

# Модель клеточного автомата маневрирования транспортного средства в потоке

Степан А. Базров, Антон С. Алёшкин

**Аннотация**— Управление городскими транспортными сетями является важной задачей, влияющей на многие аспекты жизни современного города. Для оптимизации транспортных потоков города, для выявления критичных мест и для выработки рекомендаций к управлению транспортной сетью требуется проводить сбор данных о дорожном трафике, а, после формирования гипотезы о возможном улучшении ситуации, требуется проводить моделирование движения транспорта. Одним из подходов к подобной симуляции может быть подход с использованием правил клеточного автомата для симуляции движения отдельного автомобиля. В данной работе рассматривается построение клеточного автомата от его элементарной линейной версии (имеющий наименование «Правило 184»), до расширенной версии, учитывающей маневрирование нескольких участников дорожного движения.

В статье описан порядок формирования правил для клеточного автомата моделирования движения автомобиля, с учётом возможного маневрирования в потоке и координации движения нескольких транспортных средств (за счёт возможностей кооперативного перестроения). В качестве базовых правил использованы механизмы контроля безопасной скорости, формирования предпочтительного перестроения и учёт возможных состояний, когда несколько участников взаимно-блокируют движение друг друга. Разработанные правила позволяют спроектировать клеточный автомат для моделирования движения автомобиля с возможностью маневрирования в потоке и координации движения нескольких транспортных средств (за счёт возможностей кооперативного перестроения).

**Ключевые слова**—Клеточный автомат, моделирование движения, транспортная сеть.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современная среда обитания человека включает в себя много сложных и взаимосвязанных компонент, одной из которых является транспортная или дорожная сеть города. Управление городскими транспортными сетями является важной задачей, влияющей на многие аспекты жизни современного города. Высокие темпы строительства, сосредоточение жизненной активности в городах, развитие автотранспортной промышленности, — все это приводит к возникновению огромных

автомобильных потоков, движущихся в условиях уже сформированной (и, потому, ограниченной) дорожной инфраструктуры. В таких условиях неизбежен дефицит дорожного пространства, что приводит к возникновению заторов на дорогах, а далее к потерям времени, к экономическим потерям, а также увеличенным выбросам вредных веществ в атмосферу планеты.

Транспортная сеть города является сложной динамической системой, со многими участниками движения (легковые и грузовые автомобили, персональный транспорт, такой как самокаты и велосипеды и прочие участники дорожного движения), со многими компонентами дорожной сети (дороги, выделенные дороги, платные дороги, дороги с изменяющимися во времени характеристиками, сложные дорожные развязки, динамически управляемые светофоры и обычные (неуправляемые) светофоры, шлагбаумы) и с перспективой появления на городских улицах полностью автономного транспорта: такие системы становятся сложнее с каждым годом. С целью оптимизации транспортных потоков города, выявления наиболее критичных мест и выработки рекомендаций по улучшению управления транспортной сетью требуется проводить аналитическую работу по сбору больших данных о дорожном трафике, а после формирования гипотезы о возможном улучшении ситуации требуется проводить моделирование движения транспорта в городской дорожной сети. Отметим, что для решения подобной задачи существует множество систем и решений[1], однако все они ещё далеки от совершенства.

Одной из базовых задач моделирования движения в городской транспортной сети является задача моделирования поведения единичного транспортного средства и организация взаимодействия транспортных средств в рамках дорожной сети. Необходимо понимание правил движения для одного из участников процесса, которое можно масштабировать до многих копий, для создания симуляций транспортных потоков нужного объёма. Одним из подходов к подобной симуляции может быть подход с использованием правил клеточного автомата для симуляции движения. В данной работе мы рассмотрим построение клеточного автомата от его элементарной линейной версии (имеющий наименование «Правило 184») до расширенной версии, учитывающей маневрирование нескольких участников дорожного движения.

Статья получена 01 марта 2023.

