

# СТРАТЕГИЧЕСКОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТОМ

**Цыганов В.В.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
bbc@ipu.ru*

*Аннотация. Разработан модульный подход к стратегическому адаптивному управлению транспортным комплексом на основе фактических и целевых значений ключевых показателей его эффективности. Механизмы функционирования используемых модулей основаны на процедурах цифрового обучения. Развитый подход проиллюстрирован на примере оптимального синтеза механизма функционирования модуля «Новичок».*

*Ключевые слова: транспорт, стратегия, управление, адаптация, моделирование, показатель эффективности.*

## **Введение**

Общие направления развития российского транспорта определены Транспортной стратегией Российской Федерации (РФ) до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (ТСР) [1]. В условиях геополитического и санкционного давления на Россию, Правительство РФ мобилизует ресурсы для целевого развития транспортного комплекса РФ (ТК). В настоящее время, в рамках ТСР, формируется единый национальный проект «Транспорт», который станет преемником заканчивающихся в 2024 г. национального проекта «Безопасные качественные дороги», Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры и др. Тем самым, Правительство РФ сочетает стратегическое управление ТК на основе ТСР с адаптивным управлением ТК, учитывающим происходящие изменения. По сути, Правительство РФ осуществляет стратегическое адаптивное управление транспортом (САУТ).

С другой стороны, ТСР предусматривает создание цифровой системы мониторинга и управления развитием ТК. В соответствии с ТСР и стратегическим направлением цифровой трансформации ТК [2], Министерство транспорта РФ формирует, в структуре национального проекта «Транспорт», Федеральный проект цифрового развития ТК. В рамках последнего, должна быть проведена цифровизация инструментов САУТ. В связи с этим, возникает потребность в научном обосновании формальных методов САУТ. Вышесказанное обуславливает актуальность исследований и разработок теоретических и методологических основ САУТ, проводимых в настоящей работе.

## **1. Стратегические документы и ключевые показатели эффективности транспорта**

В ТСР определены миссия, приоритеты, цели и задачи развития ТК до 2030 г. и на прогнозный период до 2035 г. Главная цель ТСР — удовлетворение спроса общества и экономики на конкурентоспособные и качественные транспортные услуги. Другие стратегические документы, касающиеся ТК — государственные программы, национальные, федеральные, ведомственные и региональные проекты — ориентированы на достижение целей и решение задач ТСР.

Формально, состояние ТК характеризуют ключевые показатели эффективности транспорта (кратко – показатели, или КПЭТ) [1,2]. Упомянутые стратегические документы ТК ориентированы на достижение целевых значений этих показателей (кратко – планов).

### **1.1. Выполнение планов и годовое планирование транспортного комплекса**

Основной инструмент достижения целей ТСР до конца 2024 г. — государственная программа «Развитие транспортной системы» [3] - предусматривает достижение таких целевых значений КПЭТ, как:

- повышение до 50,9% доли автодорог регионального и межмуниципального значения, соответствующих нормативным требованиям (КПЭТ 1);
- повышение до 85% доли дорог крупнейших городских агломераций, соответствующих нормативным требованиям (КПЭТ 2).

Соответственно, ежегодно проводится анализ выполнения планов по этим показателям, и формируются планы на следующий год [4]. Например, в 2023 г. перевыполнены планы по КПЭТ 1 и КПЭТ 2: почти 53% региональных дорог и более 83 % дорожной сети агломераций приведены в нормативное состояние. Построено и отремонтировано более 31 тыс. км автодорог. План на 2024 г. по КПЭТ 1 – 54%, по КПЭТ 2 – 85%. Планируется отремонтировать 23 тыс. километров дорог.

Провозная способность БАМ и Транссиба в 2023 г. достигла 173 млн тонн. В 2024 г. планируется достичь 180 млн тонн, в 2030 г. - 210 млн тонн, в 2032 г. - 255 млн тонн.

Гражданская авиация в 2023 г. перевезла 105 млн пассажиров (при плане 103 млн). Это на 10% больше, чем в 2022 г. (95 млн). Железными дорогами перевезено 1,2 млрд пассажиров (на 5,7% больше, чем в 2022 г.).

Внутренний водный транспорт в 2023 г. перевез 109 млн тонн грузов - на 5,9% меньше, чем в 2022 г. Снижение связано с санкциями, ограничивающими реализацию лесных материалов и их производных на внешних рынках. Перевезено 11 млн пассажиров - на 16% больше, чем в 2022 г. (9,5 млн).

Морской транспорт перевез 2,7 млн пассажиров - на 20 % меньше, чем в 2022 г. Это связано с закрытием для гражданского судоходства некоторых районов Азовского и Черного морей. Мощность морских портов в 2023 г. составила 1 360 млн тонн - на 6 % выше уровня 2022 года (1 283 млн тонн).

Наземный городской транспорт перевез 11 млрд пассажиров - на 5,2% больше, чем в 2022 г. В том числе, электрический транспорт перевез около 2 млрд пассажиров (на 3% больше, чем в 2022 г.), а автомобильный – 9 млрд пассажиров (на 5,7% больше, чем в 2022 г.).

## 1.2. Стратегическое адаптивное планирование транспортного комплекса

Основной инструмент достижения целей ТСР, начиная с 2025 г. - национальный проект «Транспорт». Основная его цель - создание единой опорной транспортной сети РФ. При этом САУТ включает использование таких КПЭТ, как показатели общественно значимого результата (ОЗР) и показатели стратегических направлений в области цифровой трансформации транспорта (СНЦТ).

Например, ТСР предусматривает создание цифровой системы мониторинга и управления развитием транспортно-логистической инфраструктуры. Министерство транспорта РФ разрабатывает, в рамках Федерального проекта цифрового развития ТК, национальную цифровую транспортно-логистическую платформу [5]. Используемые в ней КПЭТ характеризуют надежность, эффективность, скорость и безопасность грузовых перевозок, а также конкурентоспособность российских предприятий на мировом рынке транспортно-логистических услуг. К КПЭТ относится, например, показатель ОЗР «Повышение производительности труда в транспортно-логистической отрасли, %». Этот показатель связан с такими показателями СНЦТ, как «Увеличение грузооборота», «Увеличение средней скорости логистики на региональной маршрутной сети», «Сокращение логистических и административных издержек перевозчиков за счёт повышения эффективности логистики», «Обеспечение перехода на электронный документооборот».

