

УДК 004.94

ALINA GPSS – ОТ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ К ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ УПРАВЛЕНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Девятков Т.В., Девятков В.В., Шестюк В.М., Минниханов Р.Р. (Казань)

Введение

В начале 2000-х годов в Казани, как и 30 лет назад для языка GPSS/360, была проведена локализация общецелевой системы имитационного моделирования GPSS World для российских пользователей [1] и от компании Minuteman Software (США) были получены эксклюзивные права на распространение GPSS World в странах бывшего СССР. Активный опыт первых лет работы с системой показал, что к этому моменту программная (оконная) технология взаимодействия пользователя с моделью уже устарела, а уровень автоматизации отдельных этапов имитационного моделирования не достаточен. Современный уровень развития информационных технологий уже позволял применение новых подходов и методов. К этому моменту уже активно начали внедряться автоматизированные средства мониторинга данных, их комплексная статистическая обработка, инструменты 2D и 3D графики для анимации результатов и т.д. У GPSS World появились серьезные конкуренты – языки и системы AnyLogic [2], ExtendSim [3], Simio [4] и многие другие инструменты, которые в плане технологии проведения имитационного моделирования существенно превосходили GPSS World. Но, с точки зрения моделирующих возможностей, способности создания крупномасштабных моделей, исполнения моделей значительно быстрее чем на других языках – соперника языку GPSS World не было и нет до сих пор. Поэтому, с учетом мнения многих пользователей, нами было принято стратегическое решение – оставить язык GPSS World в качестве моделирующего ядра, а вокруг этого ядра разработать интерактивную программную оболочку в рамках единого исследовательского пространства с множеством программных инструментов автоматизирующих как можно больше этапов имитационного моделирования. И, в результате, создать комфортную для пользователя программную среду проведения исследования.

В целом, данное направление работ нами, в сокращенном виде, была названо – разработка САИИ (Системы автоматизации имитационных исследований). Был сделан акцент не просто на имитационное моделирование, как процесс создания модели, ее отладки и проведения экспериментов, а на полноценное и комплексное имитационное исследование – от постановки задачи, разработки модели и до формулирования выводов и рекомендаций.

Автоматизация имитационных исследований

Автоматизация имитационных исследований – это абсолютно необходимый и объективный тренд последних лет последовательного развития систем и инструментов имитационного моделирования. Он актуален и в настоящее время. Тем более, что повышение вычислительной мощности компьютеров и появление множества новых информационных технологий сделали ранее невозможное – возможным, практическую реализацию этих планов развития. Многими разработчиками в мире, в рамках своих симуляторов, в настоящий момент реализованы в той или иной мере многие задачи, например, задачи мониторинга и обработки данных для модели, методы графического описания и автоматической генерации текста модели, разработка сценариев

исследования (планирования инструментов), анимации результатов, оптимизирующие эксперименты и т.д.

Нами, в рамках направления разработки САИИ, в период с 2008 по 2018 годы, также было проведено множество научно-методических и практических работ. В результате, сначала в 2013 году был создан и активно применялся расширенный редактор GPSS World [5]. Затем в 2018 – среда имитационного моделирования GPSS Studio [6], которая была зарегистрирована в реестре российского программного обеспечения. И, наконец, в 2022 – зарегистрирована платформа ALINA GPSS [7].

На рис. 1 представлен процесс развития (эволюция) программной технологии САИИ с использованием стандарта языка GPSS в России.