С.А. Базров, студент МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия (e-mail: bazrovstepan@gmail.com).

А.С. Алёшкин, доцент кафедры КБ-3 «Безопасность программных решений», МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия (e-mail: antony@testor.ru).

## II. КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Рассматривая различные решения и подходы к моделированию автомобильного движения нельзя не рассмотреть одномерный бинарный клеточный автомат «правило 184» (CA-184). Значение 184 – это десятичное представление бинарной формы  $184_{10} = 10111000_2$  записи нового состояния ячейки, которая может быть занята или свободна, если предшествующее состояние было одним из predetermined значений (см. Таблицу I). Для дорожного движения рассматривается текущее состояние участка дороги (центральное значение), состояние перед ним и состояние позади рассматриваемого участка. Выглядит правило следующим образом (в зависимости от текущего состояния соседей задаётся значение текущей центральной ячейки (см. Таблицу I).

Машина на дороге занимает "ячейку" свободного пространства, двигаясь по своему маршруту - автомобиль движется вперед, если на пути (маршруте) есть свободное место, и, останавливается, если место занято. Движение по собственному маршруту является некоторым упрощением, позволяющим вывести моделируемые автомобили на моделируемую дорожную сеть. При этом мы считаем, что автомобиль заранее (в процессе движения) знает свой маршрут и последующие перестроения. Едет по правилам дорожного движения: не останавливается на перекрестках, учитывает скоростной режим, следит за возможными перестроениями.

Таблица I. Правила перехода CA-184

Текущее состояние ячеек	111	110	101	100	011	010	001	000
Новое состояние (центральной) ячейки	1	0	1	1	1	0	0	0

Достоинствами данного метода являются простота и скорость моделирования. Можно указать, что модель транспортного потока по правилу 184 уже предсказывает некоторые особенности реального дорожного движения: скопления движущихся автомобилей, разделенных участками свободной дороги, когда движение не столь плотное, и возникающие волны движения "стоп-энд-гоу" движения, когда оно интенсивное.

Недостатками является дискретность данной модели. В ней не учитываются скоростные параметры движения, из-за чего нельзя задать различные параметры движения для различных объектов, различных состояний движения. Обычно, для увеличения степени подобия симуляции, базовая модель по правилу 184 усложняется и расширяется, хотя, данное правило всё равно остаётся определяющим схему движения.

Рассматривая правило 184 в качестве модели дорожного движения, естественно учитывать среднюю скорость транспортных средств. Когда плотность движения составляет менее 50%, эта средняя скорость равна просто одной единице расстояния в единицу

времени: после стабилизации системы ни один автомобиль никогда не замедляется. Однако, когда плотность составляет число  $\rho$ , большее чем  $1/2$ , то, средняя скорость движения равна  $(1-\rho)/\rho$ . Таким образом, система демонстрирует кинетический фазовый переход второго порядка при  $\rho = 1/2$ . Когда правило 184 интерпретируется как модель дорожного движения и начинается при случайной конфигурации, плотность которой находится на этом критическом значении  $\rho = 1/2$ , тогда средняя скорость приближается к своему стационарному пределу как квадратный корень из числа шагов. Вместо этого, для случайных конфигураций плотность которых не достигает критического значения, приближение к предельной скорости является экспоненциальным.

Отметим, что, по нашему мнению, величина  $\rho$  должна рассчитываться исходя из порога перколяции транспортной сети, который в свою очередь связан с её структурой, в частности с такими характеристиками как плотность связей (среднее число связей в сети в расчете на один узел) [2].

