

Предварительная диспетчеризация встречного движения // на однополосном лесовозном участке //с оптимизацией по скользящему горизонту

Г. Э. Рого

Д. Ж. Корзун

О. Ю. Богоявленская

Аннотация

Рассматривается задача автоматического управления встречными потоками лесозаготовительной техники на протяжённом однополосном участке лесной дороги. Используя ранние заявки, назначаются длительности разрешающей фазы светофора и состав упорядоченного пакета транспортных средств. Разработана модель предварительной диспетчеризации св рамках, которой сформулированы безопасные стратегии планирования скользящего горизонта. Разработана имитационная модель управления встречным движением на однополосном участке. Сравнительный анализ, выполненный по 25 сценариям 14 стратегиям демонстрирует эффективность предварительной диспетчеризации с оптимизацией по скользящему горизонту. Разработана схема обмена данными между бортовыми модулями транспортных средств и управляющей системой осуществляется в рамках интеллектуальной среды интернета вещей. построена оценка средней пропускной способности, необходимой ее функционирования.

Ключевые слова: лесовозная дорога, однополосный участок, предварительная диспетчеризация, адаптивное светофорное управление, оптимизация по скользящему горизонту, упорядочивание транспортных средств, безопасное расписание, имитационное моделирование.

1 Введение

Лесные дороги обеспечивают вывоз древесины, перемещение специализированной техники и обслуживание лесосечных работ. В нормативном смысле лесные автомобильные дороги относятся к дорогам необщего пользования и предназначены для специализированных категорий транспортных средств [1]. Одновременно строительство и эксплуатация лесных дорог увеличивают стоимость лесопользования в целом и создают экологическую нагрузку: в частности, увеличивают эрозию почв, вызывают изменения водного режима, фрагментацию местообитаний и уплотнение грунтов [2, 3]. Поэтому для участков с низкой или переменной интенсивностью перевозок целесообразно и часто инженерно оправдано использовать однополосные участки с управляемым чередованием направлений.

В рамках моделирования такой системы протяжённый однополосный участок является общим конфликтным ресурсом. Встречные потоки транспорта конкурируют за право использования полосы, причём длительность занятия ресурса для лесовозной техники значительна и неоднородна. Классическая светофорная схема с фиксированным циклом не обеспечивает реакцию на всплески прибытия, снижение скорости из-за погодных условий, ограничение скорости и приоритеты в движении специализированных транспортных средств (ТС). Такая схема не позволяет предотвратить эпизоды встречного движения и контролировать объем использования карманов безопасности на дорогах, что в свою очередь приводит к существенному снижению пропускной способности системы в целом и, как следствие, к финансовым потерям лесозаготовителей

На практике также применяется диспетчеризация, где длительности фаз светофора пропорциональна текущим длинам очередей. Такая стратегия проста в реализации, повышает безопасность движения, но рассматривает очередь как уже сформированный физический порядок у стоп-линии и в условиях лесной местности требует участия персонала, оснащенного радиосвязью.

Таким образом актуальной является задача разработки методов автоматического управления очередью ТС на однополосном лесном участке, обеспечивающих адаптацию системы диспетчеризации к погодным условиям, индивидуальным свойствам и приоритетам ТС, поддерживающих работу беспилотных

ТС и/или снижающих нагрузку на персонал. Решение этой задачи позволит увеличить объем использования однополосных лесных дорог и, как следствие, снизить нагрузку на экосистемы и затраты на лесопользование.

В настоящее время проблемы интеллектуального управления трафиком являются предметом интенсивных исследований. В современном светофорном управлении различают фиксированные, актуированные и адаптивные стратегии. Современные обзоры подчёркивают, что адаптивные методы используют наблюдаемое состояние потока для оперативного изменения фаз [10, 11]. Для однополосных или односторонне используемых транспортных коридоров известно, что динамические правила и оптимизация могут уменьшать ожидание относительно периодических схем [9]. Широко используются методы линейного программирования, например [4], а также теория управляемых сетей [6]. Однако перечисленные выше факторы, специфические для однополосных лесных дорог требуют дальнейшего развития методов управления,

TBD ГЭ. Далее: что далее значит "близка"? Можно конкретизировать?

С точки зрения теории расписаний предварительная диспетчеризация близка к онлайн-планированию пакетов работ на общем ресурсе [22], а стратегия скользящего горизонта близка к идее повторной оптимизации на конечном прогнозируемом интервале [23].

В современной литературе широко применяются методы основанные на прогнозировании дорожной ситуации. В этих исследованиях интеллектуальные методы занимают две основных ниши.

- Оценка и прогнозирование объемов потока ТС и скорости их движения осуществляются методами видеоаналитики после чего полученные характеристики используются как параметры моделей в рамках, построенных в рамках теории расписаний, теории сетевых потоков, методов линейной оптимизации и некоторых других (см., например, [6]).
- Планирование фаз переключения светофора основывается на методах машинного обучения сетей, которые в процессе обучения получают награду за увеличение (уменьшение) некоторого интегрального параметра, характеризующего качество управления перекрестком (см., например, [?] — обучение с подкреплением, или [5] — сверточная нейронная сеть).

В настоящей работе используется интегрированный подход, учитывающий существующие аппаратные ограничения, а именно: отсутствие доступа к сетевой инфраструктуре и малые вычислительные мощности. Для прогнозирования объемов трафика ТС и управляющая система (УС) объединяются и интеллектуальную среду, основанную на методах интернета вещей по технологии подписка/публикация. Так, ТС передают заявку УС, до подъезда к стоп-линии, поэтому УС может воздействовать не только на длительность окна светофора, но и на состав пакета ТС, которому будет выдано разрешение. Водители или бортовые модули могут изменить длительность подхода к стоп-линии, занять разные позиции в зоне ожидания или быть перенесены на следующее окно. Такой режим будем называть предварительной диспетчеризацией. После фиксации окна состав и порядок пакета не меняются, а вновь поступившая заявка не может быть добавлена в уже сформированный пакет.

Для решения этой задачи в работе

1. Формализована модель предварительной диспетчеризации для однополосного лесовозного участка и разработана с[et]евая обмен данными. Построена оценка пропускной способности беспроводной сети, обеспечивающей обмена данными между ТС и УС.
2. Предложен безопасный планировщик окон, преобразующий упорядоченный пакет ТС в безопасное расписание проездов. Разработана стратегия RH_PRE_FULL, которая в режиме скользящего горизонта определяет направление окна, его длительность и порядок ТС в пакете.
3. Проведено имитационное моделирование, по результатам которого построен воспроизводимый протокол сравнения стратегий предварительной диспетчеризации со современной промышленной практикой. Показано, что предварительная диспетчеризация с совместной оптимизацией состава пакета и длительности фазы уменьшает целевой функционал по сравнению с предварительной пропорциональной FIFO диспетчеризацией при сохранении инвариантов безопасности и неизменяемости фиксированного пакета.

