

УДК 621.879.31

# МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТРАСС МАРШРУТОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

**В.Н. Богумил**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 125319, Москва Ленинградский проспект, 64  
E-mail: v\_bogumil@mail.ru

**Х.М. Элдиба**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 125319, Москва Ленинградский проспект, 64  
E-mail: hossameldiba@gmail.com

**Д.Э. Касимов**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 125319, Москва Ленинградский проспект, 64  
E-mail: kasimov.jalil@yandex.ru

**Ключевые слова:** пространственная цифровая модель трассы маршрута, транспортные средства с высокой степенью автоматизации управления, роботизированная система управления, безопасность и комфорт перевозок, кинематические и динамические ограничения системы управления.

**Аннотация:** В статье рассматриваются методические вопросы повышения безопасности дорожного движения на основе роботизации функций управления движением транспортных средств. Область применения предлагаемой методики ограничена транспортными средствами автомобильного транспорта, имеющими специальную технологическую задачу, а именно движение по заранее заданному маршруту. Предложена методика разработки пространственной цифровой модели трасс маршрутов движения в которой отдельные участки трасс моделируются с использованием теории кривых Безье третьего порядка. Показано, что использование данного аналитического подхода позволяет оценить величину кривизны кривой на каждом участке трассы и, таким образом оценить предельные значения скорости движения на участке.

## 1. Введение

Анализ статистики дорожно-транспортных происшествий в России и зарубежных странах показывает, что принятые меры по повышению безопасности дорожного движения оказались успешными, что позволило снизить аварийность на автомобильном транспорте. Однако достижение нулевой смертности на автомобильном транспорте, как показал опыт зарубежных стран, невозможно только с помощью мер,

предусмотренных стратегией. Даже при полном выполнении вышеперечисленных мер имеют место факторы непредсказуемости поведения водителя и несовершенство его психофизических качеств [1]. Эти особенности не позволят достичь уровня смертности, близкого к нулю, поскольку значительное количество несчастных случаев, связано только с человеческим фактором. Осознание этого факта привело к масштабным исследованиям, направленным на повышение уровня автоматизации управления транспортными средствами на основе передачи части функций управления автоматическим устройствам. Международная организация автомобильных инженеров SAE разработала стандарт J3016, который определил направления работ по созданию современных методов повышения уровня автоматизации управления транспортными средствами. Были разработаны системы, универсальные по своей природе и применимые к любой наземной автомобильной технике.

Однако в работах по автоматизации управления транспортными средствами существует ниша автоматизации функций технологических режимов управления движением транспортных средств. Примером может служить городской пассажирский транспорт (ГПТ), специфической функцией которого является движение транспортных средств по заданному маршруту и расписанию [2, 3]. Некоторые виды грузовых перевозок также предполагают движение транспортных средств по заранее заданному маршруту.

Автоматизация управления движением транспортных средств по заданному маршруту основана на том, что бортовая система управления должна иметь в памяти точную пространственную модель маршрута, параметры которой также должны указывать на ограничения скорости движения на каждом участке. Такая пространственная модель должна быть заранее подготовлена и сохранена в базе данных диспетчерской системы.

Роботизированная система управления при осуществлении движения по маршруту и формировании необходимых команд для выполнения различных маневров должна согласовывать требования режима движения с характеристиками приводов исполнительных органов робота. Такая координация возможна на основе использования выявленных связей между скоростным режимом движения, параметрами маршрута и характеристиками робототехнических приводов исполнительных органов.

## 2. Основной текст

Рассмотрим движение транспортных средств городского пассажирского транспорта. Движение этих транспортных средств осуществляется строго по заданному маршруту и характеризуется высокой динамикой, что выражается в частой смене режимов разгона и торможения с небольшими по времени интервалами движения с постоянной скоростью и частыми остановками. Еще одним отличием является значительное количество маневров в пространстве, необходимых для перемещения по маршруту. Например, при прохождении поворота на начальном этапе движение осуществляется по переходной кривой (с переменным радиусом кривизны), поскольку при входе в поворот водитель плавно поворачивает руль в сторону поворота. На следующем этапе движение осуществляется по круговой кривой фиксированного радиуса, что обеспечивает прохождение определенного участка поворота. На этом этапе водитель удерживает рулевое колесо в фиксированном положении. При выходе из поворота начинается третья фаза прохождения поворота, при которой водитель начинает поворачивать руль в противоположную сторону. В этом случае происходит движение по переходной кривой со все возрастающим радиусом кривизны.

