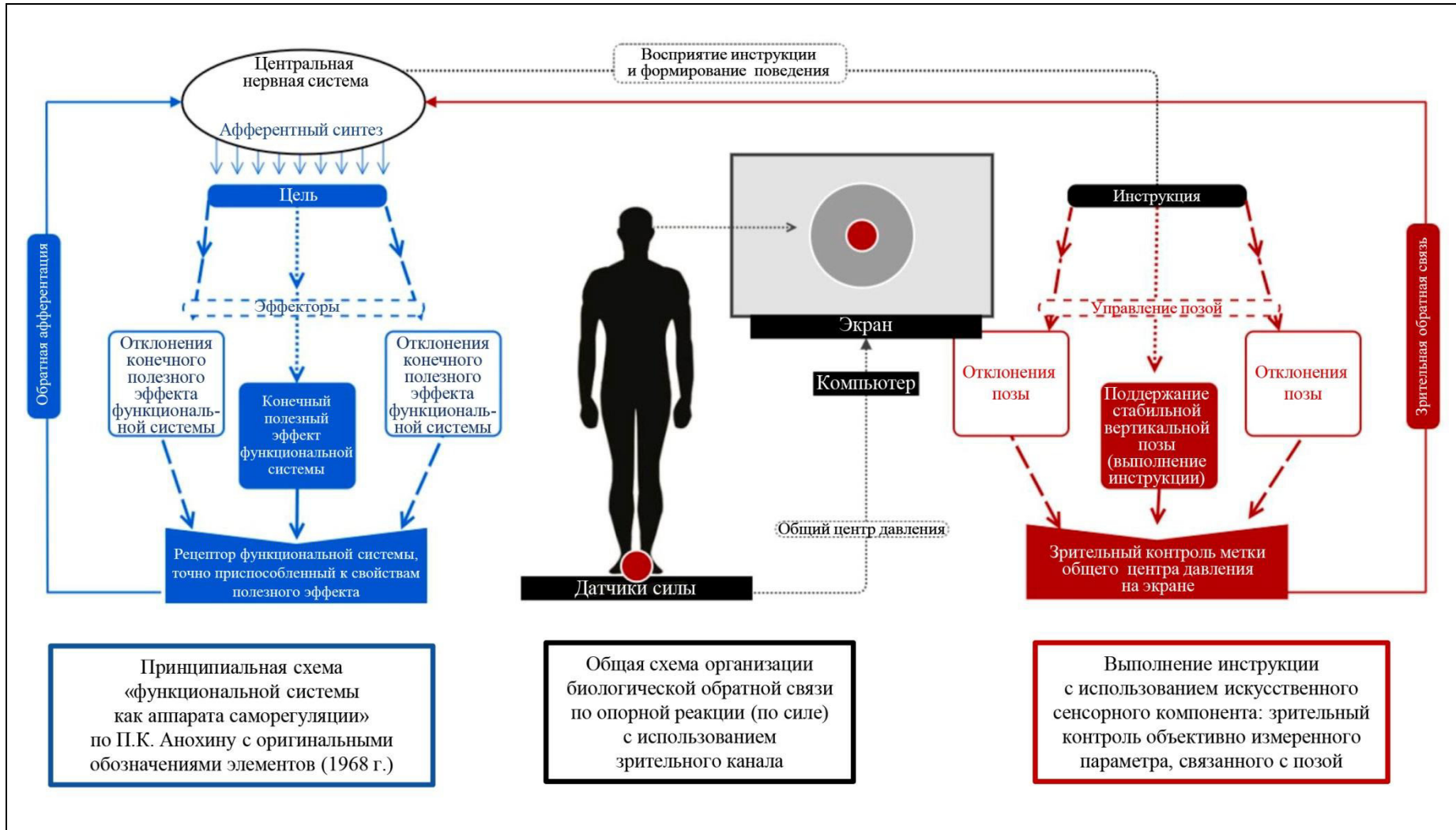


Рис. 1. Пример аналогии: принципиальная схема функциональной системы по П. К. Анохину (слева) и вариант схемы с включением искусственного сенсорного компонента обратной связи в обусловленном инструкцией поведении (справа)



Кроме «функциональной системы», предшественником идеи искусственного сенсорного компонента обратной связи может быть представлена, например, концепция «кольца» по Н. А. Бернштейну [13], которую также можно дополнить условным искусственным сенсорным компонентом обратной связи в обусловленной инструкции задаче. При явном предъявлении и выполнении инструкции цель регуляции стабильности и управляемости вертикальной позы сближается с целью выполнения инструкции. В этом случае, если рассматривать систему человек – машина, то она включает искусственный рецептор, точно приспособленный к свойствам полезного эффекта (регуляции вертикальной позы), который связан с выполнением инструкции. В более общих определениях, описывая подобную систему управления человек – машина, можно выделить классические основные этапы: получение информации о задаче управления, получение информации о результате управления, анализ получаемой информации, выполнение решения.