TBD ГЭ Суррогаты это нейросеть, которая требует меньше вычислений чем основная модель и обучается по результатам основной модели. Можно ли оценить вычислительную сложность эвристик и НС? Может быть составить сравнительную таблицу вычислительных сложностей? Это может помочь

мотивировать критику ННС.

2 Модель однополосной лесной дороги

2.1 Режим предварительной диспетчеризации

Рассмотрим изолированный однополосный участок длиной L , допускающий движение в двух направлениях $g \in \{\uparrow, \downarrow\}$. Встречное движение на участке запрещено. Допускается выпуск группы ТС одного направления с минимальным временным просветом s между стартами и, при необходимости, между выходами. На концах участка установлены регулирующие сигналы и зона ожидания, дающая возможность скорректировать подход к стоп-линии.

В регулярной практике ТС появляется в физической очереди в момент прибытия к стоп-линии. Порядок внутри направления фиксируется фактом прибытия, поэтому приоритетная или короткая по длительности заявка не может обогнать уже прибывшее ТС. В такой модели стратегия «светофор плюс очередь» является весьма эффективной: длины очередей, как правило, позволяют определить длительности фаз светофора, а более сложные регуляторы не имеют дополнительной управляющей степени свободы.

В режиме предварительной диспетчеризации ТС публикует заявку на проезд, содержащую набор его параметров, до физического прибытия к стоп-линии. Система управления выбирает упорядоченный пакет ТС, которым будет выдано разрешение. После фиксации окна порядок не меняется: если в окно назначен пакет $(1, 6, 9)$, то ТС, заявившееся позже момента фиксации, не может быть вставлено между ними даже при высоком приоритете. Это ограничение делает модель реализуемой и исключает неопределённые изменения уже выданных указаний.



Рис. 1: Предварительная диспетчеризация

ТВД ГЭ В рисунке есть наложение элементов. Блок зафиксированный пакет - тупик. Нужно развить абзац с описанием рисунка, следующий ниже.

На рис. 1 представлена основные элементы концепции предварительной диспетчеризации: заявки поступают до физической очереди, стратегия RH_PRE_FULL выбирает окно и упорядоченный пакет, а планировщик фиксирует пакет и запрещает поздние вставки.

2.2 Арихтектура обмена данными

Информационный контур обмена данными может быть реализован по модели публикации и подписки, что снижает требование жесткой связи между ТС, датчиками и управляющим модулем [18]. Для лесной

инфраструктуры в условиях отсутствия доступа к базовой сетевой инфраструктуре, ограничении вычислительных ресурсов и доминирования беспроводных каналов связи наличие гибкой схемы обмена данными имеет критическое значение. В частности, связь может быть нерегулярной, отдельные ТС вновь регистрируются или выходят из сети, а сведения, которыми располагает УС могут устареть. Технологически возможны как семантические информационные брокеры класса Smart-M3/M3 [20], так и облегчённые протоколы интернета вещей, например MQTT [19]. В данной статье фиксируется модель сообщений и ограничения на согласованность времени.

ТВД ДЖ Нужно ли явно ссылаться на МЗ или есть более новые технологии? Можно расширить этот абзац?

Ранняя заявка ТС имеет вид

$$\mathcal{M}_i^{\text{req}} = \langle i, b_i, g_i, r_i, c_i, \hat{v}_i, \underline{a}_i, \bar{a}_i, D_i, \theta_i \rangle, \quad (1)$$

где θ_i содержит технические атрибуты сообщения: временную метку, идентификатор источника и контроль целостности. Метеомодуль публикует сообщение

$$\mathcal{M}^W(t) = \langle t, W(t), \kappa(W(t)), \theta_W \rangle. \quad (2)$$

После фиксации окна публикуется план

$$\mathcal{M}_w^{\text{plan}} = \langle w, g_w, \tau_w, G_w, f_w, \pi_w, \theta_w \rangle, \quad (3)$$

а для каждого выбранного ТС — индивидуальное разрешение

$$\mathcal{M}_i^{\text{grant}} = \langle i, t_i, d_i, g_i, t_i^{\text{exp}}, \theta_c \rangle, \quad (4)$$

где t_i^{exp} — срок действия разрешения. Датчики въезда и выезда публикуют события $\mathcal{M}_i^{\text{stat}} = \langle i, e_i, t, \theta_e \rangle$, где $e_i \in \{\text{in}, \text{out}\}$.

Для корректности предварительной диспетчеризации важны три практических условия. Во-первых, временные метки должны быть приведены к единой шкале времени с погрешностью $\epsilon_t \ll s$. Во-вторых, запаздывающие сообщения не могут изменять уже зафиксированный пакет. В-третьих, при потере достоверного состояния система должна переходить в безопасный режим: запрещающие сигналы для обоих направлений до восстановления состояния или ручного управления.

Оценка средней пропускной способности, необходимой для работы системы имеет вид

$$B_{\text{net}} = 8(1 + \alpha_h) \sum_{m \in \mathcal{M}} f_m \lambda_m D_m \quad \text{бит/с}, \quad (5)$$

где D_m — размер полезной нагрузки сообщения типа m в байтах, f_m — среднее число получателей, λ_m — интенсивность сообщений, а α_h — относительная доля заголовков и повторных передач. Наличие интеллектуальной среды, в которой участвуют ТС, УС, светофоры и вспомогательные устройства позволяет УС прогнозировать ожидаемый уровень трафика и реализовывать стратегии планирования, представленные ниже, не прибегая к данным видео-аналитики.

2.3 Модель движения ТС и ограничения планирования

Пусть $\mathcal{V} = \{1, \dots, n\}$ — множество ТС на горизонте моделирования $[0, T]$. Для каждого ТС $i \in \mathcal{V}$ известны направление $g_i \in \{\uparrow, \downarrow\}$, момент публикации заявки b_i , запрошенный приоритет r_i , выданный приоритет p_i , класс c_i и оценка номинальной длительности проезда $\hat{v}_i$. В модели не используется скорость движения ТС, как независимая переменная управления. Она преобразуется в длительность проезда по L .

Заявка публикует допустимый интервал подхода к зоне регулирования

$$A_i = [\underline{a}_i, \bar{a}_i], \quad b_i \leq \underline{a}_i \leq \bar{a}_i, \quad (6)$$

где $\underline{a}_i$ — самый ранний момент, когда ТС физически может быть у стоп-линии, а $\bar{a}_i$ — поздний момент подхода без дополнительного ожидания в зоне накопления. Если ТС не включено в ближайший

пакет, оно может ожидать в зоне накопления или быть перенаправлено на следующий допустимый подход. Фактическая длительность нахождения на однопососном участке задаётся через номинальную длительность ν_i и погодный множитель $\kappa(W) \geq 1$:

$$d_i \geq \kappa(W(t_i)) \nu_i, \quad (7)$$

где t_i — назначенный момент входа ТС на участок.