Для транспортных средств с роботизированной системой управления направлением движения необходимо заранее проектировать траекторию каждого маневра на маршруте с помощью кривых перехода.

Определение требований к безопасности и комфорту пассажирских перевозок имеет важное значение. Поскольку управление направлением движения на перегоне маршрута должно осуществляться автоматически, необходимо обеспечить ограничение пространственных и временных погрешностей траектории, насколько это необходимо для реализации автоматического режима движения по заданной траектории.

Предполагается, что движение транспортного средства осуществляется в статической среде, т.е. по выделенной линии, исключая влияние других участников транспортного потока. Таким образом, ограничения на параметры трафика на участке маршрута относятся к статической среде, исключая влияние транспортных потоков.

При проектировании пространственной модели движения маневрирующего пассажирского автомобиля с роботизированной системой управления модель должна содержать информацию о максимальной скорости движения, которая устанавливается на основе оценки динамических характеристик транспортного средства, а также как исходя из ограничений относительно комфорта поездки. В связи с этим необходимо рассмотреть конструкцию и динамические характеристики легкового автомобиля с целью определения ограничений, влияющих на максимальную скорость на разных участках траектории. Эти характеристики аналогичны характеристикам транспортных колесных роботов [4]. Функцию скорости следует строить путем назначения минимальной верхней границы всех ограничений скорости для каждого участка:

$$(1) \quad V_{lim}(s) = \min\{V_{lim1}, V_{lim2}, \dots, V_{limn}\} - s \in [0, S].$$

Учтем ограничения конструкции. Поскольку рулевой привод роботизирован, тепловые и механические характеристики приводных двигателей и аккумуляторов определяют максимальные скорости вращения тягового и рулевого серводвигателей. Максимальная линейная скорость ведущих колес относительно земли составляет [4]:

$$(2) \quad v_{tw}^{max} = \xi_t \omega_{tm}^{max} R,$$

где  $\xi_t$  – передаточное отношение трансмиссии,  $R$  – радиус колеса,  $\omega_{tm}^{max}$  – максимальная скорость вращения двигателя.

Максимальная угловая скорость управляемых колес ( $G_s^{max}$ ) определится из соотношения:

$$(3) \quad G_s^{max} = \zeta_s |\omega_{sm}^{max}|,$$

где  $\zeta_s$  – передаточное отношение механизма рулевого управления,  $\omega_{sm}^{max}$  – максимальная скорость вращения сервомотора роботизированного рулевого управления.

Что касается кинематической связи между ведущими колесами и точкой поворота, если  $d_{sm}^{max}$  – вектор положения на земле самого дальнего ведомого колеса относительно контрольной точки, верхний предел скорости определяется по формуле [5]:

$$(4) \quad V_{Lim1} = v_{tw}^{max} \frac{\left| \frac{1}{k(s)} \right|}{\left| \frac{1}{k(s)} + d_{tw}^{max} \right|},$$

где  $k$  – кривизна траектории движения.

С другой стороны, при рассмотрении кинематической связи между рулевыми колесами и точкой поворота вторая граничная функция скорости находится как:

$$(5) \quad V_{Lim2} = \frac{\left| \frac{dk}{dt} \right|}{\left| \frac{dk}{ds} \right|}.$$

Числитель должен быть рассчитан на основе кинематической модели робота, а знаменатель может быть рассчитан непосредственно на основе известного пространственного пути.