Рис. 1. Этапы развития программной технологии имитационных исследований

В воплощенных в рамках платформы ALINA GPSS идеях и технологиях, удалось:

- Разработать усовершенствованную методологию имитационных исследований и защитить ее на экспертном научном уровне посредством защиты кандидатской и докторской работы [8, 9].
- В рамках усовершенствованной методологии использовались наиболее значимые элементы агрегативного подхода [10] и общей теории имитационного моделирования [11] для построения технологии графического иерархического описания модели системы и автоматической генерации имитационных моделей.
- Объединить в рамках САИИ большинство этапов имитационного моделирования, превратив процесс разработки моделей и проведения экспериментов в комплексный процесс имитационного исследования.
- Сократить время разработки модели и проведения исследования в разы – учебных до нескольких часов (в пределах времени проведения лабораторной работы), серьезных научных и практических с полугода до одного-трех месяцев (в зависимости от требуемого уровня детализации и глубины исследования).
- Увеличить объем (а, следовательно, детализацию) разрабатываемых моделей, которые может понять и отладить разработчик с ранее существовавшего предела в сотни раз.
- Создать на основе модели автономно работающее (независимое от среды разработки) имитационное приложение (цифровой двойник) с предметно ориентированными и интуитивно понятными диалогами ввода исходных данных и анализа результатов.

В результате совместных усилий, многих разработчиков за последние десять лет удалось существенно повысить уровень автоматизации имитационных исследований и, самое главное, постепенно увеличить интерес к ИМ и расширить сферы применения ИМ. Конечно, в основном это удалось за счет ускорения мощности вычислений, но значительный вклад был внесен и за счет применения новых теоретических методов в процессе имитационного исследования.

Необходимо особо отметить важнейший общий эффект от создания САИИ – повышение возможного уровня детализации моделей. Например, в нашем программном продукте GPSS Studio произошло существенное, кратное увеличение размерности разрабатываемых моделей. За счет использования иерархических графических схем при описании данных, структуры и алгоритмов модели системы, а также возможности создавать отдельные фрагменты модели для последующего их автоматического объединения – удалось повысить структурированность всей модели, обеспечить ее промышленное тестирование. Количественно данный эффект можно оценить следующим образом. Раньше GPSS модель объемом в несколько тысяч блоков уже была чрезвычайно сложна для понимания и отладки. Выработался негласный предел разумного объема GPSS моделей в пять тысяч блоков GPSS, когда они еще понятны самому разработчику. С помощью применения GPSS Studio мы уже разрабатываем модели, содержащие несколько сотен тысяч блоков. Т.е. можно говорить о стократном увеличении уровня детализации моделей, а значит и возможности решения тех задач, которые ранее решить не представлялось возможности.

Комплексная автоматизация исследования дала и другие эффекты. Раньше до оптимизационных задач в имитационном моделировании дело доходило редко – не хватало времени, отсутствовал инструмент оптимизации или он был сложен в применении. Чаще всего останавливались на получении допустимых и относительно лучших решений. Сейчас, когда оптимизацию можно провести внутри одного программного продукта, большинство исследований доходят до решения оптимизационной задачи. Это позволило повысить доверие к ИМ со стороны пользователей и расширить их круг.

Более того, в настоящий момент нами, с коллегами из Российского квантового центра, проводится работа по использованию программного эмулятора (уже существующего квантового солвера) в качестве «Решателя» в имитационном исследовании. Если эта экспериментальная работа завершится удачно, то будет сделан серьезный шаг в ускорении оптимизационных экспериментов в имитационном исследовании и сделан шаг в расширение возможностей использования ИМ в оперативном управлении для очень больших и масштабных систем.

В то же время реализация САИИ выявила новые задачи и перспективные горизонты в применении ИМ.

Выделим на наш взгляд основную цель и задачу для разработчиков инструментов ИМ на ближайшее время – интеграция инструмента ИМ со смежными аналитическими инструментами системного анализа. Например, включение в единое исследовательское пространство модели – средства мониторинга, накопления и обработки данных, системы логической и информационной связи существующих в самой системе автоматизированных подсистем контроля, учета и управления процессами с имитационной моделью. Поэтому, в рамках инструментов ИМ должны быть созданы удобные и простые средства интеграции с внешними программами и обеспечения широкого обмена данными и результатами между ними. Это позволит инструментам ИМ органично вписаться в ИТ ландшафт предприятий и стать неотъемлемой и обязательной ее частью.