Таблица 1: Основные обозначения модели предварительной диспетчеризации

Обозначение	Смысл
i	индекс транспортного средства;
g_i	направление движения ТС i , $g_i \in \{\uparrow, \downarrow\}$;
b_i	момент публикации ранней заявки;
$A_i = [a_i, \bar{a}_i]$	допустимый интервал подхода ТС i к стоп-линии;
r_i, p_i	запрошенный и выданный приоритет, большее значение означает большую значимость заявки;
$\nu_i, \hat{\nu}_i$	фактическая номинальная длительность проезда и её оценка;
d_i	длительность занятия однопососного участка ТС i в расписании;
t_i	назначенный момент входа ТС i на участок;
$W(t), \kappa(W)$	погодный режим и множитель длительности проезда;
s	минимальный временной просвет между ТС одного направления;
K_g	вместимость зоны предварительного накопления направления g . $K_g = \infty$ означает отсутствие ограничения;
w	индекс разрешающего окна;
g_w, τ_w, G_w	направление, начало и длительность окна w ;
f_w	момент фиксации окна w ; после f_w состав и порядок пакета не меняются;
$\pi_w = (i_{w1}, \dots, i_{wk_w})$	зафиксированный упорядоченный пакет ТС для окна w ;
$\mathcal{C}_w$	множество кандидатов, известных и допустимых к рассмотрению при фиксации окна w ;
D_i	желательный предельный срок обслуживания заявки, если он задан;
J	целевой функционал взвешенных задержек, хвоста и дополнительных штрафов.

Разрешающее окно светофора w задаётся тройкой (g_w, τ_w, G_w) , где g_w — направление, τ_w — начало, G_w — длительность. Окна встречных направлений не пересекаются и разделяются защитным интервалом $\delta \geq 0$:

$$[\tau_w, \tau_w + G_w) \cap [\tau_{w'}, \tau_{w'} + G_{w'}) = \emptyset \quad \text{для встречных последовательных окон,} \quad (8)$$

$$\tau_{w+1} \geq \tau_w + G_w + \delta. \quad (9)$$

Момент фиксации окна определяется как

$$f_w = \tau_w - \ell_w^{\text{freeze}}, \quad (10)$$

где $\ell_w^{\text{freeze}} \geq 0$ — горизонт предварительного уведомления. Если $\ell_w^{\text{freeze}} = 0$, модель вырождается в диспетчеризацию у стоп-линии. Чем больше ℓ_w^{freeze} , тем больше возможностей у ТС изменить подход, но тем выше требование к качеству прогноза прибытия.

Множество ТС, которые могут быть включены в пакет для окна w , имеет вид

$$\mathcal{C}_w = \{i \in \mathcal{V} : b_i \leq f_w, g_i = g_w, i \notin \mathcal{S}_{w-1}, i \notin \mathcal{L}_{w-1}, \text{feas}(i, w) = 1\}, \quad (11)$$

где $\mathcal{S}_{w-1}$ — множество обслуженных ТС, $\mathcal{L}_{w-1}$ — множество ТС, уже зафиксированных в будущих, но ещё не исполненных пакетах, а $\text{feas}(i, w)$ — предикат достижимости окна с учётом интервала подхода, зоны накопления и верхней оценки длительности проезда.

План окна определим как упорядоченную последовательность

$$\pi_w = (i_{w1}, \dots, i_{wk_w}), \quad i_{wr} \in \mathcal{C}_w, \quad i_{wr} \neq i_{wq} \ (r \neq q), \quad k_w \leq K_{g_w}. \quad (12)$$

После его фиксации применяется инвариант неизменяемости:

$$\pi_w(t) = \pi_w(f_w) \quad \forall t \geq f_w. \quad (13)$$

Следовательно, заявка с $b_i > f_w$ не может быть включена в окно w :

$$b_i > f_w \Rightarrow i \notin \pi_w. \quad (14)$$

Именно условия (13)–(14) отличают предварительную диспетчеризацию от нереалистической апостериорной перестановки очереди.

TBD ГЭ хорошо бы где-то при первом упоминании пояснить в чем именно ее нереалистичность. Видимо речь идет о параметрах зоны накопления? Или нет?

2.4 Условия безопасности расписания внутри окна

Пусть для окна w зафиксирован пакет $\pi_w = (i_{w1}, \dots, i_{wk_w})$. Назначенные моменты входа $t_{i_{wr}}$ должны удовлетворять ограничениям подхода, временных просветов и укладывания в окно:

$$t_{i_{wr}} \geq \underline{a}_{i_{wr}}, \quad (15)$$

$$t_{i_{wr}} + d_{i_{wr}} \leq \tau_w + G_w, \quad (16)$$

$$t_{i_{w,r+1}} \geq t_{i_{wr}} + s, \quad (17)$$

$$t_{i_{w,r+1}} + d_{i_{w,r+1}} \geq t_{i_{wr}} + d_{i_{wr}} + s. \quad (18)$$

Условие (18) регулирует неоднородные длительности проезда: более быстрое ТС не должно сократить выходной просвет относительно предыдущего. Для встречных направлений главный инвариант безопасности задаётся как

$$[t_i, t_i + d_i] \cap [t_j, t_j + d_j] = \emptyset, \quad \forall i, j : g_i \neq g_j. \quad (19)$$

Лемма 1 (Корректность фиксируемого окна). *Если окна удовлетворяют (8)–(9), а каждый зафиксированный пакет исполняется с ограничениями (15)–(18), то расписание удовлетворяет инварианту (19). Если дополнительно выполняются (13)–(14), то ни одна поздно поступившая заявка не может изменить состав или порядок уже зафиксированного окна.*

Доказательство. Каждый интервал проезда ТС содержится внутри окна своего направления по (16). Окна встречных направлений не пересекаются по (8), а соседние окна разделяются защитным интервалом (9). Следовательно, интервалы проезда встречных направлений не пересекаются. Ограничения (17) и (18) сохраняют минимальный просвет внутри пакета одного направления. Неизменяемость пакета непосредственно следует из (13). Запрет включения заявок с $b_i > f_w$ следует из (14) и определения множества кандидатов (11). $\square$

Для сравнения стратегий используется скалярный функционал

$$\begin{aligned} J = & \sum_{i \in \mathcal{S}} p_i(t_i - \underline{a}_i) + \lambda_{\text{tail}} \sum_{i \in \mathcal{B}} p_i \psi_i^{\text{tail}} + \lambda_{\text{prio}} \sum_{i \in \mathcal{S}} \phi_i^{\text{prio}} + \lambda_D \sum_{i \in \mathcal{S}} [t_i + d_i - D_i]_+ \\ & + \lambda_{\text{sw}} N_{\text{sw}} + \lambda_{\text{max}} \max_{i \in \mathcal{S}} (t_i - \underline{a}_i) + \lambda_{\text{risk}} \sum_{i \in \mathcal{S}} \rho_i^{\text{dur}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь $\mathcal{S}$ — множество обслуженных ТС, $\mathcal{B}$ — необслуженный остаток, ψ_i^{tail} — прогнозный штраф за оставление ТС i в остатке к концу горизонта, ϕ_i^{prio} — штраф за задержку приоритетных заявок, $[z]_+ = \max\{z, 0\}$, D_i — желательный предельный срок обслуживания, N_{sw} — число переключений направления, а ρ_i^{dur} — штраф за риск недооценки длительности проезда. **В базовой серии ???**Т ермин появляется впервые??? вес осттка выбран существенно ненулевым, чтобы снизить потенциал стратегия уменьшать среднюю задержку обслуженных ТС за счёт накопления не обслуженной очереди.