САУТ предусматривает также создание ГИС «Российский транспорт», расширяющей возможности государственного контроля отрасли и формирования объективных рейтингов регионов по качеству транспортного обслуживания. КПЭТ этой ГИС характеризуют качество собираемых государством данных, включая актуальные первичные данные о работе ТК. К ним относятся, например, показатель ОЗР «Доля государственного заказа на производство транспортных средств наземного городского пассажирского транспорта, осуществляемого с использованием данных ГИС «Российский транспорт», в % от общего объема государственного заказа транспортных средств». Этот показатель связан с такими показателями СНЦТ, как «Подключение региональных центров управления» и «Доля российской электронной продукции, используемой при реализации проектов цифровой трансформации отрасли, в общем объеме электронной продукции, используемой при реализации таких проектов».

Заметим, что начатая в 2023 г. реформа государственного управления ориентирована на принятие решений на основе достоверных данных от первоисточников [6]. В новой модели госуправления предполагается больше использовать первичные (а не обработанные) данные, исключив тем самым промежуточные (передаточные) звенья и связанные с ними нежелательные активности, а также другие помехи. По сути, речь идет о формировании прямой - двухуровневой системы госуправления, основанной на экономике данных [6].

Таким образом, в рамках новой модели госуправления, концепция цифрового САУТ предполагает планирование КПЭТ, количественную оценку выполнения каждого плана и стимулирование ответственных исполнителей на основе отклонений фактических значений КПЭТ от плановых.

Ввиду значительного числа документов, регламентирующих развитие транспорта в РФ и САУТ, большого числа КПЭТ в этих документах, а также множества факторов, влияющих на планирование этих КПЭТ, для реализации этой концепции на практике необходимо использовать эффективные методы *анализа* больших данных (такие, как машинное обучение и другие цифровые инструменты искусственного интеллекта). Но, главное - нужны научно обоснованные методы *синтеза* управлений и алгоритмов принятия решений при САУТ.

## 2. Основы стратегического адаптивного управления транспортом

### 2.1. Принципы и теоретические основы САУТ

Рассмотрим теоретические основы построения САУТ на базе совокупности принципов Прогрессивности, Организованности, Комплексности, Согласованности, Интеллектуальности, Мобилизованности, Адаптивности (кратко - ПРОКСИМА). Прогрессивность САУТ предполагает раскрытие потенциала лиц, принимающих решения при САУТ (ЛПР).

Организованность САУТ предполагает формирование организационной системы САУТ, обеспечивающей реализацию положений стратегических документов РФ. Эта система включает организационную структуру и механизмы её функционирования, которые должны обеспечить достижение целей САУТ с помощью ЛПР. Эти механизмы должны включать процедуры, алгоритмы и программы, позволяющие эффективно формировать целевые значения и планировать КПЭТ, соответствующие стратегическим приоритетам ТК, а также выявлять и устранять отклонения КПЭТ от этих целевых значений и планов.

Комплексность САУТ предполагает всесторонний комплексный учет внешних факторов и воздействий при управлении ТК. Согласованность САУТ предполагает согласование интересов ЛПР. Интеллектуальность САУТ предполагает использование ЛПР технологий искусственного интеллекта (ИИ), в том числе цифрового обучения и адаптации.

Мобилизованность САУТ предполагает использование САУТ для мобилизации ресурсов ТК. Адаптивность САУТ предполагает использование ЛПР потенциала изменений при управлении ТК.

Первые результаты разработки систем управления большими иерархическими организациями в условиях динамики, неопределенности, и с учетом человеческого фактора, основанные на ПРОКСИМА, были опубликованы в [7]. Теория, методология и методы построения адаптивных механизмов отраслевого управления в условиях динамики и неопределенности, основанные на ПРОКСИМА, разработаны в [8]. На базе этих механизмов, были разработаны теория, методология и методы управления эволюцией больших социально-экономических систем в условиях изменений [9].

Фундаментальные результаты, полученные в монографиях [7-9], легли в основу теории больших транспортных систем (БТС) [10]. Подход и метод теории БТС можно кратко сформулировать, перефразируя приведенные в [9] слова царя Соломона из Экклезиаста: «Управление БТС должно быть таким, чтобы те, кто владеет капиталом и обладает властью в БТС, делали то, что необходимо для БТС в целом».

### 2.2. Модули и механизмы функционирования САУТ

Рассмотрим подход теории БТС к САУТ. Императивом новой модели госуправления [6], основанной на экономике данных, является создание двухуровневых систем организационного управления (см. п.1.2). Соответственно, в основе САУТ должна лежать двухуровневая организационная система «Центр – Дальновидный исполнитель».

Рассмотрим модель этой системы, представленную на рис. 1. Роль Центра в ней играет полномочный орган управления (руководитель) субъекта САУТ, а роль Дальновидного исполнителя (ДИ) – орган управления (руководитель) объекта САУТ, реализующего планы и обеспечивающего достижение целевых значений КПЭТ. Руководитель объекта САУТ персонально ответственен за достижение плановых значений показателя стратегического документа (т.е. выполнение стратегического плана) развития транспорта, и обладает соответствующим капиталом и властью.

Выход объекта в периоде  $t$  характеризует показатель эффективности  $y_t$ , причем  $y_t \in [p_t, P_t]$ , где  $P_t$  – максимальный показатель выхода (потенциал) объекта,  $p_t$  – минимальный показатель выхода объекта (минимальные возможности),  $t=0,1,\dots$ . Величины  $p_t$  и  $P_t$  считаются случайными функциями внешнего воздействия на вход объекта (помехи), и поэтому неизвестны ни Центру, ни ДИ до периода  $t$ .

