

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Васина Павла Александровича «Совершенствование алгоритмов автоматического управления движением автомобиля посредством нейросетевых решений и анализа дорожной обстановки», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Актуальность темы диссертации

Автоматизация управления движением является интенсивно развивающимся направлением совершенствования автомобильного транспорта, которое призвано повысить безопасность и комфорт пассажирских и грузовых перевозок. Лидирующие мировые автопроизводители демонстрируют прототипы беспилотных автомобилей и внедряют функции частичной автоматизации управления движением в серийные автомобили, наиболее известными из которых являются электромобили компании Tesla Motors. В то же время такие технологические компании, как Google и Яндекс, тестируют свои беспилотные автомобили на дорогах общего пользования. Высокий интерес к данной теме обуславливает интенсивный рост связанных с ней разработок и исследований, а также создает основания для формирования базы нормативных документов. В частности, стандарт SAE J3016 предлагает классификацию систем автоматического управления движением (АСУД), разделяя их на 5 уровней в зависимости от реализуемых функций, связанных с решением задач управления движением автомобиля. Классификация задач управления движением, предлагаемая в этом стандарте, говорит о том, что проблематика АСУД многоплановая и включает не только управление скоростью и направлением движения, но и планирование движения с учетом окружающей дорожной обстановки, модель которой строится на основании данных, получаемых от систем технического зрения. Таким образом, АСУД решает комбинацию задач, состоящую из анализа дорожного окружения и планирования управляющих действий на основе результатов этого анализа. Хотя степень развития АСУД уже позволяет эксплуатировать оснащенные ими автомобили на дорогах общего пользования (в ограниченных условиях движения и под контролем водителя-человека), данная область техники является довольно новой и содержит множество недостаточно проработанных аспектов. Существующим алгоритмам АСУД свойственны недостатки. Так, алгоритмы технического зрения допускают ошибки анализа дорожных

ситуаций, которые могут приводить (и, к сожалению, приводят) к аварийным ситуациям. Алгоритмы планирования движения не всегда способны справиться со своими задачами, особенно в сложном дорожном окружении, а построенные ими траектории не всегда оказываются физически реализуемыми. Таким образом, существует острая необходимость в устраниении недостатков и совершенствовании алгоритмической базы АСУД. Представленная к защите диссертационная работа как раз и направлена на решение задач алгоритмизации программ планирования траектории движения, а так же анализа дорожной обстановки, что подтверждает ее актуальность как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Васина П.А. состоит из введения, 5 глав основного текста, раздела основных результатов и выводов, списка использованных литературных источников и четырех приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 160 страниц машинописного текста (без приложений), включая 73 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований. Структура диссертационной работы соответствует перечню задач, поставленных для достижения сформулированной цели исследования.

Во введении даны обоснование актуальности темы диссертационного исследования, его цель и задачи, а также научная новизна, практическая значимость, результаты реализации и апробации выполненных работ.

В первой главе представлен анализ исследований в областях, составляющих научную основу АСУД. В качестве базы для формирования алгоритмов управления рассматривается теория системы «водитель-автомобиль-дорога-среда», разработанная отечественными научными школами. Отмечается, что для использования теории ВАДС при исследовании и разработке АСУД ее методы должны быть дополнены методами анализа окружающего автомобиль пространства и построения траектории движения автомобиля с учетом конфигурации этого пространства. В связи с задачей анализа окружающего пространства рассматриваются нейросетевые алгоритмы компьютерного зрения двух типов, осуществляющих идентификацию проезжего пространства и идентификацию участников дорожного движения. В связи с задачей управления движением проанализированы алгоритмы планирования траекторий движения автомобиля на основе графов, «случайных деревьев», нейронных сетей и других подходов. В результате проведенного анализа установлены недостатки существующих решений, на основании которых были сформулированы цель, задачи диссертационной работы, а также концепция усовершенствованной системы алгоритмов планирования траектории движения с учетом

информации о получаемой с помощью компьютерного зрения дорожной обстановки.