## 2.2. Набор реальных данных для моделирования

В качестве эталонных использовались реальные данные ранее описанного наблюдения, выполненного с соблюдением современных этических норм под руководством одного из авторов на 25 молодых, практически здоровых добровольцах – 10 женщинах и 15 мужчинах; средний возраст добровольцев – 23 года [6]. Оригинальная исследовательская процедура включала использование зрительного канала биологической обратной связи по опорной реакции для регуляции собственной вертикальной позы испытуемых (подобно представленному на рис. 1) в различных режимах, отличающихся друг от друга чувствительностью («глубиной», «масштабом») соответствующей обратной связи, а также предусматривала контрольные этапы. Процедура проводилась в такой последовательности.

*Шаг 1.* Фаза «R1o»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, взгляд перед собой на черный экран, руки свободно вдоль тела – 1 мин.

*Шаг 2.* Фаза «R1c»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, глаза закрыты, руки свободно вдоль тела – 1 мин.

*Шаг 3.* Фаза «K = 15»: стоя вертикально, стопы по разметке силовой платформы, взгляд перед собой на экран с меткой общего центра давления, руки свободно вдоль тела, в режиме биологической обратной связи по опорной реакции с глубиной обратной связи, характеризующейся увели-

ченным на 15 % от нормального коэффициентом преобразования – 1 мин.

*Шаги 4–7.* Аналогично шагу 3, но с увеличивающимися с шагом 15 % коэффициентами преобразования: коды «K = 30», «K = 45», «K = 60», «K = 75».

*Шаги 8, 9.* Повтор фаз 1 и 2, обозначаемый кодами «R2o» и «R2c».

Кроме того, соблюдались следующие условия:

- В управляемых фазах требовалось удерживать метку-кружок в целевой зоне – центре круглой мишени.

- Между всеми фазами предусматривался минутный перерыв для отдыха.

Для реализации процедуры применялось сертифицированное оборудование – стабилметрическая система ST-150 с штатным программным обеспечением STPL (Россия; ФСР 2010/07900; свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.39.004.A N 41201). Результат испытуемых оценивался автоматически в программе STPL в расчетных единицах, отражающих количество регистрируемых (дискретных) удержаний метки общего центра давления в целевой зоне за один период относительно максимально возможного результата. Применявшийся для анализа набор данных из наблюдения [6] включал численные значения достигнутого испытуемыми результата управления собственной вертикальной позой в задаваемой инструкцией задаче удержания видимой на экране метки собственного общего центра давления испытуемого на опору в целевой зоне («мишени») для каждого режима управления позой.

## 2.3. Многоагентная система управления и выбор модели для численного эксперимента

При рассмотрении технических решений на базе ИИ, ориентированных на взаимодействие с человеком (роботов, бионических систем, различных медицинских решений и пр.) важной представляется формулировка принципов взаимодействия агента искусственного интеллекта (АИИ) как инженерной системы, дополняющей возможности агента естественного интеллекта (АЕИ, человека). В подобных ситуациях часто рассматриваются такие концепции, как, например, гибридный дополненный интеллект [22]. В технических системах данный вопрос касается не только информационных процессов, но и специфики физической и биологической обратной связи (см. п. 1.3). В данной ситуации следует акцентировать внимание на вмешательстве интеллектуальных агентов в работу собственных систем управления человека. На

рис. 2 представлена идея гибридной системы управления с выделением нескольких векторов воздействия АИИ. В качестве основного цикла управления рассматривается измерение состояния системы со стороны АЕИ (блок измерения И1), определяющее внутренний канал обратной связи (ОС1). АИИ в этом случае, работая «вовне» этого цикла, тем не менее, имеет несколько возможностей управления системой с использованием собственного канала наблюдений (И2). Во-первых, в ряде случаев АИИ имеет возможность осуществлять совместное управление системой (канал К1). Примером таких решений могут служить системы автоматизированного управления техническими объектами (автопилоты, системы коррекции управления и пр.). Во-вторых, АИИ может воздействовать на канал обратной связи человека (ОС1), дополняя или модифицируя его (канал К2). Характерным примером могут служить системы дополненной реальности, модифицирующие визуальную информацию, доступную человеку. Наконец, АИИ может формировать собственный канал (К3) обратной связи (ОС2), предоставляя принципиально другую дополнительную информацию.