В начале периода  $t$  величины  $p_t$  и  $P_t$  становятся известны ДИ (оставаясь неизвестными Центру). Кроме того, в начале периода  $t$  Центр сообщает ДИ управляющие воздействия: план  $x_t$  и ресурсы  $r_t$  (например, финансовые средства). После этого ДИ выбирает показатель  $y_t \in [p_t, P_t]$ . Центр наблюдает  $y_t$  и, сопоставляя его с планом  $x_t$ , определяет стимул ДИ  $s_t = S(x_t, y_t)$ .

Далее, Центр определяет прогноз  $f_{t+1}$  на период  $t+1$ :  $f_{t+1} = F(f_t, y_t)$ ,  $f_0 = f^0$ , где  $F$  - функция, монотонно возрастающая по своим аргументам (процедура прогнозирования). На основе прогноза  $f_{t+1}$ , Центр определяет ресурс  $r_{t+1}$  и план  $x_{t+1}$  на период  $t+1$ :  $r_{t+1} = R(f_{t+1})$ ,  $x_{t+1} = X(f_{t+1})$ , используя процедуры выделения ресурсов  $R$  и планирования  $X$ . На этом функционирование системы в периоде  $t$  завершается, наступает период  $t+1$  и т.д.

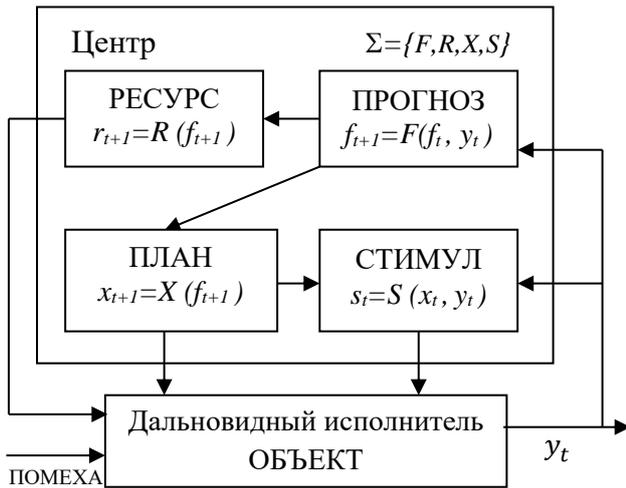


Рис. 1. Базовый модуль САУТ

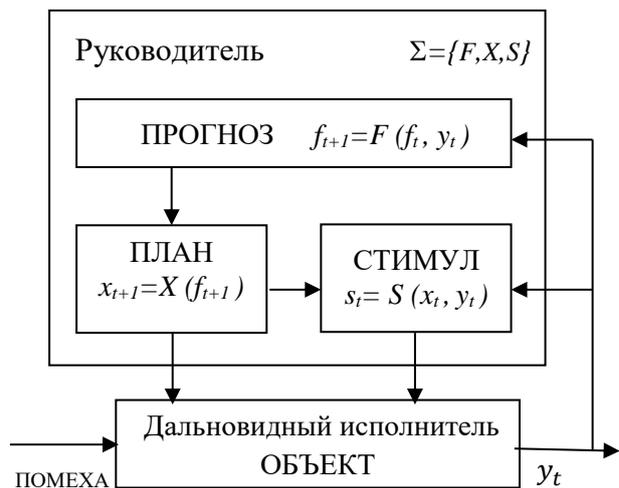


Рис. 2. Модуль «Руководитель»

Механизм функционирования базового модуля САУТ  $\Sigma = \{F, R, X, S\}$  в двухуровневой системе «Центр – ДИ» представляет собой совокупность процедур прогнозирования  $F$ , выделения ресурсов  $R$ , планирования  $X$  и стимулирования  $S$ . Заметим, что ДИ может проявить нежелательную для Центра активность, выбирая показатель  $y_t \in [p_t, P_t]$  так, чтобы обеспечить себе наибольшие стимулы сегодня и в перспективе. В связи с этим, возникает проблема оптимального синтеза механизма  $\Sigma = \{F, R, X, S\}$ , при котором ДИ выбирает показатель  $y_t \in [p_t, P_t]$  в интересах системы в целом (т.е. так, чтобы достигался максимум целевой функции Центра).

Путем упрощения базового модуля, можно построить производные модули, полезные при формировании более сложных многофункциональных систем САУТ. Например, модуль «Руководитель» - производный от базового модуля САУТ, в которой Центр уполномочен планировать задания и контролировать деятельность ДИ, но не обладает правом распоряжаться ресурсами. Поэтому процедура выделения ресурсов  $R$  у Руководителя отсутствует (рис.2).

Модуль «Специалист» получается из базового модуля САУТ, если Центр не наделен распорядительными функциями, так что у него отсутствуют процедуры выделения ресурсов  $R$  и планирования  $X$  (рис.3). Такой Специалист, обучаясь, накапливает знания о функционировании объекта и оценивает работу ДИ (рис.3).

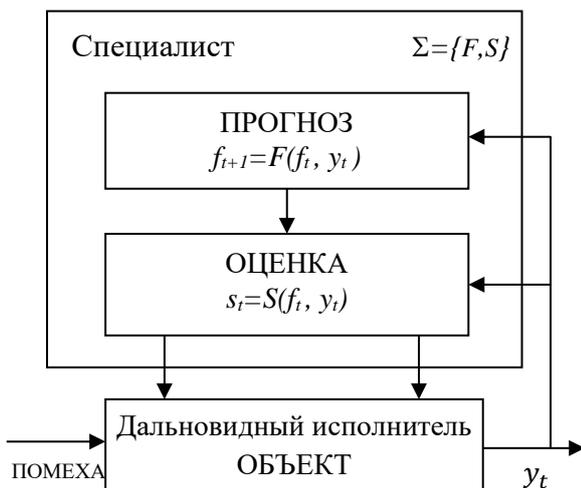


Рис. 3. Модуль «Специалист»