Платформа прогнозного планирования и управления ALINA GPSS

Одной из ближайших и достижимых перспектив является возможность использования модели в контуре стратегического и оперативного управления системой. Давно известно и понятно, что модель является одним из наиболее мощных прогнозных инструментов для выработки управляющего решения. Раньше, с помощью имитационной модели своевременно сформировать управляющее решение было сложно, а иногда и практически невозможно, так как имитационная модель не успевала за темпом «жизни» реальной системы. Особенно это относится к применениям для оперативного управления. В таких системах время на ожидание решения от модели минимально (иногда секунды). И чем сложнее система, тем меньше шанс использования ее в контуре оперативного управления. А на практике наоборот – чем сложнее система, тем более совершенный аппарат управления ей нужен.

В настоящее время ситуация кардинально поменялась. Для большинства существующих систем – небольших и средних по масштабу, быстрое действие имитационной модели уже достаточно, и они во многих случаях применяются в управлении. Хотя чаще в стратегическом, нежели в оперативном управлении.

При использовании в управлении имитационная модель превращается в инструмент управления и нами даже введен новый термин – **«Цифровой двойник управления»**.

С момента появления широко известного термина «цифровой двойник», было сформулировано множество определений и нет устоявшегося, принятого всеми определения, поэтому его понятийная сущность несколько размыта. Для промышленных изделий имеется даже стандарт [12], разработанный Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого.

Термин «Цифровой двойник управления» действительно новый, но он практически соответствует понятию цифрового двойника и, по сути, является его подмножеством. Его принципиальным отличием является то, что он еще выполняет функцию классического «Решателя». Цифровой двойник S^* следит за функционированием системы S в рамках прописанного алгоритма управления U и в определенных ситуациях (критических отклонениях показателей $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$) вырабатывает управляющее воздействие $U_s = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, которое может носить рекомендательный характер для лица, принимающего решение или напрямую воздействовать на систему (рис 2).

Тогда воздействие «Цифрового двойника управления» на систему S , состоящую из множества подсистем S_i , можно считать следующим преобразованием $F(U)$:

$$F(U) := S\{S_i\} \rightarrow S^*\{S^*_i\} \text{ при } U=S(p_i) \text{ где } i=1, n \quad (1)$$

Таким образом, анализируя сложившиеся тенденции, имеющиеся наработки в части управления системами с использованием имитационной модели, мы пришли к созданию на основе среды моделирования GPSS Studio, платформы ALINA GPSS. Эта работа была проведена, и сейчас платформа используется для прогнозирования и управления любым объектом с помощью его имитационной модели, который структурирован, функционально описан и математически формализован. Необходимо отметить, что для построения цифрового двойника управления достаточно инструментов платформы, но обязательно необходим требуемый объем исходных данных о системе и прямая связь с объектом управления.