TBD ГЭ Здесь, как мы договаривались, нужен абзац, поясняющий экономическое значение каждого из элементов функционала. Здесь же фраза о том, что цель стратегии - минимизировать функционал, так?

3 Стратегии управления

3.1 Базовые стратегии

Все стратегии, описанные ниже, используют единый безопасный планировщик окон, в котором различаются только правила выбора направления, длительности окна и порядка ТС. В описании имитационных экспериментов используются следующие обозначения.

QP_FIFO. Очередь у стоп-линии без предварительной диспетчеризации. Внутри направления порядок ТС определяется физическим прибытием.

QP_PRE_FIFO. Заявка ТС поступает заранее, но порядок ТС в пакете определяется по ожидаемому времени похода. Это стратегия считается базовой при проведении сравнения стратегий.

QP_WSPT. Порядковая эвристика по правилу взвешенного кратчайшего времени обработки (Weighted Shortest Processing Time, WSPT): выше ставятся заявки с большим отношением приоритета к безопасной длительности проезда.

QP_AGING. Эвристика старения: вес заявки растёт с числом переносов, что снижает риск систематического роста времени ожидания.

PACK_ORDER. Эвристика плотной упаковки окна, предпочитающая пакеты, которые лучше заполняют доступную длительность окна.

RH_PRE_NO_REORDER. Скользящий горизонт без перестановок внутри направления.

RH_PRE_ORDER_ONLY. Скользящий горизонт с выбором порядка при фиксированной фазовой логике.

RH_PRE_FULL. Полная стратегия скользящего горизонта: совместный выбор направления, длительности окна и порядка ТС.

Нечётко-нейронные реализации стратегий. NFC_PHASE_ONLY, NFC_SCORE_ORDER_V2, NFC_SAFE_META, NFC_RH_DISTILLED_V2 и гибриды с RH. Они проверяют возможность заменить оптимизацию быстрым обучаемым суррогатом.

Таблица 2: Сводное сравнение стратегий по управляющим возможностям и экспериментальному статусу

Стратегия	Ранние заявки	Управление порядком	Совместная оптимизация окна	Статус по результатам V3
QP_FIFO	нет	нет	нет	физическая FIFO-база. Нужна как нижний практический уровень без предварительной диспетчеризации;
QP_PRE_FIFO	да	нет	частично	основная практическая база: использует ранние заявки, но сохраняет FIFO-порядок по ожидаемому подходу;
QP_WSPT, QP_AGING, PACK_ORDER	да	да	нет	сильные порядковые эвристики; показывают, какая часть выигрыша объясняется самой возможностью предварительного порядка;
RH_PRE_NO_REORDER	да	нет	да	проверяет вклад скользящего горизонта без перестановки ТС внутри направления;
RH_PRE_ORDER_ONLY	да	да	частично	проверяет вклад выбора порядка при ограниченной фазовой логике;
RH_PRE_FULL	да	да	да	основной положительный результат: устойчиво лучше QP_PRE_FIFO, но только умеренно лучше апостериорной лучшей эвристики;
Нечётко-нейронные суррогаты	да	да/частично	нет	отрицательный результат: в текущей реализации уступают QP_PRE_FIFO и не заменяют RH_PRE_FULL.

Таблица 2 демонстрирует принципиальное отличие предварительной диспетчеризации новой постановки от распространенной на практике схемы управления «светофор плюс очередь». Без ранних заявок планировщику доступны только сведения о физической очереди у стоп-линии, где порядок ТС уже нельзя изменить без дополнительной инфраструктуры. Предварительная диспетчеризация добавляет управляющую степень свободы — выбор состава и порядка следования ТС в пакете до подъезда к стоп-линии. Поэтому сравнительный анализ RH_PRE_FULL только с фиксированным таймером или физической FIFO-очередью был бы неполным. Основная проверка проводится относительно QP_PRE_FIFO и семейства порядковых эвристик.

3.2 Оптимизация по скользящему горизонту

Стратегия RH_PRE_FULL работает как повторная конечно-горизонтная оптимизация. В момент фиксации ближайшего окна известны текущее состояние, уже зафиксированные будущие окна, необслуженные заявки и прогноз заявок на горизонте H . Стратегия решает задачу

$$U^* \in \arg \min_{U \in \mathcal{U}(x(t), H)} J_H(x(t), U), \quad (21)$$

где $x(t)$ — состояние системы, U — последовательность решений для ближайших окон, $\mathcal{U}(x(t), H)$ — множество решений, удовлетворяющих ограничениям достижимости, вместимости и фиксации, а J_H — прогнозный функционал на горизонте H . После решения применяется только первое окно из U^* . Затем состояние обновляется по фактическим событиям, и оптимизация повторяется. Такой принцип уменьшает чувствительность к ошибкам прогноза и позволяет учитывать новые заявки только в не зафиксированных окнах.

Общее решение задачи (21) комбинаторно сложно: требуется выбрать направление, длительность и

TBD ГЭ Комбинаторно сложно - это устоявшийся термин? Если нет, нужно пояснить или может быть просто дать оценку.

упорядоченную подпоследовательность кандидатов. Поэтому в реализации используется ограниченный перебор с отсечениями: кандидаты предварительно ранжируются по достижимости, длительности, приоритету, числу переносов и риску опоздания. Далее строится ограниченное число допустимых пакетов, каждый проверяется безопасным планировщиком, а оставшиеся варианты оцениваются по величине J_H . Важное методологическое свойство заключается в запрете оценивать вариант, нарушающий (13) или (14). Следовательно, выигрыш RH_PRE_FULL не является результатом не реализуемой перестановки уже выданных планов.

TBD ГЭ Дальше часто используется термин "хвост". Можно его уточнить, конкретизировать так как формально не ясно какую часть очереди можно считать хвостом?