Усложнённые правила движения ориентируются на параметры движения автомобиля, такие как ускорение, торможение, максимальная скорость и прочие собираемые и контролируемые параметры. Для моделирования движения каждый автомобиль последовательно выполняет следующие правила:

1. Ускорение:

$$V_n \rightarrow \min(V_n + 1, V_{max}).$$

2. Торможение, для уклонения от столкновений:

$$V_n \rightarrow \min(V_n, GAP_n).$$

3. Рандомизация (флуктуация) скорости с какой-то заданной вероятностью  $p$ :

$$V_n \rightarrow \max(V_n - 1, 0).$$

4. Собственно движение или перемещение автомобиля:

$$X_n \rightarrow X_n + V_n.$$

Данный набор правил используется во многих источниках и решениях [1,3-7], и, является основой для развития модели движения автомобиля.

## III. ПРИМЕРЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ

Отталкиваясь от «правила 184» (CA-184) исследователи разработали множество различных транспортных клеточных автоматов более сложного вида[3-7]: клеточный автомат Фукуи-Ишимбаши (DFI-TCA), клеточный автомат Нагеля-Шрекенберга (STCA), с дополнением по круиз контролю (STCA-CC), стохастический клеточный автомат Фукуи-Ишимбаши (SFI-TCA), полностью асимметричный простой процесс исключения (TASEP), клеточный автомат Эммириха-Ранга (ER-TCA), клеточный автомат Такаюсу-Такаюсу T2-TCA, рандомизация зависящая от скорости (VDR-TCA), версия автомата с круиз контролем (VDR-CC-TCA), клеточный автомат ориентированный на время (TOCA), многоячеечный стохастический клеточный автомат (MC-STCA), модель Нагеля-Шрекенберга (HS-

ТСА), автомат стоп-сигналов (BL-TCA), автомат Кернера, Кленова и Вольфа (KKW-TCA) и многие другие.

В рамках данной работы мы рассмотрим подход построения клеточного автомата для моделирования транспортного потока с большим количеством однотипных автомобилей. Для того чтобы приблизиться к параметрам естественного движения в базовую модель движения необходимо добавить правила маневрирования, которые затрагивают движения на многополосной дороге и возможные перестроения. Для этого автомобиль проходит следующие шаги [4, 5]:

1) Вычисление предпочтительной полосы для движения

- Возможность продолжения маршрута без выполнения перестроения
- Расстояние (время) до следующего препятствия

2) Вычисление безопасных скоростей при нахождении в текущей полосе

3) Определение необходимости смены полосы движения (влево, вправо, остаться)

4) Выбор движения: ЛИБО Выполнение маневра по смене полосы движения, ЛИБО продолжение движения в текущей полосе движения.

*А. Стратегии перестроения при выполнении маневрирования*

Рассматривая более детально решения, которые ведут к смене полосы движения, можно выявить следующие предпосылки для выполнения маневра:

1) *Стратегическое перестроение.* Смена полосы выполняется для продолжения движения по маршруту (например, перестроение влево для поворота).

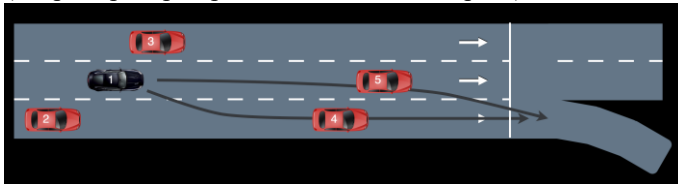


Рисунок 1. Управляемый автомобиль (1, чёрный) должен повернуть направо для продолжения своего маршрута.

На рисунке 1 рассмотрена ситуация, когда ведомый автоматом автомобиль должен сменить полосу для продолжения маршрута. При этом возможны два варианта поведения для выполнения маневра: автомобиль может либо сменить полосу позади впереди идущего автомобиля (с торможением или без него), либо обогнать автомобиль и занять полосу перед ним. Поскольку в нашем случае транспортные средства однотипные мы можем учитывать текущую скорость впереди идущего автомобиля и расстояние на безопасное выполнение маневра. Более легким с вычислительной точки зрения является решение о перестроении позади автомобиля со снижением (вероятно) скорости.