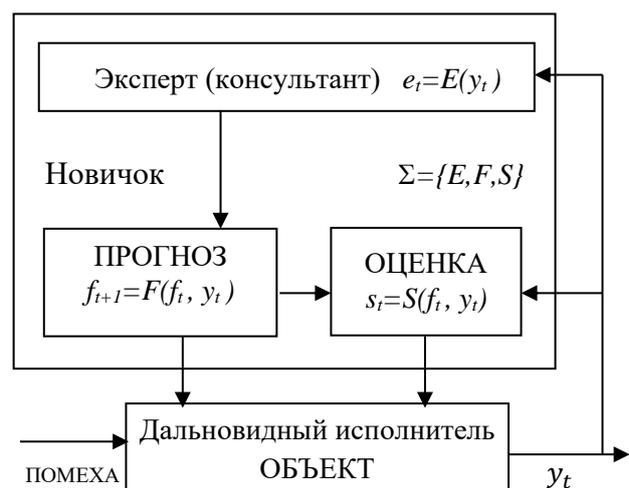


Рис. 4. Модуль «Новичок»

Модуль «Новичок» - производный от базового модуля САУТ, в котором у Центра отсутствуют не только распорядительные функции выделения ресурсов  $R$  и планирования  $X$ , но и прогнозирования ( $F$ ) выполняется не самостоятельно, а с помощью эксперта (консультанта). Рекомендации эксперта  $e_t = E(y_t)$  в периоде  $t$  формируются на основе наблюдения показателя  $y_t$ . Новичок, обучаясь, накапливает знания о функционировании объекта и оценивает работу ДИ (рис.4).

Теперь сложную многофункциональную организационную структуру САУТ можно представить в виде набора базовых и производных модулей, представленных на рис.1-4. Соответственно, подход к анализу и синтезу комплексных механизмов функционирования САУТ основан на исследовании механизмов  $\{F, R, X, S\}$ ,  $\{F, X, S\}$ ,  $\{F, S\}$ ,  $\{E, F, S\}$ , и разработке их комбинаций. Эта работа проводится в русле анализа и синтеза интеллектуальных механизмов функционирования (ИМФ), использующих процедуры цифровой адаптации и обучения.

В ИМФ САУТ информация об объекте, получаемая в процессе управления, используется для настройки процедур прогнозирования, распределения ресурсов, планирования и стимулирования ДИ, с целью достижения цели САУТ. Благодаря этому, ИМФ способен со временем улучшать свою работу. Необходимость в ИМФ возникает в случае, когда Центр должен работать в условиях неопределенности, а имеющаяся априорная информация настолько мала, что невозможно заранее спроектировать эффективный детерминированный механизм. Сбор, хранение и переработка информации об объекте в ИМФ необходима лишь в той минимальной степени, в которой информация требуется для достижения цели.

При построении ИМФ САУТ необходимо учитывать активность ДИ. Дело в том, что знание ИМФ САУТ позволяет ДИ предсказывать, в той или иной степени, будущие воздействия, в зависимости от выбора собственного состояния сегодня. Особенно важна степень использования Исполнителем потенциала объекта (производственного, финансового, коммерческого и др.) для достижения цели САУТ в целом. ИМФ, раскрывающий этот потенциал, называется прогрессивным. ИМФ должен обладать и другими свойствами, обеспечивающими эффективность его применения на практике, такими как оптимальность и устойчивость.

### 2.3. Методологические основы построения САУТ

Методологически, САУТ формируется на основе принципов и концепции ПРОКСИМА [7-9] и теории БТС [10], а также модулей и механизмов, описанных в п.2.2.

Например, в соответствии с принципом комплексности, следует исходить из научно обоснованных прогнозов обстановки в стране и мире в краткосрочной и среднесрочной перспективе. В свою очередь, чтобы сформировать такие прогнозы, нужно использовать научно обоснованные сценарии развития страны. Такие три сценария, связанные с нарастанием агрессивности Запада, мобилизацией и войной, были разработаны в конце 2010-х годов в Российской академии наук [11]. Дальнейшие события подтвердили правильность прогнозов, основанных на этих сценариях.

Сегодня российские власти и правящие элиты на практике реализуют сценарий мобилизации. Соответственно, требуется мобилизация внутренних резервов и ресурсов ТК. Признание этого факта уже выразилось, например, в том, что комплекс моделей стратегического управления транспортной инфраструктурой Сибири, Дальнего Востока и российской Арктики – решительного поворота на Восток в условиях нарастания агрессии Запада и мобилизации – был отмечен Премией Правительства РФ за 2022 год в области науки и техники [12].

Сегодня САУТ должно быть таким, чтобы исполнители задач, поставленных в стратегических документах, делали то, что необходимо для ТК в условиях мобилизации. Цели ТК указаны в стратегических документах. Соответственно, целями САУТ является достижение целей и целевых значений ключевых показателей эффективности ТК (кратко – планов), указанных в этих стратегических документах.

Функционирование САУТ призвана обеспечить организационная система управления ТК, состоящая из структуры управления ТК и механизмов её функционирования, включающих процедуры, алгоритмы и программы, использующих большие данные и технологии ИИ. Эта система должна располагать механизмами, позволяющими эффективно выявлять и устранять отклонения фактических показателей ТК от целей, указанных в стратегических документах. Соответственно, ИМФ САУТ должны обеспечить достижение стратегических целей путем мобилизации ресурсов исполнителей, в том числе выполнение и перевыполнение планов, а также оперативное управление на основе отклонений фактических значений КПЭТ от плановых. Для этого ИМФ САУТ должны опираться на массив количественных данных – фактических и плановых значений ключевых показателей стратегических документов развития ТК.

Цифровая трансформация транспортной отрасли РФ [2] создает предпосылки для повсеместного управления ТК на основе количественных данных. В свою очередь, в таком ТК данных можно применять теорию управления, которая включает анализ объекта управления и синтез системы управления (например, ИМФ). Кроме того, при управлении ТК в экономике данных, требуется обучение ЛПР к изменениям. Соответственно, анализ объекта и синтез управления осуществляется

одновременно с обучением. В случае, когда одновременно происходит управление и обучение, говорят о дуальном управлении [9].