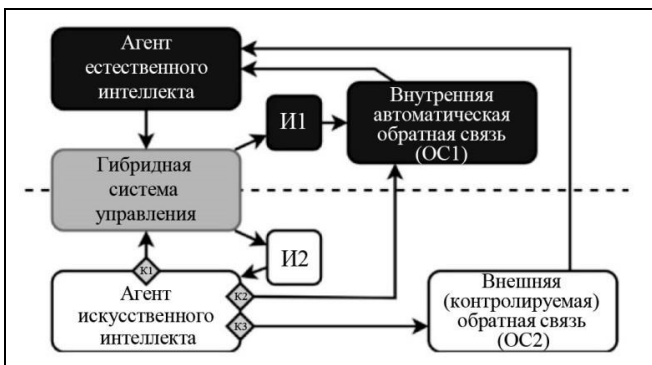


Рис. 2. Варианты каналов обратной связи в гибридной системе, включающей более одного агента

Примерами ситуации, когда канал К3 приобретает особую значимость, может служить система, в которой доступ по каналам К1 и К2 ограничен. Такое ограничение может возникать в силу принципиального отсутствия доступа к каналам (например, при анализе системы управления на базе физиологической обратной связи – при регуляции на основе вестибулярного аппарата, различных параметров самочувствия и пр.) или внешнего ограничения (например, запрет на прямое вмешательство в силу норм этики, безопасности, индивидуальных предпочтений). В данной работе работа с каналом К3 является ключевой возможностью для вмешательства в процессы управления АЕИ.

Следует отметить, что в общем случае в состав системы человек – машина могут входить множе-

ство агентов каждой из категорий (АЕИ и АИИ). При этом искусственный характер АИИ позволяет реализовать дополнительные механизмы управляемой обратной связи посредством рассматриваемых каналов обратной связи. Оптимизация структуры и параметров обратной связи может выполняться исходя из коллективной эффективности таких многоагентных систем и их эмерджентных свойств [23]. При этом итеративное изменение систем порождает возможность адаптации микропараметров АИИ с целью улучшения эффективности на системном (макро-) уровне, а не в рамках локального взаимодействия пары агентов.

Сценарий, рассматриваемый во взятом за базовое наблюдении [6], ставит испытуемому задачу поддержания стабильной вертикальной позы с дополненным (искусственным) компонентом обратной связи. При этом ОС1 осуществляется с помощью сенсорной информации от проприоцепторов и вестибуляров, а ОС2 – через визуальную информацию. Возникает принципиальный вопрос: каким образом определить оптимальную структуру ОС2, учитывая, что как измерения И1, так и измерения И2 могут иметь заметную долю ошибки? Соответственно, авторами предпринята попытка оценки эффективности этого канала обратной связи посредством анализа экспериментальных наблюдений и путем постановки схожего эксперимента в рамках обучения с подкреплением. При этом предполагалось, что измерения представляют собой наблюдения агента  $O_1 = S + \varepsilon_1$  и  $O_2 = S + \varepsilon_2$  за состоянием системы  $S$  через каналы ОС1 и ОС2 с некоторыми ошибками  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  соответственно. Агент может осуществлять выбор действий исходя как только из ОС1 ( $O_1 \rightarrow A$ ), так и из комбинации наблюдений ( $O_1 \times O_2 \rightarrow A$ ). Здесь  $A$  – пространство действий (action) агента.

Для разработки синтетического примера обучения с подкреплением была использована классическая задача CartPole («шест на тележке») [24], которая заключается в управлении подвижной тележкой, балансирующей вертикально установленным шестом. Задача была выбрана по двум причинам. Во-первых, она является одним из эталонных примеров задач обучения с подкреплением и оптимального управления и в этой связи широко изучена и с точки зрения моделирования системы, и с точки зрения построения физических систем (роботов). Во-вторых, данная задача как задача сохранения баланса представляется достаточно близкой к задаче поддержания баланса человека [6], рассматриваемой авторами как пример целевой задачи управления обратной связью. Состояние системы  $S$  описывается четверкой  $s = (x, v_x, \theta, v_\theta)$ ,



где  $x$  – горизонтальная координата тележки;  $v_x$  – горизонтальный компонент скорости тележки;  $\theta$  – угол отклонения шеста от вертикального положения;  $v_\theta$  – угловая скорость изменения отклонения шеста от вертикального положения. Пространство действий состоит из двух действий  $\mathcal{A} = \{0, 1\}$ , определяющих приложение силы (толчки) тележки влево и вправо соответственно. В рамках рассматриваемого примера наблюдение по каналу ОС1 строилось как зашумленная версия состояния системы  $o_1 = s + \mathcal{N}(0, \sigma_1)$ . Для искусственного компонента обратной связи ОС2 был выбран показатель отклонения шеста  $\theta$ :  $o_2 = (\theta + \mathcal{N}(0, \sigma_2))a$  с возможностью усиления обратной связи в  $a$  раз. Здесь к наблюдаемому состоянию добавляется нормально распределенный шум  $\mathcal{N}$  с нулевым математическим ожиданием и стандартными отклонениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно.