2) *Кооперативное перестроение.* Другой предпосылкой для выполнения маневра является цель помочь другому автомобилю перестроиться на свою полосу. В модели автомобиля средства могут информировать другие автомобили о том, что они

являются блокирующими для автомобиля-последователя (причина в том, что поворотники блокируемого автомобиля видны следующей машине, в то время как получение информации об этой видимости для блокирующей лидирующей машины - менее очевидно). Если нет стратегических причин против смены полосы движения, то управляемый автомобиль может изменить направление движения в любом возможном направлении для того, чтобы освободить место для заблокированного автомобиля.

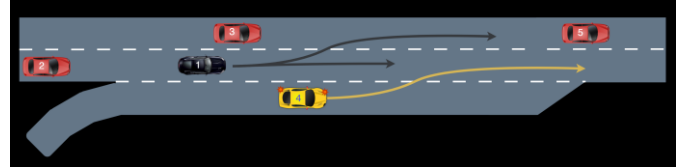


Рисунок 2. Управляемый автомобиль (1, чёрный) получает уведомление о перестроении автомобиля впереди (4, желтый) и может также принять решение о выполнении маневра (или о продолжении движения в текущей полосе, возможно со сбросом скорости).

3) *Тактическая смена полосы движения.* Такая смена полосы движения относится к маневрам, при которых автомобиль пытается избежать следования за медленным лидером. Это требует ожидаемого прироста скорости при смене полосы движения, но с учётом приложенных усилий по смене полосы движения (что, возможно, является очень субъективной оценкой для водителя). Ожидаемый прирост скорости также должен быть в балансе с обязательством, что полоса для обгона сохранится свободной во время выполнения маневра. Невыполнение этого требования приводит к ситуациям, когда медленные транспортные средства с незначительной разницей в скорости становятся серьезными препятствиями для всего транспортного потока. На рисунке 3 показана ситуация, в которой может произойти тактическая смена полосы движения.

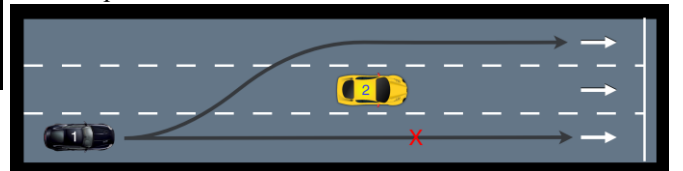


Рисунок 3. Управляемый автомобиль (чёрный) быстрее, чем ведущий автомобиль (желтый).

Из ситуации на рисунке 3 понятно, что чтобы предотвратить замедление, управляемый автомобиль может повернуть влево, чтобы обогнать своего лидера. Поскольку обгон справа запрещен, то для выполнения маневра обгона необходимо две смены полосы движения.

4) *Изменения полосы движения, диктуемые правилами.* На дорогах с правосторонним вождением левая полоса (или полосы) обозначаются как полосы для обгона. Водители обязаны освобождать эту полосу всякий раз, когда они не используют ее для маневра обгона и у них есть такая возможность. Обязательство освободить полосу для обгона можно было бы сформулировать как часть кооперативного перестроения, поскольку это помогает другим более быстро движущимся транспортным средствам. Однако,

в отличие от перестроений при совместном изменении полосы движения, которое является необязательным, перестроение, диктуемое правилами дорожного движения, обязательно к выполнению.

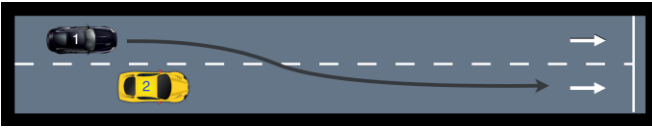


Рисунок 4. Управляемый автомобиль (1, чёрный) заканчивает маневр обгона. После завершения маневра ему требуется выполнить предписания ПДД: вернуться в правую свободную полосу.