На практике, для одновременного управления и обучения ЛПР применяют инструменты ИИ, главным образом, машинное обучение (МО). Однако, с конца 2010-х годов наметился разрыв между теорией управления и МО [13]. Этот разрыв обусловлен чрезвычайной сложностью получаемых с помощью процедур МО многопараметрических интерполяционных зависимостей, характеризующих объект управления. Это сильно затрудняет синтез обратной связи, или даже делает его невозможным. С другой стороны, при наличии той или иной программы МО, возникает соблазн её использовать, чтобы избежать трудоемкого анализа объекта управления и синтеза системы управления (такой подход к управлению получил название безмодельного). Таким образом, возникает проблема совместного применения теории управления и МО в случае дуального управления, когда одновременно происходит управление и обучение.

Заметим, что МО основано на учете, требующем больших данных. Поэтому МО не годится, если требуется дуальное управление в режиме реального времени. В этом случае, нужен иной подход к дуальному управлению. Такой подход реализуется в рамках теории БТС [10]. Его развитие, в сочетании с инжинирингом на основе моделей (Model Based System Engineering, или системотехникой) [14], привело к разработке ИМФ САУТ, подсистемами которых являются модели цифрового обучения и адаптации, имитирующие когнитивные функции ЛПР. А поскольку способность руководителя к обучению и адаптации является признаком естественного интеллекта, то цифровое обучение и адаптацию относят к технологиям ИИ. Таким образом, ИМФ САУТ связаны с новыми направлениями ИИ – цифровым обучением и адаптацией. Например, такого рода ИМФ БТС использовались:

- при анализе, сценарном моделировании и стратегическом управлении развитием инфраструктуры ОАО «РЖД»;
- при управлении стратегическим развитием инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики [12].

Чтобы разрабатывать ИМФ САУТ и обеспечивать их нужные свойства, необходимо формально описывать объекты управления, строить их адекватные модели и проводить их теоретический анализ.

### 3. Пример: разработка механизма функционирования модуля «Новичок»

ИМФ САУТ должен обеспечить эффективное планирование показателей эффективности и реализацию соответствующих планов. Рассмотрим, в качестве примера, синтез механизма функционирования модуля «Новичок» (рис.4) применительно к задаче САУТ, связанной с классификацией ДИ, в зависимости от выполнения прогноза  $f_t$ , играющего роль плана по показателю эффективности  $y_t$ ,  $p_t \leq y_t \leq P_t$ , где  $P_t$  – стационарная случайная величина,  $P_t \in \delta = [\alpha, \beta]$ ,  $t=0,1,\dots$

Именно, будем предполагать, что Центр относит ДИ к классу 2 и стимулирует при выполнении и перевыполнении плана:  $y_t \geq f_t$ . В противном случае, Центр относит ДИ к классу 1 и наказывает за невыполнение плана. Риски Центра связаны с неверным прогнозом (т.е. назначением необоснованного плана)  $f_t$  на период  $t$  заранее, когда ещё неизвестна реализация случайной величины  $P_t$ .

#### 3.1. Полная информированность Центра о случайном процессе

Рассмотрим вначале случай полной информированности Центра о случайном процессе  $P_t$ ,  $t=0,1,\dots$ , когда Центр не только наблюдает потенциал  $P_t$ , но и знает вероятностные характеристики его стационарного распределения на сегменте  $[\alpha, \beta]$ . Тогда Центр может априори определить оптимальный прогноз (план)  $f^*$ , который минимизирует его риски, причем  $f^* \in \delta$ . Тогда Центр минимизирует риски, относя ДИ к классу 2 при  $P_t \geq f^*$ , и к классу 1 при  $P_t < f^*$ ,  $t=0,1,\dots$

Рассмотрим определение оптимального плана  $f^*$  в случае, когда известна априорная вероятность  $a_j$  принадлежности  $P_t$  к классу  $j$ , а также условная плотность распределения  $h_j(P_t)$ ,  $j = \overline{1,2}$ . Обозначим:  $b_{12}$  – потери при ошибочном отнесении  $P_t$  к классу 2;  $b_{21}$  – потери при ошибочном отнесении  $P_t$  к классу 1;  $b_{11}, b_{22}$  – потери при безошибочной классификации,  $b_{11} < b_{12}, b_{22} < b_{21}$ ;  $\delta_1 = [\alpha, f], \delta_2 = [f, \beta]$ . Минимизирующий средний риск оптимальный план равен

$$f^* = \underset{f \in [\alpha, \beta]}{\text{Argmin}} \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 b_{jl} \left[ \int_{\alpha}^f a_j h_j(P) dP + \int_f^{\beta} a_j h_j(P) dP \right]. \quad (1)$$

Этот план определяется из условия равенства нулю оптимальной решающей функции:

$$\vartheta(f^*) = \sum_{j=1}^2 (b_{j1} - b_{j2}) a_j h_j(f^*) = 0. \quad (2)$$

Если  $\vartheta(f^*) < 0$ , то ДИ относится к классу 2, в противном случае - к классу 1,  $t=0,1,\dots$

Предположим теперь, что Центр-Новичок не может самостоятельно определить оптимальный прогноз (план)  $f^*$  (например, не знает вероятностные характеристики распределения  $P_t$  на сегменте  $[\alpha, \beta]$ ). Тогда Центр может воспользоваться услугами Эксперта, которому известен  $f^*$ , определяемый из (1).

Однако дальновидный Эксперт заинтересован в предоставлении своих услуг в течение длительного времени. Если же он сразу сообщит Центру величину  $f^*$ , то потребность в его услугах в дальнейшем отпадет. Поэтому дальновидный Эксперт сообщает Центру не  $f^*$ , а лишь сведения о том, к какому классу относится ДИ при показателе  $P_t$ . Формально это означает, что Эксперт сообщает Центру информацию  $z_t$  о том, относится ли ДИ при показателе  $P_t$  к классу 2 (да - 1, нет - 0):

$$z_t = I(P_t) = \begin{cases} 1 & \text{при } P_t \geq f^* \\ 0 & \text{при } P_t < f^* \end{cases}, \quad t = 0, 1, \dots \quad (3)$$

Недальновидный Центр может ограничиться информацией (3), чтобы классифицировать ДИ. Известно, однако, что слепое следование руководителем советам экспертов недальновидно. Ещё Н. Маккиавелли предупреждал, что суверен, который не мудр сам, никогда не получит хорошего совета [15].