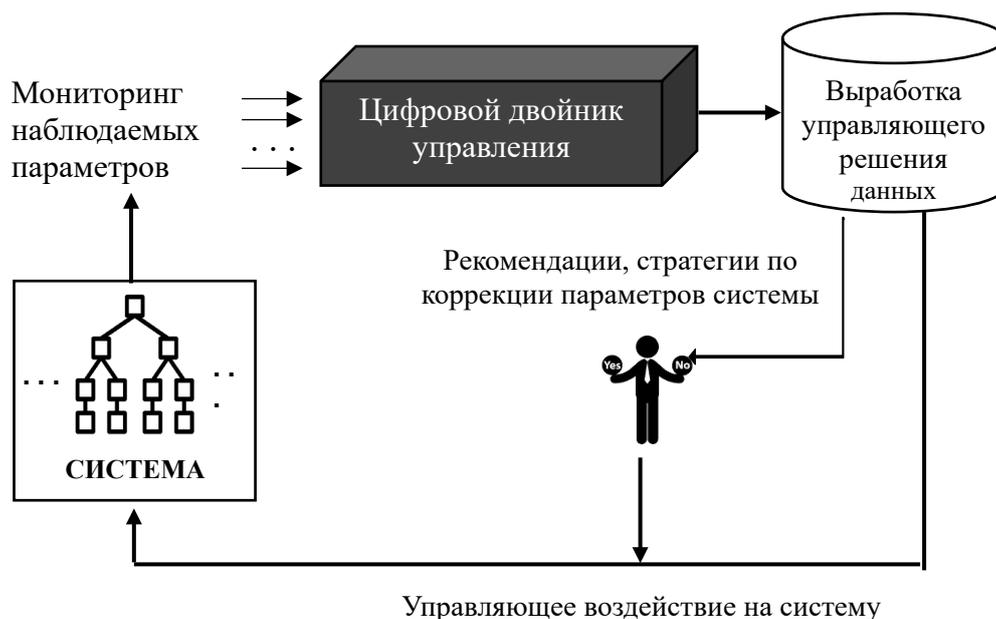


Рис. 2. «Цифровой двойник управления»

Для обеспечения эффективной и быстрой связи модели с системой в среду разработки GPSS Studio были добавлены инструментальные средства использования программ, написанных на общецелевых языках программирования. Эти программы могут вставляться в любом месте модели – до и после модели, внутри в виде отдельного блока модели и как операнд в любом блоке модели.

Это позволяет разработчику гибко и в удобном формате обеспечить интерфейс с внешними системами и базами данных. Это также дает возможность использовать в качестве прогнозной модели как аналитические, так и имитационные модели или их взаимодополняющую комбинацию. Учитывая необходимость получения значимых результатов прогнозирования и управления для сложных систем, где требуется детальное описание объекта и процессов с ним связанных, то, чаще всего, практический смысл имеют имитационные модели. Они позволяют максимально приблизить модель объекта (цифровой двойник управления) к оригиналу, а, следовательно, обеспечить качество прогнозного управления.

Применяемый на платформе подход позволяет в полной мере при стратегическом управлении осуществлять функции предиктивного анализа и прогнозирования на всех этапах жизненного цикла Системы, что дает возможность:

- принимать правильные проектные решения в процессе создания (проектирования) Системы;
- находить «узкие места» системы и способы их устранения в процессе эксплуатации Системы;
- выбрать оптимальные варианты развития при последующей модернизации Системы;
- минимизировать потери и ущерб при ликвидации Системы.

Таким образом двумя основными сущностями платформы при управлении системой является пара <Цифровой двойник, Система>. Необходимо понимать, что возможны два способа отображения взаимосвязи внутри этой пары:

- Во-первых, можно идти от Цифрового двойника (модели) в голове человека к еще не существующей Системе – задача прямого моделирования. На практике, например, это процесс проектирования.
- Во-вторых, можно отталкиваться от существующей Системы к Цифровому двойнику (модели), отображающей те или другие свойства Системы. На практике, например, это процессы эксплуатации и модернизации.

Поэтому, извечный спор «Что первично, Система или модель (Цифровой двойник)?» здесь не уместен – возможны оба варианта. В любом случае, на Платформе строится и используется Цифровой двойник (модель). И от того, как он будет построен, насколько близко к существующей Системе или к ее образу, задуманному разработчиком – зависит от возможностей и качества инструментов, предоставляемых Платформой.

Примеры отображения взаимосвязи в паре <Модель, Система>, а также взаимосвязь в тройке <Модель, Система, Субъект управления> был приведен в книге Микони С.В., Соколова Б.В., Юсупова Р.М. [13] и первая взаимосвязь, в частично измененном виде, показана на рис. 3.