Для принятия решения о перестроении необходимо: определить важность перестроения (выбрать маневр), выбрать безопасные скоростные режимы и разрешить возможные блокировки при выполнении маневра. Рассмотрим подробнее принципы определения необходимости совершения маневра.

#### В. Определение срочности маневра

Приближаясь к полосе с тупиком (блоком движения), автомобиль имеет возможность выбора: продолжать ли следовать стратегически целесообразной (маршрутной) полосе (которая может включать смену полосы или остановку) или последовать другим мотивам. Срочность, важность и необходимость следования стратегическим требованиям (т.е. поворот налево, если наилучшая полоса для движения определяется как значение  $< 0$ , и поворот направо, если наилучшая полоса для движения определяется как значение  $> 0$ ) определяется следующими факторами:

- оставшееся расстояние до тупика (негативная корреляция)
- предполагаемая скорость при приближении к концу тупиковой полосы движения (скорость движения вперед)
- значение для выбора наилучшей полосы для дальнейшего движения
- занятость на текущей конечной целевой полосе (при этом наилучшая полоса движения определена как  $= 0$ , текущая полоса)
- занятие промежуточной целевой полосы (следующая цель в направлении движения к выбранной наилучшей полосе движения)

Стратегическое изменение полосы движения при этом считается срочным, если верно следующее соотношение:

$$d - o < V_n \cdot \text{abs}(\text{bestLineOffset}) \cdot f$$

где

$d$  — расстояние до конца полосы, тупика (в метрах)

$o$  — это дельта расстояния, необходимая на маневр занятия выбранной полосы

$V_n$  — Прогнозируемая скорость движения, которая зависит от текущего и предыдущих значений скорости транспортного средства.

$\text{bestLineOffset}$  — Наилучшая полоса для движения.

$f$  — является параметром, учитывающим время, которое обычно необходимо для выполнения успешного маневра смены полосы.  $f$  устанавливается эмпирически, например в 10 с для изменения полосы влево и 20 с для изменения полосы вправо.

Отметим, что если между текущей полосой движения и конечной целевой полосой имеется несколько

маневров со сменами полос движения, то все необходимые маневры также должны иметь оценочное значение по расстоянию и необходимому времени, однако, в настоящее время мы не будем оценивать эти дополнительные маневры в целях оптимизации вычислений.

Время, в которое прогнозируется достижение конца полосы с тупиком, делится на количество необходимых смен полосы движения ( $\text{bestLineOffset}$  — наилучшая полоса для движения), чтобы получить доступное на маневры время и определить возможность их выполнения.

#### С. Управление скоростью для смены полосы движения

Всякий раз, когда смена полосы движения не может быть выполнена из-за блокирования полосы другими транспортными средствами, управляемое транспортное средство может отрегулировать свою скорость таким образом, чтобы обеспечить успешную смену полосы движения на последующих циклах. Кроме того, автомобиль может оказывать влияние на скорости блокирующих автомобилей (в реальности это происходит из-за реакции водителей на сигналы поворота, которые включает транспортное средство). В связи с важностью завершения стратегических изменений полосы движения, предполагается, что управляемый автомобиль проведет корректировки скорости, чтобы обеспечить возможность маневра. В принципе, считается, что автомобили будут двигаться с максимальной безопасной скоростью, поэтому скорость можно регулировать только в сторону уменьшения. Однако, как часть модели следования за автомобилем, — автомобили могут иметь стохастический компонент, который мешает им использовать максимально возможное ускорение. Предотвращение такой стохастичности — является способом увеличить скорость транспортного средства.

Для вычисления желаемой регулировки скорости выделяют целую иерархию ситуаций путем сравнения запланированной скорости моделируемого транспортного средства, скорости блокирующего транспортного средства, длины пути и оставшегося времени:

##### Ситуация 1. Лидер блокирует движение

а. Управляемый автомобиль способен обогнать лидера: мы просим лидера воздержаться от ускорений, не допускаем своего торможения (также, не допускаем обгона справа, там, где это запрещено законом).