В качестве простейшего агента обучения с подкреплением была реализована двухслойная полносвязная нейронная сеть. Входной слой сети принимает конкатенированные наблюдения  $o_1 \oplus o_2$  (размерность 5). Внутренний слой – 128 нейронов, активация ReLU. Выходной слой классификатора действий (размерность 2 в соответствии с размерностью пространства  $\mathcal{A}$ , активация SoftMax). Сеть была обучена на синтетических данных с вариацией показателей зашумления каналов ОС1 и ОС2 ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ). Обучение с подкреплением осуществлялось с использованием библиотеки Gymnasium<sup>1</sup>, реализующей логику эксперимента CartPole в одноименной среде. Для обучения использовался оптимизатор Adam из библиотеки Keras<sup>2</sup> (темпа обучения (*learning\_rate*) – 0,01, функция потерь – категориальная кросс-энтропия). Обучение проходило в рамках 300 эпох, каждая из которых представляла собой эксперимент с заданными параметрами  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Для обучения был реализован метод Policy Gradient с коэффициентом скорости градиентного спуска  $\alpha = 10^{-4}$  и коэффициентом дисконтирования вознаграждения  $\gamma = 10^{-4}$ . В качестве оценки эффективности решения задачи управления использовалось суммарное (недисконтированное) вознаграждение. Для контроля эксперимента были выбраны значения из множества  $\{0, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}\}$ . При этом логике эталонного эксперимента соответствовали ситуации когда

$\sigma_1 > \sigma_2$ . Для имитации опциональности канала ОС2 при обучении агента использовались сценарии с присутствием и отсутствием компонента обратной связи  $o_2$  (в рамках эпох с четным номером принималось  $a = 0$ ).

Обученная модель использовалась в оценочном эксперименте с проверкой эффективности работы агента в условиях зашумленной среды с различным усилением обратной связи  $a$ . Для проверки проводился аналогичный запуск обученных моделей в среде CartPole с варьированием:

- коэффициентов зашумленности обратной связи  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  (различные варианты из множества, на которых проводилось обучение),
- коэффициента усиления  $a$  (варьировался в диапазоне  $[0; 300]$  с шагом 20).

Для устойчивости каждый оценочный эксперимент повторялся пять раз с усреднением результатов. В итоге в рамках эксперимента авторы смогли оценить влияние на качество управления как зашумленности канала обратной связи (совпадающего или отличающегося от зашумленности в ходе обучения), так и коэффициента усиления.

С точки зрения интерпретации эксперимента можно трактовать процесс оценки как помещение агента в искусственно сформированные условия дополненной обратной связи, отличающиеся от тех, к которым он привык (обучился). Например, в рамках описываемого эксперимента с задачей поддержания стабильности позы формируется дополнительный компонент визуальной обратной связи на основе смещения центра давления на опору в дополнение к полному (базовому) наблюдению в форме сенсорного компонента, включающего как данный компонент, так и многие другие. Такая аналогия хоть и не является полным воспроизведением сценария сохранения равновесия, позволяет сопоставить изменение эффективности управления в связи с изменением значений характеристиками дополнительного компонента обратной связи. Далее будут рассмотрены результаты проведенной оценки в сопоставлении с эталонным экспериментом.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ

#### 3.1. Структурирование оценок эталонного эксперимента

Эталонный эксперимент, сосредоточенный на оценке эффективности визуальной обратной связи, показывает [6], что значительное усиление обратной связи негативно сказывается на эффективно-

<sup>1</sup> Gymnasium Documentation. – URL: <https://gymnasium.farama.org/> (дата обращения 01.10.2024).

<sup>2</sup> Keras. – URL: <https://keras.io/> (дата обращения 01.10.2024).

сти управления (в данном случае – задачи удержания стабильной вертикальной позы человека). При увеличении чувствительности («масштаба», «глубины») обратной связи примерно на 20 % и выше происходит перерегулирование, что приблизительно соответствует свойствам переходных процессов в линейных системах автоматического управления. При этом само наличие обратной связи (по сравнению с удержанием равновесия только по внутренней оценке с помощью естественных сенсоров) вне перерегулирования влияет на эффективность управления чаще положительно. Также следует отметить, что для разных людей эффекты проявлялись по-разному. Вероятно, это можно объяснить индивидуальными особенностями – тем, что для уменьшения перерегулирования требуется снизить скорость достижения системой нового состояния, приводя к увеличению времени регулирования – снижению значений характеристик управления позой в заданный период.

В рамках более детального анализа было отмечено, что снижение эффективности управления отличается по интенсивности снижения и моменту наступления этого снижения (см. рис. 3, *а*, представлено качество управления в условных баллах в зависимости от усиления искусственного визуального компонента обратной связи для 25 испытуемых). В рамках исследования была проведена параметризация кривых снижения логистической кривой  $Y(x) = L / (1 + e^{-k(X_0 - x)})$ . Было отмечено (рис. 3, *б*), что «плавность» (соответствует параметру степени  $k$ ) и «запаздывание» (соответствует параметру  $X_0$ , интерпретируемому как половин-

ное снижение эффективности управления) в целом имеют обратно пропорциональную зависимость. Параметр масштаба  $L$  в данном эксперименте был равным 107, что соответствует максимальному наблюдаемому в наборе данных качеству управления (по измерениям в соответствии с оригинальной методикой [6]).