3.3 Методы имитационного исследования. Цели и гипотезы

В рамках проведенных имитационных экспериментов были проверены четыре основные гипотезы.

1. **H1: корректность фиксации и безопасность.** Для всех стратегий число нарушений встречной безопасности, поздних вставок и мутаций зафиксированного плана равно нулю.
2. **H2: практический выигрыш RH_PRE_FULL.** На тестовых сценариях RH_PRE_FULL уменьшает J относительно QP_PRE_FIFO. Практически значимый успех считается выполненным при выигрыше не менее $p\%$ в сценарии без ухудшения хвоста очереди.
3. **H3: сравнение с сильными эвристиками.** RH_PRE_FULL должен быть не хуже апостериорной лучшей порядковой эвристики. Сильный практический результат требовал бы среднего выигрыша не менее $p\%$.
4. **H4: проверка обучаемых суррогатов.** Нечётко-нейронные и мета-политические суррогаты должны хотя бы не уступать QP_PRE_FIFO.

TBD ГЭ, ДЖ Абзац о выборе значения процента p и его влиянии на экономическую эффективность.

При проведении имитационного моделирования длительности **проезда?** синтезируются логнормально:

$$\nu_i \mid c_i = c \sim \text{LogNormal}(\mu_c, \sigma_c^2), \quad (22)$$

где μ_c и σ_c — параметры распределения логарифма длительности для класса c . Для промышленной калибровки они должны оцениваться по наблюдаемым длительностям проезда. Робастная первичная оценка разброса может быть получена через медианное абсолютное отклонение (Median Absolute Deviation, MAD) [21].

Основные ограничения проведенного численного анализа следующие:

- имитационный характер результатов. Для тестирования промышленной реализации необходимы реальные распределения ранних заявок, длительностей проезда, ошибок оценки подхода, погодных множителей, потерь связи и поведения водителей при получении диспетчерских указаний. Отметим, что в работе [4] также особо отмечена проблема обучения водителей работе в новых условиях. Объединение ТС и УС в интеллектуальную среду позволяет использовать как полностью беспилотные комплексы, так и дистанционной управляемые ТС.
- Модель зоны накопления определяется параметром вместимости. На реальной дороге допустимость предварительного порядка зависит от геометрии площадки, правил движения, видимости, радиосвязи и дисциплины выполнения указаний.
-

Тем не менее результаты проведенного имитационного моделирования позволяют провести сравнительный анализ стратегий планирования, описанные выше и оценить ряд их существенных свойств.

3.4 Сценарии, стратегии и метрики

Вычислительный имитационный эксперимент включает 63 840 реализаций: 25 сценариев, 14 стратегий и три типа разбиения. Обучающая часть содержит 8 сценариев по 120 повторов, валидационная часть — 5 сценариев по 120 повторов, тестовая часть — 12 ранее не использованных сценариев по 250 повторов. В таблице 3 приведены тестовые сценарии, по которым формулируются основные выводы.

Таблица 3: Тестовые сценарии V3: параметры, важные для проверки предварительной диспетчеризации

Код	Содержание	Нагрузка	CV_L	медл., %	приор., %	ℓ^{freeze}, c	K
S1	медленный блокирующий ТС	1.20	0.55	35	0	120	8
S2	волна заявок с предельными сроками	1.10	0.35	10	30	120	8
S3	погодный фронт	1.05	0.45	20	10	180	8
S4	ограниченная зона накопления	1.10	0.50	30	15	120	2
S5	неограниченная зона накопления	1.10	0.50	30	15	120	∞
S6	ошибка прогноза подхода	1.05	0.40	20	20	120	8
S7	короткое предварительное уведомление	1.05	0.45	20	20	30	8
S8	длинное предварительное уведомление	1.05	0.45	20	20	300	8
S9	смена доминирующего направления	1.15	0.45	25	10	120	8
S10	смешанный стресс-сценарий	1.15	0.55	25	25	120	4
S11	приоритетные заявки за медленными ТС	1.05	0.50	25	35	120	8
S12	контроль без выигрыша от перестановки	1.10	0.10	0	0	120	8

Для каждого сценария все стратегии получают одни и те же реализации случайного потока заявок, длительностей, погоды и ошибок прогноза.

Основная метрика — значение функционал J из (20), для которой меньшее значение считается лучшим. Также фиксировались средняя задержка, 95-й и 99-й проценти задержки, число необслуженных ТС в очереди, коэффициент заполнения окон, число пропущенных слотов, число переносов, среднее время расчёта решения, число нарушений безопасности, число поздних вставок и число мутаций зафиксированного плана.

Для произвольной стратегии A относительно базы B относительный выигрыш определяется как

$$\Delta(A, B) = 100 \frac{J_B - J_A}{J_B} \%. \quad (23)$$

Положительное значение означает преимущество стратегии A . Для каждой пары стратегий вычисляется разность эквивалентных метрик по одинаковым случайным реализациям, строится 95% доверительный интервал, а для множественных сравнений применяется поправка Холма. Флаг строгого успеха требует: положительный выигрыш не ниже порога сценария, положительной нижней границы доверительного интервала, статистическая значимость после поправки Холма и отсутствие деградации (в смысле роста??) хвоста очереди.

4 Экспериментальные результаты

Во всех 63 840 реализациях число нарушений встречной безопасности равно нулю. Также не обнаружено поздних вставок в уже зафиксированные окна и мутаций состава или порядка пакета после момента фиксации. Это не является главным сравнительным преимуществом RH_PRE_FULL, потому что все стратегии проходили через один и тот же проверяющий планировщик. Следовательно, безопасность является обязательным свойством архитектуры, см. таб. 4

Таблица 4: Проверка инвариантов по всем сериям V3

Группа	Строк	Сценариев	Стратегий	Макс. нарушений
Обучение	13 440	8	14	0
Валидация	8 400	5	14	0
Тест	42 000	12	14	0
Итого	63 840	25	14	0

Агрегированное сравнение стратегий по 12 тестовым сценариям приведено в таблице 5. Наименьшее среднее значение J имеет RH_PRE_FULL. Практическая база QP_PRE_FIFO занимает второе место среди простых методов планирования и существенно превосходит QP_FIFO. Так введение предварительной диспетчеризации уменьшает среднее значение J более, чем на 15.0%, а RH_PRE_FULL дополнительно уменьшает его относительно QP_PRE_FIFO, что продемонстрировано на рис. 2

Таблица 5: Агрегированное сравнение стратегий

Стратегия	J	сред. задержка	P_{95}	хвост	заполн. окна	расчёт, мс
RH_PRE_FULL	216 614	53.5	146.1	20.57	0.423	1.267
QP_PRE_FIFO	236 187	55.8	146.3	21.64	0.415	0.041
RH_PRE_ORDER_ONLY	238 256	53.4	145.6	22.17	0.413	0.080
NFC_PHASE_ONLY	238 863	55.6	146.6	21.89	0.412	0.041
NFC_RH_DISTILLED_V2	242 115	53.0	145.1	22.52	0.408	0.081
NFC_SAFE_META	245 563	42.8	130.1	22.42	0.405	0.610
QP_FIFO	277 916	92.5	160.9	25.24	0.317	0.038