б. Лидера обогнать не удаётся (не успеваем)

i. Сбавим скорость, чтобы оставаться позади лидера

ii. Сохраняем скорость, так как лидер движется быстрее

Ситуация 2. Лидер не блокирует движение: устанавливаем максимальную скорость, но так, чтобы расстояние до лидера оставалось достаточно большим и безопасным.

Ситуация 3. Лидера нет: мы движемся с максимальной безопасной скоростью.

И вторая часть дерева решений, где мы проверяем наличие следующего за нами автомобиля (преследователя):

Ситуация 4. Преследователь блокирует движение

а. Сможем вклиниться раньше преследователя

i. Есть время, чтобы выполнить маневр с текущими скоростями: просим преследователя воздержаться от ускорений, чтобы не мешать маневру.

ii. Преследователю нужно замедлиться, чтобы открыть брешь: просим преследователя замедлиться настолько, насколько это необходимо, для совершения нашего маневра

б. Нужно, чтобы преследователь обогнал нас

i. Преследователь должен немного замедлиться, чтобы увеличить вероятность того, что последующие машины будут достаточно медленными: просим преследователя немного замедлиться.

ii. Преследователь должен быстро нас обогнать: не позволяем преследователю медлить, сбавим скорость, чтобы нас обогнали достаточно быстро.

с. Преследователь не может обогнать справа: просим преследователя сбавить скорость, при этом скорость должна превышать минимальный порог.

Ситуация 5. Преследователь не блокирует движение: просим преследователя поддерживать скорость, чтобы не блокировать нам маневр.

Ситуация 6. Преследователя нет: двигаемся с максимальной безопасной скоростью.

#### D. Предотвращение взаимоблокировок

Если автомобилю необходимо остановиться на полосе, в тупике, из-за того, что переход на нужную полосу не удался, это создает нежелательное препятствие для транспортного потока. Однако, если двум автомобилям на соседних полосах необходимо перестроиться на полосу, занятую другим автомобилем (маневр встречной смены полосы движения), и оба автомобиля уже достигли тупика (конца полосы), – то возникает взаимоблокировка в маневрах. Ни один автомобиль не имеет возможности двигаться дальше и не может получить пространства, необходимого для выполнения стратегической смены полосы движения (в реальной жизни возможно освобождение места путём движения задним ходом на некоторое расстояние, но данное движение обычно не моделируется). Такая ситуация блокирует движение по обеим полосам и крайне нежелательна.

Чтобы предотвратить подобный затор, особое внимание уделяется ситуации, когда два автомобиля находятся в режиме встречной смены полос движения. Можно называть автомобиль, который находится ближе к концу полосы – блокирующим лидером, а другой автомобиль – блокирующим последователем. Обратите внимание, что это соотношение может меняться при переходе от одного кванта моделирования к другому. Как правило, блокирующий последователь замедляется при приближении к тупику, чтобы убедиться, что у блокирующего лидера достаточно места для завершения маневра смены полосы движения. В некоторых случаях

блокирующий последователь едет слишком быстро или блокирующий лидер слишком длинный. В таких случаях блокирующий лидер должен замедлиться, чтобы оставить достаточно места на выполнение маневра для последователя до достижения конца полосы.

Другая ситуация с блокировками может возникать, когда автомобилям необходимо выполнить стратегическую смену полос движения через несколько полос. В этом случае ситуация с изменением встречной полосы движения может возникнуть в тот момент, когда оба автомобиля уже зашли в конец полосы и не могут двигаться дальше. Чтобы предотвратить эту ситуацию, автомобили резервируют дополнительное пространство перед окончанием полосы всякий раз, когда им приходится сдвигаться более чем на одну полосу движения. В настоящее время дополнительное пространство в 20 м зарезервировано для автомобилей, которым необходимо повернуть направо, более чем на одну полосу, и 40 м для автомобилей, которые хотят перестроиться влево, более чем на одну полосу движения. Асимметрия необходима для предотвращения еще одного типа взаимоблокировок.