Поэтому мудрый Центр заинтересован самостоятельно принимать решения и одновременно обучаться, чтобы приблизиться к оптимальному плану  $f^*$ . Для этого Центру приходится принимать решение о классификации на основе собственной решающей функции  $\varepsilon(P_t, e) = P_t - e$ ,  $e \in [\alpha, \beta]$ . Если  $P_t < e$ , то Центр относит ДИ к классу 1, в противном случае - к классу 2,  $t=0,1,\dots$ . Таким образом, класс ДИ:

$$k_t = K(P_t, e) = \begin{cases} 2, & P_t \geq e \\ 1, & P_t < e \end{cases} \quad (4)$$

По сути, величина  $e$  - это оценка Центром оптимального плана  $f^*$ . При этом Центр выбирает величину  $e$  так, чтобы его собственная решающая функция  $\varepsilon(P_t, e)$  была максимально приближена к оптимальной решающей функции  $\vartheta(P_t)$ . Формально это означает, что Центр выбирает величину  $e$  так, чтобы минимизировать критерий  $Q(e)$  качества квадратичной аппроксимации оптимальной решающей функции  $\vartheta(p)$  собственной решающей функцией  $\varepsilon(P, e)$  на множестве  $\delta$ :

$$Q(e) = \int_{\alpha}^{\beta} [\vartheta(P) - \varepsilon(P, e)]^2 dP. \quad (5)$$

Минимизирующий критерий (5) оптимальная оценка  $e^*$  определяется из условия:

$$e^* = \underset{e \in [\alpha, \beta]}{\operatorname{Argmin}} \int_{\alpha}^{\beta} [\vartheta(P) - \varepsilon(P, e)]^2 dP. \quad (6)$$

Условие минимума  $Q(e)$  в точке  $e^*$  имеет вид:

$$dQ(e^*)/de = e^* - 0,5 + b_{11} - b_{12} + uM_P\{I(P)\} = 0, \quad u = \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 (-1)^{j+l+1} b_{jl}, \quad (7)$$

где  $M_P\{I(P)\}$  - математическое ожидание величины  $I(P)$  на множестве случайных реализаций  $P$ .

Центр наблюдает последовательные реализации  $P_t, t=0,1,\dots$ . Поэтому, для решения (7), Центр может использовать алгоритм стохастической аппроксимации, позволяющий получать и последовательно уточнять оценки  $e_t$  величины  $e^*$ :

$$e_{t+1} = F(P_t, e_t) = e_t - \gamma_t [e_t - 0,5 + b_{11} - b_{12} + uI(P_t)], \quad \gamma_t > 0, \sum_{t=0}^{\infty} \gamma_t < \infty, e_0 = e^0, t = 0, 1, \dots \quad (8)$$

При этом оценки  $e_t$  сходятся к оптимальной оценке  $e^*$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_t = e^*. \quad (9)$$

### 3.2. Активность дальновидного исполнителя

Предположим теперь, что Центр и Эксперт не знают потенциал  $P_t$ , но наблюдают показатель  $y_t$ ,  $y_t \leq P_t$ . При этом реализация  $P_t$  становится известна ДИ в начале периода  $t$ , так что ДИ может выбрать  $y_t, y_t \leq P_t$ , чтобы обеспечить себе большие стимулы. Поэтому, вообще говоря,  $y_t \neq P_t$ .

Поскольку Эксперту и Центру  $P_t$  неизвестен, они не могут точно рассчитать, соответственно,  $I(P_t)$  и  $e_{t+1}$ . Однако, зная  $y_t$ , они могут делать примерные расчеты и оценки, опираясь на формулы (3) и

(8). Поэтому Центр и Эксперт могут, руководствуясь вышеописанными рассуждениями, использовать формулы (3) и (8), заменив в неизвестный потенциал ДИ  $P_t$  известным показателем ДИ  $y_t$ .

Именно, Эксперт, пользуясь правилом, подобным (3), определяет, относится ли ДИ с показателем  $y_t$  к классу 2 (да – 1, нет – 0), и сообщает Центру эту информацию:

$$i_t = I(y_t) = \begin{cases} 1 & \text{при } y_t \geq f^* \\ 0 & \text{при } y_t < f^* \end{cases}, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (10)$$

где  $I$  – процедура информирования Центра.

Получив информацию (10), Центр рассчитывает оценку  $f_{t+1}$  величины  $e_{t+1}$  по формуле, подобной (8):

$$f_{t+1} = F(y_t, f_t) = f_t - \gamma_t [f_t - 0,5 + b_{11} - b_{12} + uI(y_t)], \quad f_0 = e^0, \quad t = 0, 1, \dots, \quad (11)$$

где  $F$  – процедура цифрового обучения Центра. Поскольку, вообще говоря,  $y_t \neq P_t$ , то оценки  $f_t$  не сходятся к оптимальной оценке  $e^*$ .

Кроме того, Центр, пользуясь правилом, подобным (4), определяет класс ДИ. Если  $y_t < f_t$ , то Центр относит ДИ к классу 1, в противном случае – к классу 2,  $t=0, 1, \dots$ . Формально, класс ДИ:

$$c_t = K(y_t, f_t) = \begin{cases} 2 & \text{при } y_t \geq f_t \\ 1 & \text{при } y_t < f_t \end{cases}, \quad (12)$$

где  $K$  – процедура классификации Центром ДИ.