### 3.2. Реализация агентов искусственного интеллекта

При исследовании поведения агентов обучения с подкреплением в задаче CartPole выделяется явная деградация вознаграждения при масштабировании обратной связи. На рис. 4 показано снижение кумулятивного вознаграждения в зависимости от коэффициента усиления  $a$  для различных значений параметра  $\sigma_2$  при  $\sigma_1 = 10^{-3}$  (рис. 4, *а*) и для различных значений  $\sigma_1$  при  $\sigma_2 = 10^{-3}$  (рис. 4, *б*). Интерпретируя полученные данные, стоит отметить следующее. При вариации зашумленности искусственной обратной связи ОС2 (см. рис. 4, *а*) более ранним снижением кумулятивного вознаграждения характеризуются модели с  $\sigma_2 = 0$  (т. е. ожидающие точного значения ОС2 без шума) и с  $\sigma_2 = 10^{-3}$  (т. е.  $\sigma_2 = \sigma_1$ , предположительно в силу несогласованности неусиленного и усиленного сигналов в ОС1 и ОС2 соответственно). При вариации зашумленностью базовой обратной связи ОС1 (см. рис. 4, *б*), напротив, эти опции характеризуются наиболее поздним снижением эффективности ввиду возможности наилучшего восстановления состояния системы.

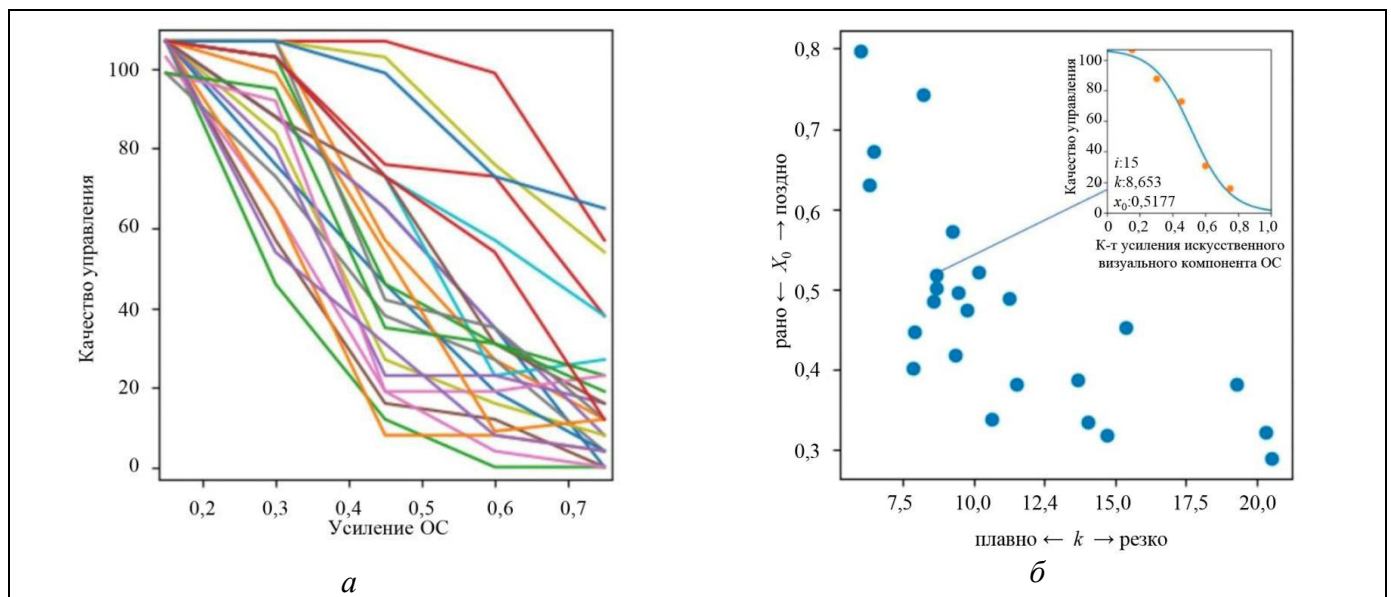


Рис. 3. Регулирование и перерегулирование в оценках влияния обратной связи испытуемых в экспериментальных условиях: *а* – снижение качества управления для различных испытуемых, *б* – результаты параметризации кривых снижения качества управления для различных испытуемых