#### IV. ИТОГОВЫЕ ПРАВИЛА КЛЕТЧНОГО АВТОМАТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОМОБИЛЯ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Объединяя рассмотренный выше подходы, в качестве итоговых правил работы клеточного автомата управляющего движением выделим следующие шаги:

1) Определение маршрута, достижимости следующего шага маршрута, текущих параметров движения

$$car = \{route, V_n, X_n, currentLine\} \quad (1)$$

2) Вычисление предпочтительной полосы для движения

2.1) Учет необходимости стратегического перестроения

2.2) Учет кооперативного перестроения

2.3) Учет тактической смены полосы движения

2.4) Необходимость смены полосы согласно ПДД

$$bestLineOffset = \begin{cases} -1, & \text{перестроение влево} \\ 0, & \text{текущая полоса} \\ 1, & \text{перестроение вправо} \end{cases} \quad (2)$$

2) Вычисление безопасных скоростей при нахождении в текущей полосе, в предпочтительной полосе

2.1) Произвольное снижение-увеличение скорости в рамках безопасных границ и ограничений (добавление стохастического поведения)

$$V_n = \begin{cases} \min(V_n + 1, V_{max}), & \text{ускорение} \\ \min(V_n, GAP_n), & \text{препятствие} \\ \max(V_{max} - 1, V_n), & \text{флуктуации} \end{cases} \quad (3)$$

3) Определение маневра, или частичного маневра при смене полос(ы) движения (влево, вправо, остаться)

$$currentLine = currentLine + bestLineOffset \quad (4)$$

4) Перемещение автомобиля

4.1) Выполнение маневра по смене полосы движения, или

4.2) Продолжение движения в текущей полосе движения, если маневр не выполнялся

$$X_n = X_n + V_n \quad (5)$$

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные правила позволяют спроектировать клеточный автомат для моделирования движения автомобиля с возможностью маневрирования в потоке и координации движения нескольких транспортных средств (за счет возможностей кооперативного перестроения). Описаны шаги клеточного автомата (1)-(5) и показаны действия, которые выполняются разработанными правилами. Отметим, что в настоящее время для реализации систем автономного вождения и взаимодействия транспортных средств наиболее часто применяются технологии тренировки и использования нейронных сетей, что требует накопления большого массива обучающих данных и большого числа расчетных часов для подготовки параметров нейронной сети (проведения обучения). С другой стороны, предложенное решение может быть использовано в большом классе задач, где моделирование движения выполняется детерминировано. Предложенное решение позволяет построить транспортную модель города, в котором поведение транспортных средств поддается контролю и, в определенной степени, предсказуемо.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] P. A. Lopez *et al.*, "Microscopic Traffic Simulation using SUMO," *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 2018, pp. 2575-2582, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [2] Lesko, Sergey & Alyoshkin, A. & Zhukov, Dmitry. (2020). Reliability Analysis of the Air Transportation Network when Blocking Nodes and/or Connections Based on the Methods of Percolation Theory. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 714. 012016. 10.1088/1757-899X/714/1/012016.
- [3] Кретов А. Ю. Классификация моделей клеточных автоматов. Основные правила // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-modeley-kletochnyh-avtomatov-osnovnye-pravila> (дата обращения: 21.02.2023).
- [4] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2004). Non-concave fundamental diagrams and phase transitions in a stochastic traffic cellular automaton. *European Physical Journal B*. 42. 10.1140/epjb/e2004-00365-8.
- [5] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2005). Cellular Automata Models of Road Traffic. *Physics Reports*. 419. 10.1016/j.physrep.2005.08.005.
- [6] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2005). *Traffic Flow Theory*. Physics. 1.
- [7] Shinkarev A.A. Traffic flow model based on cellular Automation with adaptive deceleration // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/traffic-flow-model-based-on-cellular-automation-with-adaptive-deceleration> (дата обращения: 21.02.2023).