Совокупность  $\Sigma = \{I, F, K\}$  процедур информирования  $I$  (10), цифрового обучения  $F$  (11) и классификации  $K$  (12) назовем экспертным механизмом классификации (ЭМК). Заметим, что ЭМК относится к ИМФ модуля «Новичок» (рис.4).

### 3.3. Оптимальный механизм функционирования модуля «Новичок»

После выбора показателя  $y_t$  в периоде  $t$ , в результате функционирования ЭМК  $\Sigma = \{I, F, K\}$ , ДИ получает класс  $c_t$ . При этом ДИ заинтересован в получении более высоких текущего и будущих классов  $c_\tau, \tau = t, t + \omega$ , где  $\omega$  – количество периодов, учитываемых ДИ. Формально, ценность получаемых классов для ДИ равна  $D_t(\Sigma) = D(c_t, \dots, c_{t+\omega})$ , где  $D$  – монотонно возрастающая функция своих аргументов.

Для того, чтобы выбрать показатель  $y_t$  в периоде  $t$  так, чтобы увеличить ценность  $D(c_t, \dots, c_{t+\omega})$ , ДИ должен принять гипотезы относительно будущих параметров  $D_t$ , таких как потенциалы  $P_\tau$  и показатель  $y_\tau, \tau = t + 1, t + \omega$ . Естественно предполагать, что ДИ ориентируется на выбор наилучшего показателя  $y_t$  при любой реализации случайного потенциала  $P_\tau, \tau = t + 1, t + \omega$ . Кроме того, будем предполагать, что ДИ учитывает возможность самой неблагоприятной реализации  $P_\tau$ . При таких гипотезах, выбирая  $y_t$ , ДИ ориентируется на максимальное гарантированное значение приведенной ценности:

$$g_t(y_t, \Sigma) = \min_{P_{t+1} \in \delta} \max_{y_{t+1} \in [p_{t+1}, P_{t+1}]} \min_{P_{t+2} \in \delta} \max_{y_{t+2} \in [p_{t+2}, P_{t+2}]} \dots \min_{P_{t+\omega} \in \delta} \max_{y_{t+\omega} \in [p_{t+\omega}, P_{t+\omega}]} D_t(\Sigma). \quad (13)$$

Соответственно, множество оптимальных выборов ДИ  $y_t^*$  в периоде  $t$ :

$$G_t(P_t, \Sigma) = \{y_t^* | g_t(y_t^*, \Sigma) \geq g_t(y_t, \Sigma), \quad y_t \in [p_t, P_t]\}. \quad (14)$$

**Теорема.** Предположим, что ДИ благожелателен по отношению к Центру: если  $P_t \in G_t(P_t, \Sigma)$ , то  $y_t^* = P_t, t = 0, 1, \dots$ . Тогда ЭМК  $\Sigma = \{I, F, K\}$  достаточно для использования потенциала ДИ:

$$y_t^* = P_t, \quad t = 0, 1, \dots. \quad (15)$$

При этом оценки  $f_t$  сходятся к оптимальной оценке  $e^*$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_t = e^*. \quad (16)$$

**Доказательство.** Ценность ДИ  $D_t(\Sigma)$  в периоде  $t$  является монотонно возрастающей функцией текущего и будущих классов  $c_t, \dots, c_{t+\omega}$ . Согласно (12), с ростом  $y_t$ , текущий класс  $c_t$  не уменьшается.

Рассмотрим зависимость будущих классов  $c_\pi$  от  $y_t$ , при  $\pi = t + 1, t + \omega$ . Согласно (10),  $i_\pi = I(y_\pi)$  не уменьшается с ростом  $y_t$ , если  $\pi = t + 1, t + \omega$ . Учитывая это, и рассматривая (11) как рекуррентное соотношение, получаем, что оценка  $f_\pi$  не увеличивается с ростом  $y_t$ . Кроме того,

согласно (12),  $c_\pi$  не увеличивается с ростом  $f_\pi$ . Таким образом, все будущие классы  $c_\pi$ ,  $\pi = t + 1, t + \omega$ , не уменьшаются с ростом  $y_t$ .

Следовательно, все классы  $c_\tau$ ,  $\tau = t, t + \omega$ , не уменьшаются с ростом  $y_t$ . Таким образом,  $D_t(\Sigma) = \sum_{\tau=t}^{t+\omega} \mu^{\tau-t} c_\tau$  не уменьшается с ростом  $y_t$ , достигая максимума при  $y_t = P_t, t = 0, 1, \dots$ . Согласно (13), максимум  $g_t(y_t, \Sigma)$  также достигается при  $y_t = P_t, t = 0, 1, \dots$ . Тогда из (14) следует, что  $P_t \in G_t(P_t, \Sigma)$ .

Но, по условию теоремы, ДИ благожелателен по отношению к Центру. Следовательно,  $y_t^* = P_t, t = 0, 1, \dots$ , и выполняется (15). Сопоставляя (8) и (11), получаем, что  $f_t = e_t, t = 0, 1, \dots$ . Но тогда, согласно (9),  $\lim_{t \rightarrow \infty} f_t = \lim_{t \rightarrow \infty} e_t = e^*$ , и выполняется (16), ч.т.д.

### 3.4. Обсуждение результатов

Рассмотрим содержательную трактовку полученных результатов. Пусть  $y_t$  – показатель организации-объекта САУТ, ответственной за достижение конкретной цели САУТ в периоде  $t$ , а  $P_t$  – потенциал этой организации. Неопытный Центр получает от эксперта советы, на основе которых формирует целевые значения этого показателя в будущих периодах – планы организации  $f_\tau, \tau = t + 1, t + \omega$ . По результатам их достижения, Центр оценивает работу организации и её руководства. Если текущий план выполнен, то организация считается эффективной (класс  $c_t=2$ ), а её руководство поощряется. В противном случае, организация считается неэффективной (класс  $c_t=1$ ), а её руководство наказывается.

Принимая любое из этих решений, Центр рискует. Если он необоснованно наказывает эффективную организацию и её руководство, возникают потери  $b_{21}$ . Ошибочное же поощрение влечет за собой потери  $b_{12}$ . В этих условиях, Центру нужно определить оптимальный план (1), минимизирующий средний риск. Этот план можно определить, зная оптимальную решающую функцию (2).