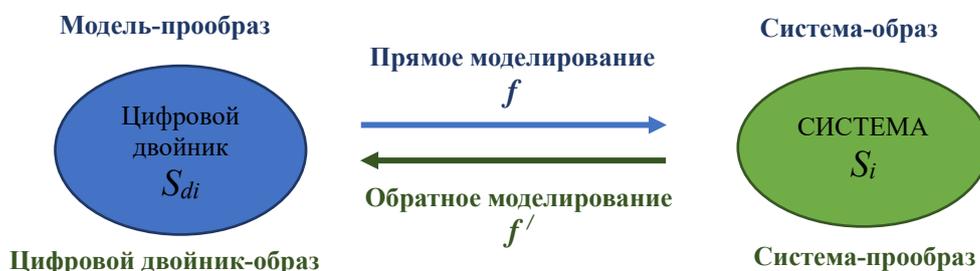


Рис. 3. Взаимосвязь Модель-Система.

Важнейшим звеном в процедуре поиска необходимого управляющего воздействия в цифровых двойниках на платформе ALINA GPSS, является применение «Black Box» оптимизатора IOSO отечественной компании «Сигма технологии» [14]. После разработки и отладки модели, в системе планирования экспериментов платформы пользователем ставится требуемая оптимизационная задача. Она позволяет сформировать и запустить классический многокритериальный оптимизирующий эксперимент поиска оптимума множества функций управления U_1, U_2, \dots, U_n . Чаще всего это бывает одна функция, но может поставлена задача многокритериальной оптимизации (2).

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= f(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1) \\ U_2 &= f(x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2) \\ &\dots\dots\dots \\ U_m &= f(x_1^m, x_2^m, \dots, x_n^m) \end{aligned} \right\} \rightarrow \min (\max) \quad (2)$$

Следует отметить, что не всегда такая задача может быть решена успешно, поэтому перед формированием цифрового двойника необходимо протестировать оптимизационные эксперименты на всем множестве вариации варьируемых факторов и убедиться в возможности поиска оптимума.

Особенностью цифровых двойников управления, созданных с использованием платформы, является то, что они не просто фиксируют и передают управляющее решение в систему. В случае стратегического управления системой с помощью модели,

они визуализируют состояние объекта в цифровом виде (например, как 2D чертеж или 3D технологии информационного моделирования в строительстве), а также позволяют воспроизводить динамику процесса функционирования объекта (за счет мониторинга показателей с заданным шагом) и на основе анализа формируют прогноз его развития в будущем (по совокупности экспериментов с моделью).

Использование цифровых двойников управления и применение ИИ в ИМ

За последние годы отмечается устойчивый практический рост интереса пользователей к построению цифровых двойников управления. Только за последние годы нами решалось более десятка различных задач, связанных с их построением. В основном это:

- задачи промышленного моделирования – оценка выполнимости производственных заданий, разработка расписаний поставок и обслуживания, анализ необходимости модернизации системы и т.д.;
- логистические задачи – разработка оптимальных цепочек поставок, выбор логистического оператора, оценка складских запасов и т.д.;
- задачи транспортного моделирования – анализ достаточности инфраструктуры, оценка пропускной способности дорог, управление очередями на перекрестках в часы «пик» и т.д.

Продемонстрируем реализацию концепции создания цифрового двойника управления на основе имитационной модели при решении задачи создания системы адаптивного управления дорожным движением в городе.

Пробки в часы пик или при возникновении той или иной дорожной ситуации знакомы многим рядовым гражданам – как автомобилистам, так и пешеходам. Хотя проблемы возникновения пробок понятны, они являются большой проблемой для организаций и специалистов, ответственных за организацию дорожного движения. Одним из эффективных подходов к устранению пробок и минимизации времени пересечения перекрестков транспортными средствами (ТС) является использование адаптивных алгоритмов регулирования длительности фаз горения зеленого цвета светофоров в зависимости от длин возникающих очередей на перекрестках.