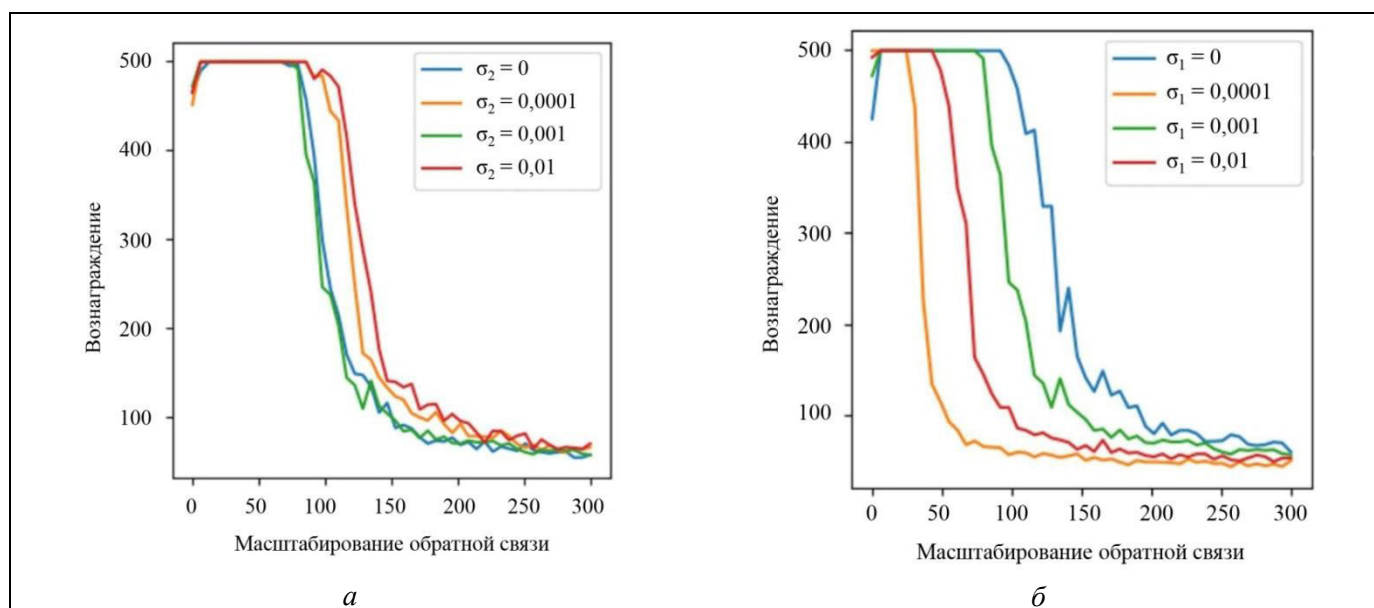


Рис. 4. Оценка влияния обратной связи в обучении с подкреплением: *a* – при вариации зашумления искусственной обратной связи ОС2, *б* – при вариации зашумленностью базовой обратной связи ОС1

В то же время интересным представляется наблюдаемое соотношение зашумленности сигналов ОС1 и ОС2 в части их связи с эффективным влиянием масштабирования обратной связи. На рис. 5 показано изменение величины масштабирования ОС2, обеспечивающей двукратное снижение эффективности управления (кумулятивного вознаграждения) в зависимости от зашумленности сигналов ОС1 и ОС2. Предположительно, в поведении рассматриваемой системы можно наблюдать определенные «фазовые переходы» с точки зрения эффективности управления в различных состояниях.

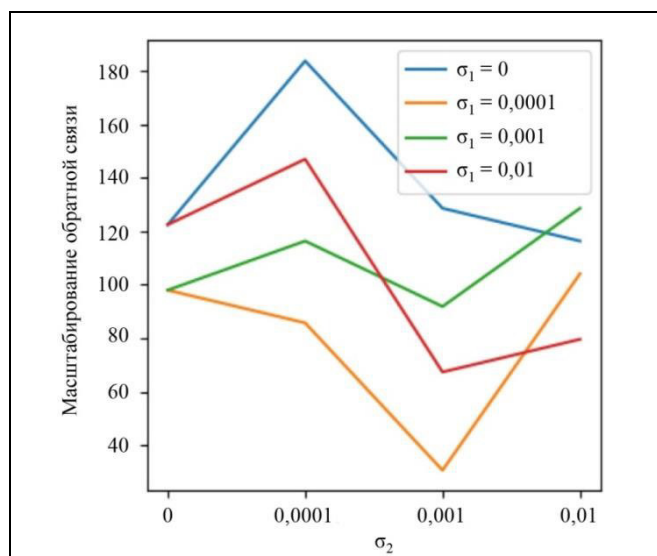


Рис. 5. Масштабирование обратной связи с двукратным снижением вознаграждения

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Яркий пример, связанный с мультисенсорной интеграцией для самоощущения человеком своего тела или его части – эксперименты с «резиновой рукой», когда испытуемый в условиях иллюзии, которую, по мнению авторов, также можно сопоставить с представлениями о «сенсорных перепадах», воспринимает муляж как свою собственную руку [25]. При этом вероятность возникновения иллюзии резиновой руки, как полагают, увеличивается с проприоцептивным шумом (сигналом от мышц, связок и т. д.) и хорошо соответствует байесовской модели причинно-следственной связи. Этот шум можно описать изменением априорной вероятности активности центральной части зрительного и проприоцептивного анализатора [26]. Иными словами, в определенных условиях анализ мозгом получаемой информации учитывает как «свою» некоторую дополнительную информацию, которая может только выдаваться за «свою» (в случае иллюзии) или пониматься как «внешняя», но преодолевающая условную границу «своего» (в случае предлагаемой парадигмы с искусственным сенсорным компонентом). Следует учитывать, что повышение доли неопределенности (дефицита подходящей сигнализации) сенсорного обеспечения «переключает» анализ на использование дополнительной информации. Это позволяет организовать эксперименты не только по типу «иллюзии резиновой руки», но и иные, где присутствуют искусственные компоненты сенсорного обеспечения той или иной активности, и расширить представ-

ления о границах, взаимодействии «живого» и «неживого» в системах человек – машина, адаптивности мозга человека.