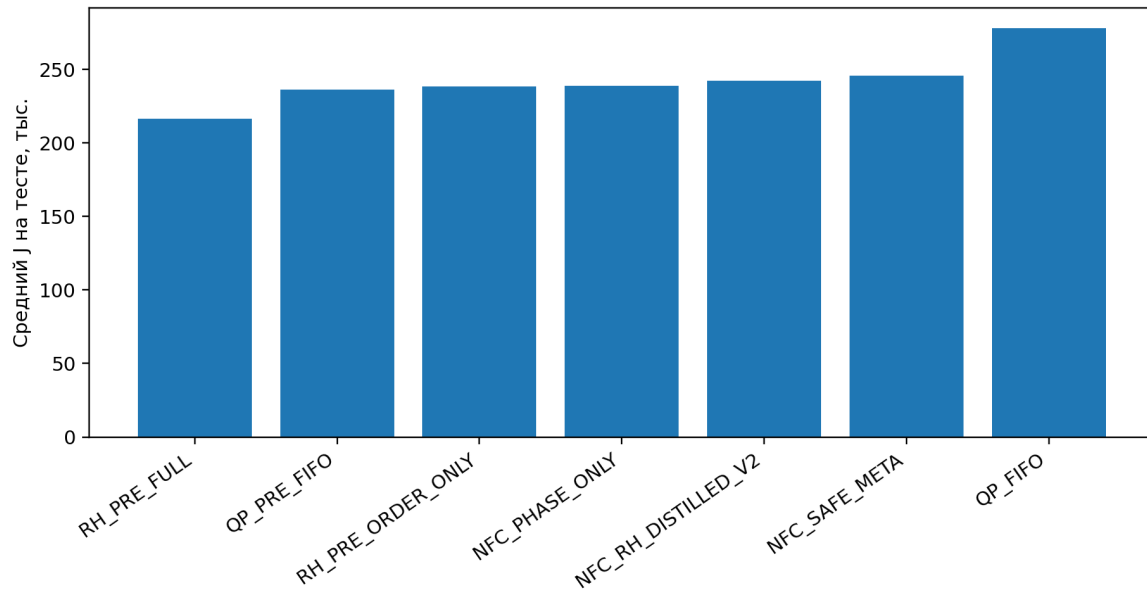


Рис. 2: Средний функционал J по тестовым сценариям для ключевых стратегий.

NFC_SAFE_META не означает хорошего результата: эта стратегия оставляет большой хвост, а хвостовой компонент доминирует в J . Поэтому сравнение только по средней задержке обслуженных ТС методологически недостаточно. Для данной задачи принципиально важно учитывать **необслуженный хвост?**.

ТВД ГЭ Не очень понятно, если малое время ожидания, то откуда большой хвост? Эта мысль также появляется в последующей части статьи. Можно это как-то уточнить?

Основная успешная серия показана в таблице 6. Выигрыш RH_PRE_FULL относительно QP_PRE_FIFO имеет положительные значения во всех 12 тестовых сценариях. Средний сценарный выигрыш равен 8.224%, медианный — 7.409%. Нижняя граница 95% доверительного интервала положительна во всех сценариях, а значение после поправки Холма меньше 0.05 во всех сценариях. Строгий критерий успеха выполнен в 10 из 12 сценариев, исключения — S8 и S12, где выигрыш положителен, но ниже заранее установленного порога практической значимости, который был выбран $p = 5\%$.

ГЭ, ДЖ Нужно как-то мотивировать почему 5%?

Таблица 6: Парное сравнение RH_PRE_FULL с QP_PRE_FIFO на тесте

Код	Семейство	ΔJ , %	95% ДИ, %	Δ хвоста, %	успех
S1	медленный блокирующий ТС	13.347	[11.943; 14.750]	11.174	да
S2	предельные сроки	7.290	[6.165; 8.416]	4.057	да
S3	погодный фронт	6.450	[5.484; 7.415]	3.474	да
S4	$K = 2$	7.528	[6.753; 8.302]	1.563	да
S5	$K = \infty$	11.594	[10.163; 13.026]	6.768	да
S6	ошибка подхода	7.058	[5.919; 8.198]	3.642	да
S7	короткое уведомление	8.600	[7.378; 9.822]	4.892	да
S8	длинное уведомление	4.952	[3.895; 6.009]	2.718	нет
S9	смена направления	8.612	[7.304; 9.919]	5.388	да
S10	смешанный стресс	6.319	[5.336; 7.302]	3.151	да
S11	приоритет за медленным ТС	13.386	[11.809; 14.963]	8.387	да
S12	контроль без неоднородности	3.551	[2.836; 4.266]	1.630	нет
Среднее	—	8.224	—	4.737	10/12

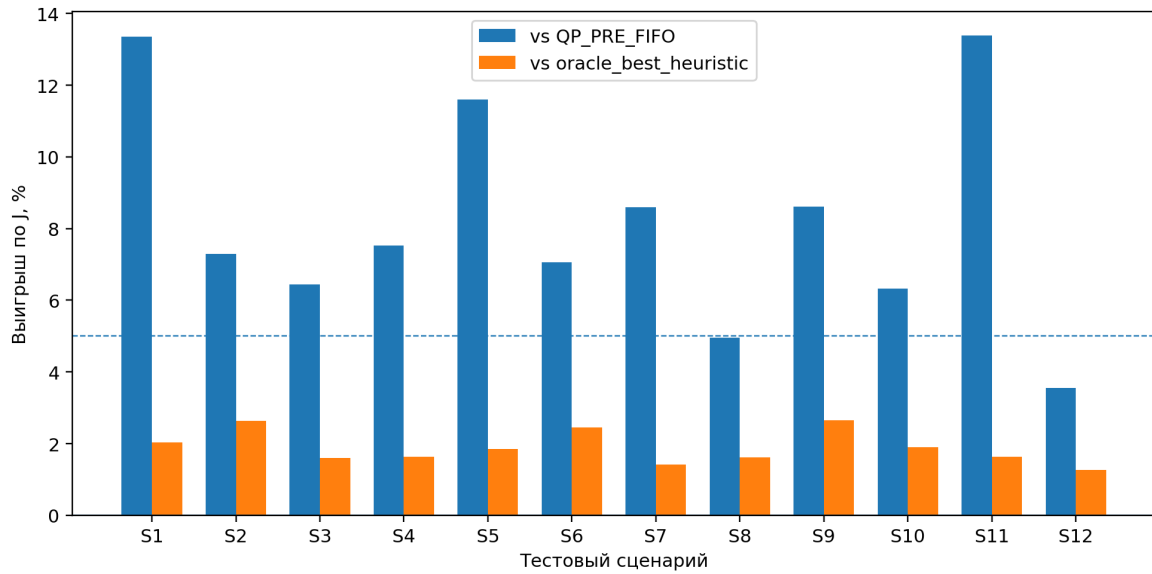


Рис. 3: Относительный выигрыш RH_PRE_FULL по J относительно QP_PRE_FIFO и апостериорной лучшей эвристики. Пунктирная линия соответствует порогу 5%.