Во многих городах России были внедрены подобные системы, но в основном они созданы зарубежными разработчиками. А на объектах критической инфраструктуры Российской Федерации с 1 января 2025 года должно использоваться отечественное программное обеспечение [15]. Перед нами была поставлена задача осуществить импортозамещение достаточно удачно работающей в г. Казани системы адаптивного управления OMNIA/UTOPIA, разработанной австрийской компанией SWARCO [16]. Учитывая наш опыт и компетенции в области ИМ, а также прогнозную направленность задачи, мы решили в основе алгоритма использовать имитационную модель, тем более что в конце 2022 года нами был разработан и внедрен инструмент для автоматизации создания имитационных моделей «Единая информационная модель сегмента улично-дорожной сети» [17].

В результате адаптивный алгоритм и программная технология его использования были созданы.

Сначала, транспортными инженерами в автоматизированном режиме разрабатываются и отлаживаются имитационные модели каждого перекрестка с помощью программы «Редактор перекрестков». В результате, автоматически генерируется имитационная модель на языке GPSS World Core [18]. Тестирование адекватности созданных моделей осуществляется на основе сравнения результатов имитационных экспериментов с имеющимися историческими данными о работе перекрестков за последний год. После этого, выделяются основные варьируемые

факторы, например, интенсивность движения ТС и возможные диапазоны их изменения, влияющие на время проезда ТС через перекресток. На основе проведения направленных серий оптимизирующих экспериментов строится библиотека типовых сценариев в различных ситуациях, по длинам возникающих очередей из ТС, которые возможны на перекрестке.

При управлении движением на перекрестке программа каждые 5 секунд с помощью датчиков движения определяет состояние перекрестка с точки зрения длин очередей ТС и после обращения к библиотеке типовых сценариев вырабатывает и реализует, в случае необходимости, управляющее решение об изменении длительности фаз светофора.

В качестве критерия оптимизации в алгоритме была выбрана минимизация среднего времени проезда ТС через перекрестки, входящими в область рассматриваемой транспортной сети. Рассматривались два вида оптимизационных экспериментов – минимизация среднего времени проезда на отдельном перекрестке с учетом влияния соседних перекрестков (локальный режим работы) и минимизация суммы средних времен по всем перекресткам, входящим в область рассматриваемой транспортной сети (глобальный режим) (3 и 4).

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \rightarrow \min \quad (3)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \min T_i \rightarrow \min \quad (4)$$

$$T_i = T_{ож}^i + T_{дв}^i \quad T_{ож}^i = T_{кр}^{i*} + T_{ж}^{i*} \quad T_{кр}^{i*} < T_{кр}^i \quad T_{ж}^{i*} < T_{ж}^i$$

$$c_1 < T_{зеленый} < c_2$$

Где, T – суммарное среднее время проезда ТС через перекрестки

$T_{ож}^i$ – среднее время ожидания проезда ТС i -м перекрестке

$T_{дв}^i$ – среднее время проезда ТС i -го перекрестка

$T_{кр}^i$ – текущая длительность красного цвета на i -м перекрестке

$T_{кр}^{i*}$ – среднее время задержки ТС на красный цвет на i -м перекрестке

$T_{ж}^i$ – текущая длительность желтого цвета на i -м перекрестке

$T_{кр}^{i*}$ – среднее время задержки ТС на желтый цвет на i -м перекрестке

На первом шаге разработки данный алгоритм был реализован с помощью цифрового двойника управления, базирующегося на достаточно детальной библиотеке типовых решений, наработанной с помощью ранее проведенных экспериментов с заранее созданными имитационными моделями перекрестков, а это тысячи экспериментов. Алгоритм показал свою работоспособность, но выявились недостатки. Во-первых, необходимо было проводить очень большое число экспериментов, на которые тратилось очень много времени и усилий. Во-вторых, требовалось повышение точности прогноза, из-за невозможности полного перебора всех вариантов изменения длительности фаз при проведении имитационных экспериментов в связи большой их длительностью и с высокими вычислительными затратами.