Анализ индивидуальных особенностей управления позой по принятым за эталонные данным [6] демонстрирует поведение системы типа человек – машина (одного из вариантов), подобное линейным системам автоматического управления. В частности, наблюдается перерегулирование, изменение быстродействия системы. При этом обнаружены схожие эффекты как в численных «искусственных» экспериментах, так и в наблюдениях с участием человека. Авторы полагают, что это указывает на концептуальное сходство наблюдаемых эффектов. Важным аспектом работы представляется возможность количественной оценки характеристик искусственных компонентов, что в перспективе может не только дать более точное описание состояний системы человек – машина, но главного ее звена – человека. Вторым важным выводом полагается возможность включения агентов искусственного интеллекта в систему управления систем человек – машина по типу представленного на рис. 3 с возможностью оптимизации функциональной структуры и параметров рассматриваемых каналов обратной связи для повышения эффективности работы многоагентной (в общем случае) системы на макроуровне. В ближайшей перспективе это, в частности, может иметь важное значение, например, в медицинской реабилитации путем «замены» или «поддержки» дефицитных функций пациента с помощью внедрения адаптивных элементов комбинированной обратной связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Su, H., Qi, W., Chen, J., et al.* Recent Advancements in Multimodal Human–Robot Interaction // *Frontiers in Neurorobotics*. – 2023. – Vol. 17. – Art. no. 1084000.
2. *Belhassen, K., Fernandez Castro, V., Mayima, A., et al.* Addressing Joint Action Challenges in HRI: Insights from Psychology and Philosophy // *Acta Psychologica*. – 2022. – Vol. 222, no. 1. – Art. no. 103476.
3. *Leichtmann, B., Nitsch, V., Mara, M.* Crisis Ahead? Why Human–Robot Interaction User Studies May Have Replicability Problems and Directions for Improvement // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2022. – Vol. 11, no. 9. – Art. no. 838116.
4. *Al-Hamadani, M., Fadhel, M.A., Alzubaidi, L., Harabgi, B.* Reinforcement Learning Algorithms and Applications in Healthcare and Robotics: A Comprehensive and Systematic Review // *Sensors*. – 2024. – No. Vol. 24, no. 8. – Art. no. 2461.
5. *Knudsen, J.E., Ghaffar, U., Ma, R., Hung, A.J.* Clinical Applications of Artificial Intelligence in Robotic Surgery // *Journal of Robotic Surgery*. – 2024. – Vol. 18, no. 1. – Art. no. 102.
6. *Кубряк О.В., Панова Е.Н., Крикленко Е.А.* Влияние глубины биологической обратной связи на результат выполнения инструкции здоровыми добровольцами // *Человек. Спорт. Медицина*. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 19–26. [*Kubryak, O.V., Panova, E.N., Kriklenko, E.A.* Vliyanie glubiny biologicheskoy obratnoy svyazi na rezul'tat vypolneniya instrukcii zdorovymi dobrovol'tcami // *Chelovek. Sport. Medicina*. – 2018. – Vol. 18, no. 5. – P. 19–26. (In Russian)]
7. *Foundations and Fundamentals in Human–Computer Interaction* / Ed. by C. Stephanidis, G. Salvendy. – Boca Raton: CRC Press, 2024. – 474 p.
8. *Соколов В.В.* Философия Рене Декарта Москва: Госполитиздат, 1950. – С. 5–76. [*Sokolov, V.V.* *Filosofiya Rene Dekarta* Moskva: Gospolitizdat, 1950. – S. 5–76. (In Russian)]
9. *Tustin, A.* The Nature of the Operator's Response in Manual Control, and Its Implications for Controller Design // *Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part IIA: Automatic Regulators and Servo Mechanisms*. – 1947. – Vol. 94, no. 2. – P. 190–206.
10. *Анохин П.К.* Биология и нейрофизиология условного рефлекса. – М.: Медицина, 1968. – 547 с. [*Anohin, P.K.* *Biologiya i nejrofiziologiya uslovnogo refleksa*. – М.: Medicina, 1968. – 547 s. (In Russian)]
11. *Anticipation: Learning from the Past: The Russian/Soviet Contributions to the Science of Anticipation* / Ed. by M. Nadin. – Cham: Springer International Publishing, 2015.
12. *Новиков Д.А.* Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – Москва: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с. [*Novikov, D.A.* *Kibernetika: Navigator. Istoriya kibernetiki, sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya*. – Moskva: LENAND, 2016. – 160 s. (In Russian)]
13. *Бернштейн Н.А.* Новые линии развития в физиологии и их соотношение с кибернетикой. – Москва: Ин-т философии АН СССР, 1962. – 45 с. [*Bernshtejn, N.A.* *Novye linii razvitiya v fiziologii i ih sootnoshenie s kibernetikoj*. – Moskva: In-t filosofii AN SSSR, 1962. – 45 s. (In Russian)]
14. *Gunes, H., Broz, F., Crawford, C., et al.* Reproducibility in Human–Robot Interaction: Furthering the Science of HRI // *Current Robotics Reports*. – 2022. – Vol. 3, no. 3. – P. 281–292.
15. *Scibilia, A., Pedrocchi, N., Fortuna, L.* Human Control Model Estimation in Physical Human–Machine Interaction: A Survey // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 5. – Art. no. 1732.
16. *Kubryak, O.V., Kovalchuk, S.V., Bagdasaryan, N.G.* Assessment of Cognitive Behavioral Characteristics in Intelligent Systems with Predictive Ability and Computing Power // *Philosophies*. – 2023. – Vol. 8, no. 5. – Art. no. 75.
17. *Ivanenko, Y., Gurfinkel, V.S.* Human Postural Control // *Frontiers in Neuroscience*. – 2018. – Vol. 20, no. 12. – Art. no. 171.
18. *Левик Ю.С.* Исследования в космосе и новые концепции в физиологии движений // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2020. – № 6 (54). – С. 80–91. [*Levik, Yu.S.* *Issledovaniya v kosmose i novye koncepcii v fiziologii dvizhenij* // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina*. – 2020. – No. 6 (54). – P. 80–91. (In Russian)]
19. *Missen, K. J., Carpenter, M.G., Asl ander, L.* Velocity Dependence of Sensory Reweighting in Human Balance Control // *Journal of Neurophysiology*. – 2024. – Vol. 232, no. 2. – P. 454–460.
20. *Karmali, F., Goodworth, A.D., Valko, Y., et al.* The Role of Vestibular Cues in Postural Sway // *Journal of Neurophysiology*. – 2021. – Vol. 125, no. 2. – P. 672–686.
21. *Asl ander, L., Peterka, R.J.* Sensory Reweighting Dynamics Following Removal and Addition of Visual and Oroprioceptive Cues // *Journal of Neurophysiology*. – 2016. – Vol. 116, no. 2. – P. 272–285.