Во второй главе описаны математические модели динамики автомобиля и траекторного регулятора, используемые в качестве основы для предлагаемого алгоритма планирования траектории движения автомобиля. Модели исследованы на адекватность с помощью данных, полученных в результате дорожных испытаний легкового автомобиля. Результаты исследования показали возможность их использования при обучении алгоритма планирования траектории.

В третьей главе дается описание предлагаемого нейросетевого алгоритма идентификации участников дорожного движения и проводятся результаты его исследования. Представлены архитектура алгоритма и целевая функция, предложенная для его обучения, которая включает критерии обнаружения объектов и идентификации их параметров. Приводится исследование обученного алгоритма с использованием изображений дорожных ситуаций, на которых алгоритм распознает участников дорожного движения и оценивает их параметры. По результатам работы алгоритма получены численные оценки его эффективности и дано их сопоставление с известными решениями в данной области.

Четвертая глава посвящена усовершенствованному нейросетевому алгоритму идентификации проходимого пространства и его исследованию. Представлены архитектура алгоритма и варианты целевых функций, предложенных для его обучения и включающих штрафы за ложноположительные оценки. Описано исследование обученного алгоритма с использованием изображений дорожных ситуаций, на которых алгоритм распознает проезжее пространство. По результатам работы алгоритма получены численные оценки его эффективности, включая показатель снижения ложноположительных оценок.

В пятой главе представлено описание и исследование нового нейросетевого алгоритма планирования траектории движения автомобиля.

Разработана архитектура этого алгоритма и целевая функция, предложенная для его обучения. Она включает критерии отсутствия столкновений автомобиля с внешними объектами в процессе достижения заданной точки назначения, а также ограничения на параметры движения и управления автомобиля.

Показано исследование обученного алгоритма с использованием карт занятого пространства, используя которые алгоритм прокладывает траекторию движения автомобиля. Исследование проведено в сравнении с известными алгоритмами-аналогами. Представлено сопоставление численных значений параметров движения автомобиля, полученных в результате работы сравниваемых алгоритмов; показаны преимущества предложенного алгоритма относительно известных аналогов.

В заключительном разделе обобщаются результаты исследования предложенных алгоритмов планирования траектории движения автомобиля и анализа дорожной обстановки, сформулированы общие выводы по каждой из решенных задач диссертации, представлены обеспечивающие разработанными алгоритмами показатели улучшения рабочих характеристик АСУД, а также численные показатели адекватности и точности модели динамики автомобиля, используемой для обучения алгоритма планирования траектории движения.

Выводы соответствуют структуре работы и являются научно-обоснованными.

Список литературы включает отечественные и зарубежные научные публикации в областях теории системы ВАДС, алгоритмов компьютерного зрения и алгоритмов АСУД, осуществляющих планирование траектории движения автомобилей с учетом дорожной обстановки.

Научная новизна диссертации

В процессе диссертационных исследований получены следующие новые научные результаты:

– Разработан и исследован новый нейросетевой алгоритм автоматического управления движением автомобиля, в котором построение траектории движения осуществляется с использованием карты занятого пространства с учетом динамических свойств автомобиля, ограничений на параметры его движения и критериев качества движения, которые «изучаются» нейронной сетью с помощью математической модели движения автомобиля, используемой в функции обучения.

– Разработан и исследован новый нейросетевой алгоритм анализа дорожной обстановки, позволяющий идентифицировать участников дорожного движения и определять их параметры (тип, габаритные размеры, пространственное расположение), представляющие важность при решении задачи безопасного автоматического управления движением автомобиля. Предложена оригинальная функция обучения алгоритма, позволяющая обеспечить его многозадачность.