Поэтому, в развитие алгоритма была предложена и разработана программная технология использования методов искусственного интеллекта на основе применения рекуррентных нейронных сетей (RNN) и их модификаций (LSTM и GRU) для создания модели перекрестка на основе знания имитационной модели. Комбинация различных

архитектур нейронных сетей позволила объединить сверточные и рекуррентные слои для принятия решения о длительности фаз светофора. А для оптимизации выбора длительности фаз использовались методы глубокого усиленного машинного обучения (Deep Reinforcement Learning) с использованием результатов имитационных экспериментов. На первом этапе обучение проводилось на базе более восьми тысяч экспериментов. Обученная на имитационной модели нейросетевая модель дает достаточно точные результаты работы, отличающиеся от имитационных результатов на 1,5-2%.

Архитектура инструмента программной реализации алгоритма с использованием ИИ, приведена на рис. 4.

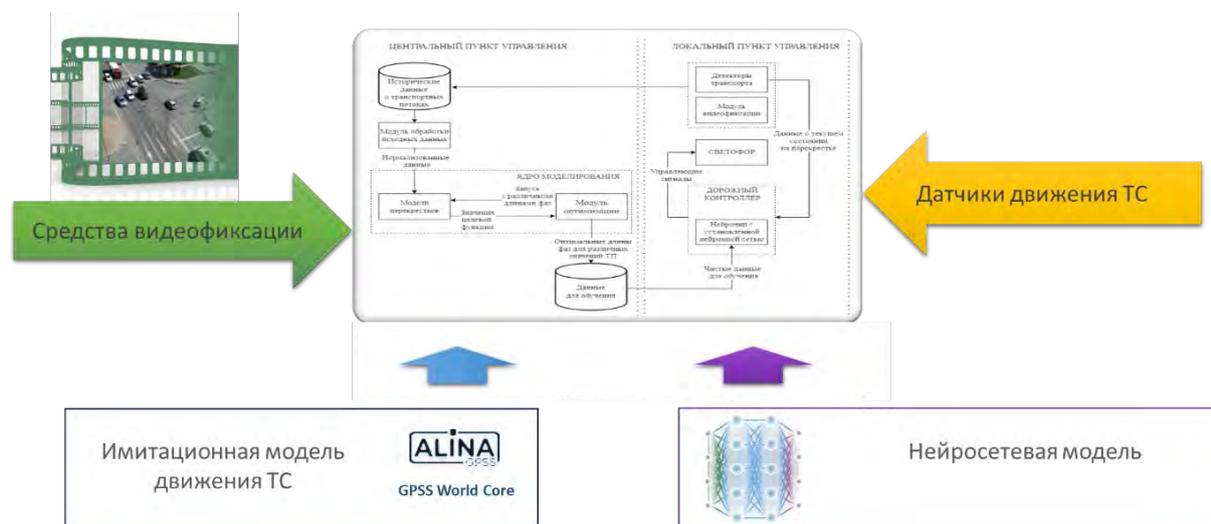


Рис. 4. Реализация адаптивного алгоритма управления ОДД на основе ИМ

В настоящий момент создан полнофункциональный программно-аппаратный макет всей технологии реализации алгоритма адаптивного управления ОДД с помощью ИМ и ИИ. Он проходит тестирование на реальном перекрестке в г. Казани.

В дальнейшем планируется усилить данное решение и превратить ее в реальную программную технологию доступную большинству транспортных инженеров за счет автоматизации следующих этапов работ:

- Построение соответствующей нейронной сети на основе имитационной модели перекрестка посредством не сложных манипуляций инженера с автоматической генерацией нейронной сети.
- Настройки параметров, планирование сценариев и проведение на имитационной модели необходимой и достаточной для обучения нейронной сети серии экспериментов.
- Реализации алгоритмов быстрого и автоматического обучения нейронной сети и при необходимости дополнительного ее обучения за счет проведения дополнительных экспериментов с моделью.
- Физического переноса нейросетевой модели на отдельный нейрочип или нейроморфный чип, что даст существенное снижение времени выработки управляющего решения для светофора (рис. 5).