22. Zheng, N., Lui, Z., Ren, P., et al. Hybrid-augmented Intelligence: Collaboration and Cognition // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. – 2017. – Vol. 18, no. 2. – P. 153–179.
23. Guleva, V., Shikov, E., Bochenina, K., et al. Emerging Complexity in Distributed Intelligent Systems // *Entropy*. – 2020. – Vol. 22, no. 12. – Art. no. 1437.
24. Barto, A.G., Sutton, R.S., Anderson, C.W. Neuronlike Adaptive Elements That Can Solve Difficult Learning Control Problems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1983. – Vol. SMC-13, no. 5. – P. 834–846.
25. Botvinick, M., Cohen, J. Rubber Hands ‘Feel’ Touch That Eyes See // *Nature*. – 1998. – Vol. 391, p. 756.
26. Chancel, M., Ehrsson, H.H. Proprioceptive Uncertainty Promotes the Rubber Hand Illusion // *Cortex*. – 2023. – Vol. 165. – P. 70–85.

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
О.П. Кузнецовым.

Поступила в редакцию 11.10.2024,  
после доработки 23.12.2024.  
Принята к публикации 26.12.2024.

**Кубряк Олег Витальевич** – д-р биол. наук, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия  
✉ kubriakov@mpei.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7296-5280>

**Ковальчук Сергей Валерьевич** – канд. техн. наук, Университет ИТМО, Санкт-Петербург,  
✉ kovalchuk@itmo.ru  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8828-4615>

© 2024 г. Кубряк О. В., Ковальчук С. В.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## AN ARTIFICIAL SENSORY COMPONENT IN A MAN-MACHINE SYSTEM WITH COMBINED FEEDBACK

O. V. Kubryak\* and S. V. Kovalchuk\*\*

\*National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow Russia

\*\*ITMO University, Saint Petersburg, Russia

\*✉ kubriakov@mpei.ru, \*\*✉ kovalchuk@itmo.ru

**Abstract.** This paper proposes a conceptual approach to constructing combined feedback in a human–machine interaction system through introducing an artificial sensory feedback component controlled by a technical subsystem. The approach is intended to systematize the role of combined feedback in the control of multi-agent systems with additional elements, humans, and artificial agents. This approach is studied for human vertical posture control and in synthetic experiments (within the CartPole model) considered using reinforcement learning as an example. The efficiency of the control problem solution is investigated by varying the characteristics of information transmission channels and the properties of the artificial sensory feedback component. According to the results, natural experiment observations are conceptually similar to those of the artificial numerical experiment in terms of additional feedback channel operation: there are a similar overshoot effect and prospects for improving control performance by tuning the artificial sensory component.

**Keywords:** human–machine interaction, optimal control, feedback, reinforcement learning, multi-agent systems.

**Acknowledgments.** This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 24-11-00272.