– Разработан и исследован новый нейросетевой алгоритм анализа дорожной обстановки, позволяющий определять области пространства, доступные для безопасного движения автомобиля. Новизну алгоритма составляет функция обучения, которая в зависимости от требований, предъявляемых к безопасности движения, позволяет снизить количество ложноположительных или ложноотрицательных срабатываний алгоритма.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

При анализе диссертационной работы можно отметить следующие ее аспекты:

- аргументированное описание предлагаемых алгоритмов планирования траектории движения автомобиля и анализа дорожной обстановки;
- обоснованное и корректное использование математического инструментария – моделей и функций обучения нейросетевых алгоритмов;
- адекватность математической модели динамики автомобиля подтверждена численными характеристиками погрешностей, определенными на основании контрольных измерений;
- достоверность результатов исследования разработанных алгоритмов технического зрения подтверждена вычислением оценочных метрик, произведенном в соответствии с принятыми процедурами экспериментального исследования алгоритмов технического зрения, и сопоставлением полученных метрик с показателями известных алгоритмов-аналогов;
- сформулированные выводы по результатам научных исследований, проведенных в работе, обоснованы и соответствуют цели и задачам диссертации.

Отмеченные аспекты позволяют считать, что результаты и выводы, представленные в диссертационной работе, являются корректными и научно-обоснованными.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы, рекомендации по их использованию

Теоретическую ценность диссертационной работы составляют предложенные архитектуры и функции обучения нейросетевых алгоритмов планирования траектории движения автомобиля и компьютерного зрения.

Практическую значимость представляют описания разработанных алгоритмов и их реализация в виде программного обеспечения, которое может быть адаптировано в составе контроллеров АСУД различных уровней автоматизации.

Диссертационная работа и ее результаты могут быть рекомендованы в качестве методических материалов и источника практически полезной информации для исследователей и инженеров, работающих в областях автоматизации управления движением и активной безопасности автомобилей.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении двух научно-исследовательских работ по тематикам активной безопасности и автоматизации управления движением автомобилей в

рамках государственных контрактов ФГУП «НАМИ» с Министерством промышленности и торговли РФ (в 2021-2022 гг.) и Министерством образования и науки РФ (в 2019 г.).

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и относятся к двум областям исследований, указанным в паспорте специальности: п. 2 «математическое моделирование и исследование кинематики, статики и динамики, а также физико-химических процессов в транспортных средствах, их узлах и механизмах» и п. 4 «повышение качества, экономичности, долговечности и надежности, безопасности конструкции, экологических характеристик и других потребительских и эксплуатационных параметров транспортного средства».

Публикация результатов диссертации, соответствие автореферата ее содержанию

Основные результаты проведенных соискателем исследований опубликованы в виде 4-х научных статей, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (перечень ВАК, международная база Scopus, международная база Web of Science).

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на международных научно-технических конференциях в 2019 - 2022 гг.

Структура и содержание автореферата в достаточной мере отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Замечание касается степени изученности функций водителя в системе управления автомобилем.

В гл. 1, п.1.1 на стр.18 отмечено: «...функционирование различных процессов восприятия обработки и анализа информации водителем описано и промоделировано на довольно поверхностном уровне, так как современные познания в области функционирования нервной системы человека не позволяют разработать модели, по функциональной сложности и качественным параметрам приближенные к функционированию настоящего водителя».

Следует заметить, что с 1969 г. по 1991 г. учеными НАМИ и МАМИ был создан биотехнический комплекс человеко-машинной системы «ACB», на котором проводился широкий комплекс исследований с участием специалистов института психологии АН СССР, института медико-биологических проблем (ИМБП), целого ряда институтов и заводов. В