Рис. 5. Этапы разработки адаптивного алгоритма управления ОДД

Заключение

Таким образом, в результате проведенных нами исследований рынка инструментов моделирования и практических разработок, можно выделить следующие текущие и перспективные тренды в развитии имитационного моделирования:

- Автоматизация имитационных исследований продолжается и показывает высокую эффективность уже проведенных работ. Создание САИИ приводит к расширению областей использования имитационного моделирования и значительному увеличению количества его пользователей.
- В дополнение к процессам интеграции этапов имитационного исследования, все более востребованными являются комплексные программные решения, включающие: работу с большими данными; связь с внешними автоматизированными системами, относящихся к моделируемому объекту по исходным данным и результатам моделирования.
- Среди практических применений все больший интерес пользователей представляет создание цифровых двойников управления сложными системами.
- Имитационное моделирование и искусственный интеллект взаимодополняют друг друга и позволяют получать принципиально новые решения, в частности в области оперативного управления.
- Имитационное моделирование является закрывающей технологией для интуитивного управления (Insight Driven), которая позволяет в практическом плане перейти от управления, основанного только на данных – к интуитивному управлению с помощью моделей, базируясь на достоверных данных.

Литература

1. Руководство пользователя по GPSS World / Пер. с англ. под общ. ред. В.В. Девяткова. – Казань: Мастер Лайн, 2002. – 384 с.
2. Официальный сайт компании AnyLogic Company – Режим доступа <http://www.anylogic.ru/> (дата обращения 28.09.2023).

3. Официальный сайт продукта ExtendSim компании Imagine That., Inc. (Сан-Хосе, Калифорния, США) – Режим доступа <http://www.extendsim.com> (дата обращения 28.09.2023).
4. Официальный сайт компании SIMIO LLC (США) – Режим доступа <http://www.simio.com/index.php> (дата обращения 28.09.2023).
5. **Девятков В.В.** Расширенный редактор GPSS World / В.В. Девятков, М.В. Федотов // Пятая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование, теория и практика»: сборник докладов. – СПб.: ОАО ЦТСС, 2011. – Т 1. – С. 350-354.
6. **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Девяткова. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 283 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680076 Российская Федерация. ALINA GPSS/ GPSS Studio : № 2021669832 : заявл. 07.12.2021 : опубл. 07.12.2021 / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Элина – Компьютер».
8. **Девятков В.В.** Развитие методологии имитационных исследований сложных экономических систем: автореф. дис. ... докт. экон. наук. – М.: Финансовый университет при правительстве Российской Федерации. – 2015.
9. **Девятков Т.В.** Методы и средства имитационного моделирования в задачах исследования и проектирования дискретно-событийных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Девятков Тимур Владимирович. – М., 2011. – 18 с.
10. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
11. **Кобелев Н.Б.** Основы имитационного моделирования сложных экономических систем / Н.Б. Кобелев. – М.: Дело, 2003. – 235 с.
12. ГОСТ Р 57700.37 – 2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК»
13. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
14. **Egorov I.N.** Robust design optimization strategy of IOSO technology / I.N. Egorov, G.V. Kretinin, I.A. Leshchenko // Proc. Fifth World Congress on Computational Mechanics. – Vienna, Austria. 2002. – P. 1–8.
15. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации»
16. Официальный сайт компании SWARCO (Австрия) – Режим доступа <https://www.swarco.com/> (дата обращения 28.09.2023).
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611294 Российская Федерация. Единая информационная модель сегмента улично-дорожной сети: № 2023610550: заявл. 18.01.2023: опубл. 18.01.2023 / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, Д. Н. Маряшина, М. В. Федотов; заявитель Республика Татарстан – субъект РФ, от имени которого выступает Государственное бюджетное учреждение «Безопасность дорожного движения».
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660098 Российская Федерация. GPSS World Core: № 2022619474: заявл. 25.05.2022: опубл. 30.05.2022 / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов, Ш. Д. Хайбуллин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Элина – Компьютер».