Однако ни оптимальный план, ни оптимальная решающая функция неопытному Центру не известны. В этих условиях, Центр стремится максимально приблизить свои решения к оптимальным. При квадратичном критерии (5), характеризующем качество приближения решающей функции Центра к оптимальной, наилучшая оценка оптимального плана определяется из (6). Затем Центр последовательно формирует приближения  $f_t$  к оценке (6) в каждом периоде  $t$ , используя рекуррентную формулу (11). При выполнении условий теоремы, эти приближения  $f_t$  сходятся к оптимальной оценке (6), согласно (16). Таким образом,  $f_t$  – это наилучшая оценка оптимального плана в периоде  $t$ , минимизирующая риски неопытного Центра.

Заметим, что в процессе доказательства теоремы было показано, что чем выше показатель  $y_t$ , тем ниже оценка  $f_t$ , используемая при классификации в любом будущем периоде  $\tau, \tau = t + 1, t + \omega$ . Следовательно, руководству организации будет легче получить поощрение в будущем, даже при неблагоприятном случайном потенциале  $P_\tau, \tau = t + 1, t + \theta$ . По сути, увеличивая  $y_t$ , руководство получает не только текущее поощрение. Одновременно и оценки  $f_\tau$  – «планки» для получения им поощрений в будущем снижаются. Это дополнительно заинтересовывает руководство в раскрытии потенциала организации, т.е. в выборе  $y_t^* = p_t$ . Это показывает, что разработанный механизм  $\Sigma = \{I, F, K\}$  может быть эффективным инструментом для поддержки принятия решений при САУТ в условиях неопределенности. Такой механизм мотивирует исполнителей стратегических документов повышать свою эффективность до максимально достижимого уровня. Комбинируя ЭМК  $\Sigma = \{I, F, K\}$  с другими ИМФ (см. раздел 4), можно разрабатывать более сложные механизмы функционирования САУТ.

## 4. Заключение

Состояние транспорта характеризуют его ключевые показатели эффективности (КПЭТ). Стратегические документы в сфере транспорта ориентированы на достижение целевых значений этих показателей.

Стратегическое адаптивное управление транспортом (САУТ) – это централизованное управление развитием транспорта с помощью планов, настраиваемых на достижение этих целевых значений. САУТ является цифровой подсистемой стратегического управления транспортом, опирающейся на массив количественных данных – фактических и целевых значений ключевых показателей эффективности.

Ввиду множества КПЭТ в стратегические документах, на практике цифровое САУТ нуждается в эффективных методах анализа больших данных. Но, главное - требуются научно обоснованные методы синтеза управлений и алгоритмов принятия решений на основе этих данных.

Рассмотрены теоретические основы построения САУТ на базе принципов прогрессивности, организованности, комплексности, согласованности, интеллектуальности, мобилизованности. Разработан подход к формированию сложных многофункциональных систем САУТ на основе базового и производных от него модулей. Механизмы функционирования этих модулей основаны на процедурах цифрового обучения. Развитый подход проиллюстрирован на примере оптимального синтеза механизма функционирования модуля «Новичок», обеспечивающего цифровое адаптивное планирование и классификацию исполнителя КПЭТ, в зависимости от выполнения плана. При этом минимизируются риски органа управления и раскрывается потенциал исполнителя.

Полученные результаты способствуют переводу в практическую плоскость работ по обеспечению функционирования и взаимодействия при САУТ. Эти результаты позволяют определить и сформировать научно обоснованные требования к составу, структуре, функционалу и характеристикам компонентов САУТ.

## Литература

1. Транспортная стратегия РФ до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. // URL: <https://mintrans.gov.ru/ministry/targets/187/191/documents>.
2. Стратегическое направление в области цифровой трансформации транспортной отрасли РФ до 2030 года // URL: <http://government.ru/docs/all/150354/>.
3. Государственная программа «Развитие транспортной системы» // URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/gosudarstvennyye-programmy/1089>.
4. Доклад о реализации Транспортной стратегии на период до 2030 г. // URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/11/12749?type=11>.
5. Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа // URL: [https://www.tadviser.ru/images/a/a0/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%88%D0%BE%D1%82\\_20-12-2023\\_155931.jpg](https://www.tadviser.ru/images/a/a0/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%88%D0%BE%D1%82_20-12-2023_155931.jpg).
6. Эксперты оценили анонсированную Мишустиним новую модель госуправления // URL: <https://www.vedomosti.ru/politics/articles/2023/04/26/972717-eksperti-otsenili-mishustinim-model-gosupravleniya>
7. Бурков В.Н. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, В.В. Цыганов, А.М. Черкашин. – М.: Наука, 1984. – 271 с.
8. Цыганов В.В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении. – М.: Наука, 1991. – 166 с.
9. Цыганов В.В. Интеллектуальное предприятие. Теория и практика управления эволюцией организации / В.В. Цыганов, В.А. Бородин, Г.Б. Шишкин – М.: Университетская книга, 2004. – 768 с.
10. Цыганов В.В. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза / В.В. Цыганов, И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев и др. – СПб.: ИПТ РАН, 2016. – 216 с.
11. Макоско А.А. Стратегическое планирование устойчивого функционирования экономического комплекса РФ. Угрозы, целеполагание, прогноз, рекомендации / А.А. Макоско, А.В. Матешева, В.В. Цыганов и др. – М.: Наука, 2021. – 412 с.
12. Малыгин И.Г. Комплекс моделей стратегического управления транспортной инфраструктурой Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики / И.Г. Малыгин, А.К. Еналеев, В.В. Цыганов и др. – СПб.: СПбГУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. – 122 с.
13. Recht B. Reflections on the learning-to-control renaissance // Proc. of the 21-st World Congress IFAC. – Berlin, 2020. – P. 4707.
14. Косяков А. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур и др. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
15. Макиавелли Н. Государь. – М.: Планета, 1990. – 80 с.