Наибольший выигрыш наблюдается в сценариях S1 и S11: медленные ТС блокируют более эффективное заполнение окна, а предварительная диспетчеризация позволяет выбрать пакет до того, как физическая очередь сделает порядок необратимым. Это подтверждает центральную гипотезу: преимущество появляется там, где длина очереди не является достаточным параметром описания потребности в ресурсе.

4.1 Сравнение стратегий с апостериорной лучшей эвристикой

Для каждого сценария выбирался лучший результат среди фиксированных порядковых эвристик. Такое сравнение показывает, превосходит ли RH_PRE_FULL не только одну практическую базу, но и семейство простых правил.

Результат здесь положителен в формальном смысле, но имеет умеренное практическое значение. Средний выигрыш RH_PRE_FULL равен 1.890%, медианный — 1.741%, нижняя граница 95% доверительного интервала положительна во всех сценариях, но порог 5% не достигнут ни в одном сценарии. Следовательно, нельзя утверждать, что RH_PRE_FULL существенно превосходит весь класс порядковых эвристик. Оптимизация по скользящему горизонту стабильно улучшает практическую предварительную FIFO-базу и немного превосходит апостериорную лучшую эвристику, но её дополнительная ценность над хорошо подобранными простыми правилами ограничена.

Таблица 7: RH_PRE_FULL относительно апостериорной лучшей эвристики

Показатель	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум
Выигрыш по J , %	1.890	1.741	1.269	2.644
Положительных сценариев			12 из 12	
Положительных нижних границ 95% ДИ			12 из 12	
Значимых сравнений после поправки Холма			12 из 12	
Строгий успех при пороге 5%			0 из 12	

4.2 Нейронные суррогаты с нечеткой логикой

Также было проведено исследование возможностей использования нейронных сетей с нечеткой логикой как суррогатов или мета-политики для замены исходных оптимизационных моделей. Результаты отрицательны. NFC_SAFE_META относительно QP_PRE_FIFO имеет средний выигрыш -5.890% , положительный результат получен только в 1 из 12 сценариев и нулевой строгий успех. Относительно апостериорной лучшей

эвристики его средний результат равен -13.724% . NFC_RH_DISTILLED_V2 также не достигает успеха: средний результат относительно QP_PRE_FIFO равен -5.455% , а относительно RH_PRE_FULL — -15.141% . Полное описание результатов приведено в таб. 8

Таблица 8: Итог для обучаемых суррогатов на тестовой части

Стратегия и база	Средний выигрыш, %	Положит.	95% ДИ > 0	успех
NFC_SAFE_META vs QP_PRE_FIFO	-5.890	1/12	1/12	0/12
NFC_SAFE_META vs апост. лучшая эвристика	-13.724	0/12	0/12	0/12
NFC_RH_DISTILLED_V2 vs QP_PRE_FIFO	-5.455	1/12	1/12	0/12
NFC_RH_DISTILLED_V2 vs RH_PRE_FULL	-15.141	0/12	0/12	0/12

При текущих признаках и процедуре обучения он чаще ухудшает хвост даже если иногда уменьшает среднюю задержку обслуженных ТС. Поэтому в данной работе нечётко-нейронный компонент следует трактовать как проверенное, но неудачное направление аппроксимации RH_PRE_FULL.

Анализ результатов по отдельным слагаемым J (декомпозиция) показывает, что основной вклад в целевой функционал даёт **необслуженный хвост**. Для QP_PRE_FIFO средняя длина хвоста 230 159, для RH_PRE_FULL — 210 163. Именно уменьшение хвоста объясняет основной выигрыш RH_PRE_FULL. Средняя задержка обслуженных ТС при этом меняется мало, а в отдельных стратегиях даже может выглядеть лучше при худшем J за счёт роста длины очереди.

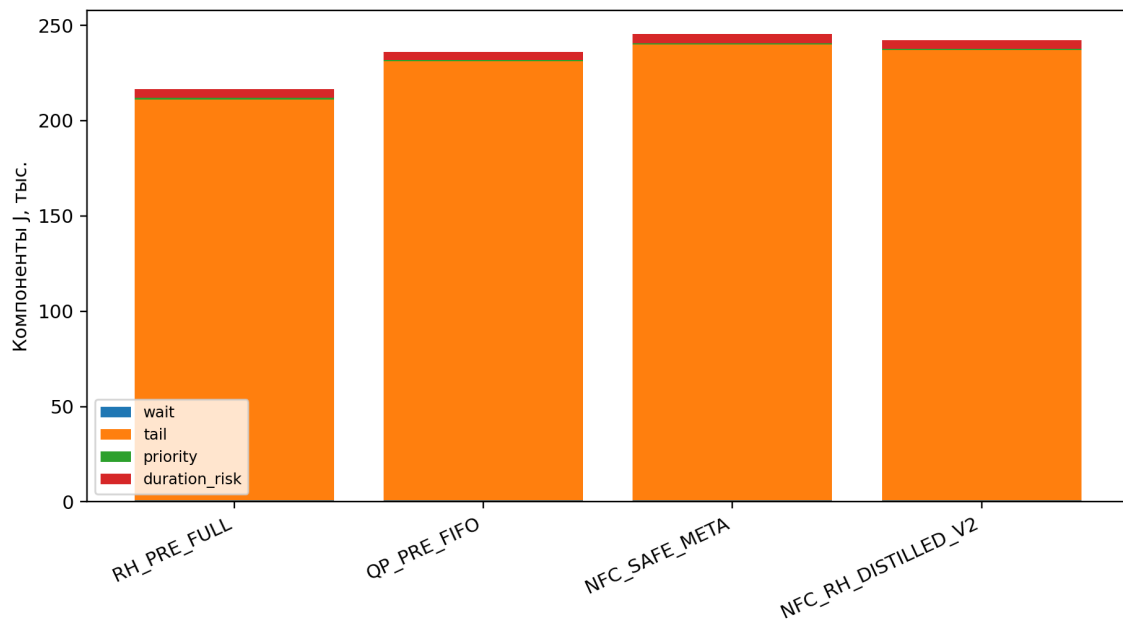


Рис. 4: Средняя декомпозиция J по основным компонентам на тестовой части.