Для расчета указанных ограничений скорости необходимо использовать аналитические модели для описания кривизны каждого непрямолинейного участка заданного маршрута. Для решения указанной задачи нами предложено использовать теорию кривых Безье [6]. Для моделирования криволинейных участков трассы предложено использовать кривые Безье третьего порядка. Параметрическое представление плоской кривой Безье третьего порядка в декартовых координатах имеет следующий вид:

$$(6) \quad \begin{aligned} X(t) &= X_0(1-t)^3 + 3X_1t(1-t)^2 + 3X_2t^2(1-t) + X_3t^3. \\ Y(t) &= Y_0(1-t)^3 + 3Y_1t(1-t)^2 + 3Y_2t^2(1-t) + Y_3t^3, 0 \leq t \leq 1. \end{aligned}$$

Кривизна плоской кривой, задаваемой параметрически, определяется по формуле:

$$(7) \quad \kappa(t) = \frac{\dot{X}(t)\ddot{Y}(t) - \ddot{X}(t)\dot{Y}(t)}{[\dot{X}^2(t) + \dot{Y}^2(t)]^{3/2}}, 0 \leq t \leq 1.$$

Таким образом, для расчета величины кривизны кривой необходимо вычислить первую и вторую производную по параметру  $t$  для каждой координаты. Выражения первой и второй производной по параметру  $t$  для каждой координаты кривой Безье имеют вид:

$$(8) \quad \begin{aligned} \dot{X}(t) &= -3(1-t)^2X_0 + [3(1-t)^2 - 6t(1-t)]X_1 + [6t(1-t) - 3t^2]X_2 + \\ &+ 3t^2X_3 \\ \dot{Y}(t) &= -3(1-t)^2Y_0 + [3(1-t)^2 - 6t(1-t)]Y_1 + [6t(1-t) - 3t^2]Y_2 + \\ &+ 3t^2Y_3 \\ \ddot{X}(t) &= 6(1-t)X_0 + [18t - 12]X_1 - 6X_2 + 6tX_3 \\ \ddot{Y}(t) &= 6(1-t)Y_0 + [18t - 12]Y_1 - 6Y_2 + 6tY_3. \end{aligned}$$

Поскольку трасса маршрута включает множество кривых Безье, следовательно, необходимо по приведенной формуле (7) рассчитать величину кривизны для каждого участка и рассчитать предельные значения скорости на участке, используя формулу (4).

### 3. Заключение

Развитие современных технологий на основе микроэлектроники и вычислительной техники позволило широко внедрить эти средства в автомобильной промышленности. Последними достижениями стали, в том числе, работы, направленные на автоматизацию процесса управления движением транспортного средства, появились многочисленные разработки систем помощи водителю, носящие универсальный характер, то есть применимые для внедрения на любом автомобиле. Примерами таких систем являются адаптивные системы круиз-контроля, системы удержания полосы движения и другие системы. Однако существует технологическая ниша автоматизации управления, решения которой применимы только для отдельных видов транспортных средств, которые должны двигаться по заданному маршруту. Таким видом транспорта, в частности, является городским пассажирским транспортом, специфическими задачами управления для которого являются движение по заданному маршруту с остановками в заданных остановочных пунктах. Решение задачи движения по маршруту связано с подготовкой специальной пространственной динамической модели, описывающей, в том числе, ограничения максимальной скорости движения на каждом участке. Решение данной задачи является необходимым условием для разработки роботизированных системы управления транспортными средствами, движущихся по заданному маршруту, которые в процессе выработки управляющих

воздействий будут основываться на информации пространственной динамической модели заданного маршрута.

## Список литературы

1. Creating a Road Collision Investigation Branch (RCIB). [https://www.gov.uk/transport/road-safety-driving-rules-and-penalties#policy\\_and\\_engagement](https://www.gov.uk/transport/road-safety-driving-rules-and-penalties#policy_and_engagement). Consulted: 10/28/21).
2. Bogumil V.N., Kasimov J.E. Development of the Architecture of the On-Board Assistance System for the Driver of a City Bus Based on the Use of a Fuzzy Logic Apparatus // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications SOSG 2022. Conference Proceedings. 2022, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744390.
3. Bogumil V.N., Duque M.J. Automated regulation of intervals for bus rapid transit routes // Science Journal of Transportation. 2020. No. 10. P. 23-31.
4. Optimal Velocity Planning of Wheeled Mobile Robots on Specific Paths in Static and Dynamic Environments // Mobile Robots Perception & Navigation. Advanced Robotic Systems International. 2007. P. 357-383.
5. Prado M., Simón A., Carabias E., Perez A., Ezquerro F. Optimal Velocity Planning of Wheeled Mobile Robots on Specific Paths in Static and Dynamic Environments // Journal of Robotic Systems. 2003. Vol. 20, No. 12. P. 737-754. doi: 10.1002/rob.10120.
6. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.