# Cellular automaton model for maneuvering a vehicle in a stream

Stepan A. Bazrov, Anton S. Aleshkin

**Abstract—** The management of urban transport networks is an important task that affects many life aspects for a modern city. To optimize the traffic flows of the city, to identify critical places and to develop recommendations for the management of the transport network, it is necessary to collect data on road traffic, and, after forming a hypothesis about a possible improvement in the situation, it is necessary to carry out traffic simulations. One of approaches to such simulations may be an approach with used the rules of a cellular automaton to simulate the motion of an individual car. This paper considers the construction of a cellular automaton from its elementary linear version (called "Rule 184", or CA-184), to an extended version that considers the maneuvering of several road users.

The article describes the procedure for forming rules for the cellular automaton of modeling the movement of the car, considering the possible maneuvering in the flow and coordination of the movement of several vehicles (due to the possibilities of cooperative line changing). As basic rules, mechanisms for controlling safe speed, forming a preferred rearrangement and considering possible states, where several participants mutually block each other's movement. The developed rules make it possible to design a cellular automaton for simulating the movement of a car with the ability to maneuver in the flow and coordinate the movement of several vehicles (due to the possibilities of cooperative line changing).

**Keywords—**Transport cellular automaton, TCA, movement simulation, transport network.

## About authors —

**Stepan Bazrov**, master-student at the Institute for Cybersecurity and Digital Technologies of MIREA - Russian Technological University (MIREA, MGUPI, MITHT, VNIITE, RosNIIT and AP, IPK of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation), Moscow, Russia. Currently works on final qualifying work named "Development of autonomous driving simulation software".

**Anton Aleshkin**, Ph.D. of Technical Science, currently employed as the associate professor for the Institute for Cybersecurity and Digital Technologies of MIREA - Russian Technological University (MIREA, MGUPI, MITHT, VNIITE, RosNIIT and AP, IPK of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation), Moscow, Russia. The present research is focused on Computer Science, computer and transport networks and mathematical modelling with percolation theory. Anton takes research about Smart Cities and transport behavior in it. His papers appeared in Mathematics, Journal of Physics, Russian Technological Journal, and some conference proceedings.

## REFERENCES

- [1] P. A. Lopez et al., "Microscopic Traffic Simulation using SUMO," 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, USA, 2018, pp. 2575-2582, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [2] Lesko, Sergey & Alyoshkin, A. & Zhukov, Dmitry. (2020). Reliability Analysis of the Air Transportation Network when Blocking Nodes and/or Connections Based on the Methods of Percolation Theory. IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, 714. 012016. 10.1088/1757-899X/714/1/012016.
- [3] Kretov A. U. Classification of cellular automata models. Main rules (In Russian) // News of TulGU. Technical sciences. 2012. Vol 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-modeley-kletochnyh-avtomatov-osnovnye-pravila> (Accessed: 21.02.2023).
- [4] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2004). Non-concave fundamental diagrams and phase transitions in a stochastic traffic cellular automaton. European Physical Journal B. 42. 10.1140/epjb/e2004-00365-8.
- [5] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2005). Cellular Automata Models of Road Traffic. Physics Reports. 419. 10.1016/j.physrep.2005.08.005.
- [6] Maerivoet, Sven & De Moor, Bart. (2005). Traffic Flow Theory. Physics. 1.
- [7] Shinkarev A.A. Traffic flow model based on cellular Automation with adaptive deceleration // Bulletin of SUSU. Series: Computer technologies, control, radio electronics. 2016. Vol 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/traffic-flow-model-based-on-cellular-automation-with-adaptive-deceleration> (Accessed: 21.02.2023).