Этот вывод имеет практическое значение: для однополосного протяжённого участка нельзя оценивать стратегию только по задержке уже обслуженных ТС. Стратегия, которая обслуживает «удобные» заявки и оставляет длинный хвост, будет выглядеть привлекательной по среднему ожиданию, но ухудшать работу системы в целом.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что предварительная диспетчеризация с оптимизацией по скользящему горизонту даёт устойчивый выигрыш относительно практической базы QP_PRE_FIFO. В отличие от физической FIFO-очереди, система использует ранние заявки и может сформировать пакет до подъезда ТС к стоп-линии. В отличие от простых порядковых эвристик, RH_PRE_FULL позволяет совместно учитывать длительность окна, направление, состав пакета, порядок ТС, вместимость зоны накопления и прогноз на ближайший горизонт. Поэтому стратегия даёт значительный выигрыш при

наличии медленных блокирующих ТС, приоритетных заявок за медленными ТС, смене доминирующего направления и неограниченной или достаточной зоне накопления.

Сравнение с апостериорной лучшей эвристикой демонстрирует средний выигрыш 1.890%. Это означает, что значительная часть эффекта достигается самой возможностью предварительной диспетчеризации и "разумного" порядкового правила. Поэтому RH_PRE_FULLL является устойчиво лучшей стратегией относительно практической предварительной FIFO-базы и статистически, но умеренно, превосходит апостериорную лучшую эвристику.

5 Заключение

Предложена модель предварительной диспетчеризации встречного движения на однополосном лесовозном участке. В отличие от обычного светофорного управления у стоп-линии, ТС заранее публикуют заявки и допустимые интервалы подхода, а управляющая система фиксирует состав и порядок пакета до начала окна. После фиксации поздние заявки не могут изменить уже назначенный порядок, что делает постановку реализуемой и отличает её от нереалистической перестановки физической очереди.

Разработан ряд стратегий управления встречным движением и проведен их сравнительный анализ на основе имитационной модели. Показано, что стратегия RH_PRE_FULLL, которая совместно выбирает направление, длительность окна и порядок ТС по принципу скользящего горизонта на 12 тестовых сценариях уменьшает функционал J относительно QP_PRE_FIFO в среднем на 8.224%. Выигрыш положителен во всех сценариях, статистически значим после поправки Холма во всех сценариях, а строгий критерий практического успеха выполнен в 10 из 12 сценариев. Относительно апостериорной лучшей эвристики выигрыш составляет 1.890%, что статистически устойчиво, но ниже порога сильной практической значимости.

Список литературы

- [1] СП 288.1325800.2016. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. Утв. приказом Минстроя России от 16.12.2016 № 952/пр.
- [2] Caliskan E. Environmental impacts of forest road construction on mountainous terrain. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 2013. Vol. 10. Article 23. DOI: 10.1186/1735-2746-10-23.
- [3] Boston K. The potential effects of forest roads on the environment and mitigating their impacts. *Current Forestry Reports*. 2016. Vol. 2. No. 4. P. 215–222. DOI: 10.1007/s40725-016-0044-x.
- [4] Valuev, A.M., Solovyev, A.A. (2021). Traffic Intelligent Control at Multi-section Crossroads of the Road Networks. In: Hu, Z., Petoukhov, S., He, M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education IV. AIMEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1315. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-67133-4-31>.
- [5] Юмаганов А.С., Агафонов А.А., Мясников В.В. Адаптивное управление сигналами светофоров на основе обучения с подкреплением, инвариантное к конфигурации светофорного объекта // Компьютерные исследования и моделирование. — 2024, —Т. 16, № 5. —С. 1253-1269. 001:10.20537/2076-7633-2024-16-5-1253-1269
- [6] Дивеев А. И., Софронова Е. А., Михалев В. А. Нейроадаптивное управление транспортными потоками в сети городских дорог // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2018. №1 (118). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyroadaptivnoe-upravlenie-transportnymi-potokami-v-seti-gorodskih-dorog> (дата обращения: 26.06.2026).
- [7] Обучение с подкреплением для управления тройного перекрестка Nguyen Canh, Thanh and Tuan, Anh and Hoangvan, Xiem. (2023). Design of Deep Reinforcement Learning Approach for Traffic Signal Control at Three-way Crossroads. 10.21203/rs.3.rs-3128875/v1.

- [8] Матвейко А.П. и др. Технология и оборудование лесосечных и лесоскладских работ. Минск: БГТУ, 2005.
- [9] Ebben M., van der Zee D.-J., van der Heijden M.C. Dynamic one-way traffic control in automated transportation systems. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2004. Vol. 38. No. 5. P. 441–458. DOI: 10.1016/S0191-2615(03)00075-4.
- [10] Qadri S.S.S.M., Gokce M.A., Oner E. State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European Transport Research Review*. 2020. Vol. 12. Article 55. DOI: 10.1186/s12544-020-00439-1.
- [11] Eom M., Kim B.-I. The traffic signal control problem for intersections: a review. *European Transport Research Review*. 2020. Vol. 12. Article 50. DOI: 10.1186/s12544-020-00440-8.
- [12] Araghi S., Khosravi A., Creighton D. A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing. *Expert Systems with Applications*. 2015. Vol. 42. No. 3. P. 1538–1550. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.09.003.
- [13] Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. SMC-15. No. 1. P. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
- [14] Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993. Vol. 23. No. 3. P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541.
- [15] Jafari S., Shahbazi Z., Byun Y.-C. Improving the road and traffic control prediction based on fuzzy-logic and neural network approaches. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. No. 16. Article 2832. DOI: 10.3390/math10162832.
- [16] Agarwal M., Maze T.H., Souleyrette R. Impact of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity. Iowa State University, Center for Transportation Research and Education, 2005.
- [17] Chen C., Zhao X., Liu H., Ren G., Zhang Y., Liu X. Assessing the influence of adverse weather on traffic flow characteristics using a driving simulator and VISSIM. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. No. 3. Article 830. DOI: 10.3390/su11030830.
- [18] Eugster P.T., Felber P.A., Guerraoui R., Kermarrec A.-M. The many faces of publish/subscribe. *ACM Computing Surveys*. 2003. Vol. 35. No. 2. P. 114–131. DOI: 10.1145/857076.857078.
- [19] OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard, 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>.
- [20] Viola F., D’Elia A., Korzun D., Galov I., Kashevnik A., Balandin S. The M3 architecture for smart spaces: overview of semantic information broker implementations. Proceedings of FRUCT. 2016.
- [21] Rousseeuw P.J., Croux C. Alternatives to the median absolute deviation. *Journal of the American Statistical Association*. 1993. Vol. 88. No. 424. P. 1273–1283. DOI: 10.1080/01621459.1993.10476408.
- [22] Pinedo M.L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 5th ed. Springer, 2016.
- [23] Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Nob Hill Publishing, 2017.