частности, в процессе эксперимента на самописце фиксировалась частота пульса водителя, кожно-гальваническая реакция (КГР), количество и продолжительность допущенных водителем ошибок, повороты руля и скорость автомобиля и многое другое. Для создания определенной эмоциональной напряженности вводилось наказание за ошибку путем электростимуляции. У испытуемых определялась критическая частота слияния мельканий (КЧСМ) со звуковым генератором и время сенсомоторной реакции на свет (ВР). Определялась сила нервной системы (НС) по возбуждению к торможению и ее подвижность по бланковой методике Стерляу. Нейротизм и экстра-интраверсия определялись с помощью опросника Айзенка. Для определения направленности личности использовалась ориентировочная анкета В.Смекала и М.Кучера и т.д. Во многом благодаря этим исследованиям были отработаны каналы получения, преобразования информации и отработаны законы формирования управляющих сигналов моделей водителей с последующим преобразованием этих сигналов в управляющее воздействие и включением математического описания деятельности водителя в модель ЧМС «АСВ». Подробную информацию по этому вопросу можно получить в источнике [20], представленном в списке литературы диссертации соискателя.

2. Замечание касается структурной схемы (рис.1.1), представленной в гл. 1, п.1.1 на стр.19, взятой из работы [19] (см. стр.449, рис.206), в которой «Дорога» связана с ЦНС водителя только координатой y_0 (задание), а не со всеми переменными и их производными, перечисленными на рис. 1.1, которые одновременно являются входными для ЦНС и выходными для объекта управления.

3. Замечание касается представленного на стр.20 рисунке 1.2 - блок-схемы математической модели водителя в форме одноконтурной замкнутой системы автоматического регулирования.

Предполагается, что в заключенной пунктирными линиями части схемы (рис. 1.2) условно находится весь перечень переменных и их производных. В этом случае схема принимает статус эквивалентной. Введение этого слова в название вносит существенную определенность, как это было принято для двухконтурной схемы управления в [19] (см. рис. 208).

4. Замечание касается области применения модели водителя в теории ВАДС.

В гл. 1, п.1.1 на стр.22 отмечено: «...Описанная математическая интерпретация водителя в теории ВАДС нашла широкое применение в задачах моделирования управляемого движения автомобиля в аспектах его безопасности (устойчивости и управляемости) и комфорта...».

Заметим, что модель водителя необходима не только для исследования устойчивости, управляемости и комфорта, но и при решении широкого круга задач, таких как структурная и параметрическая оптимизация объекта исследования; сквозное проектирование автомобилей; управление движением автомобиля по нормированным траекториям; поиск оптимальных форм экономичного вождения автомобиля; формирование структуры и чувствительности каналов управляющего сигнала с последующим преобразованием его в управляющее воздействие и др.

5. Замечание касается целевой функции (ЦФ), положенной в основу метода стохастического градиентного спуска и построенной с использованием коэффициента Сёренсена–Дайса (см. гл. 1, п.1.2.4, стр.36):

$$SDF(P, G) = (2|PG|)/(|P| + |G|),$$

где P – множество меток, предсказанных (спрогнозированных) нейронной сетью; G – набор истинных меток.

Сама же ЦФ была записана в модифицированном варианте и имела следующий вид:

$$SDF(P, G) = 1 - (2|PG| + 1)/(|P| + |G| + 1).$$

Единицы в числителе и знаменателе были введены в исходную формулу для того, чтобы избежать ошибки деления на ноль.

Эта ЦФ положена в основу алгоритма глубокого обучения нейронных сетей, суть которого заключается в нахождении минимума функции методом стохастического градиентного спуска на выборке данных посредством итеративного движения вдоль ее градиента. При этом ЦФ должна стремится к минус бесконечности.

Отмечу, что ЦФ является важной составляющей метода, поэтому желательно, чтобы диссертант уделил большее внимание на возможность проведения более глубокого анализа этой функции. К примеру, если во втором слагаемом ЦФ числитель и знаменатель поменять местами, то по определению знаменатель окажется больше чисителя и ЦФ окажется в диапазоне от нуля до единицы, а ЦФ будет стремиться к единице. При этом открывается возможность представить ЦФ в нормированной форме, сменив направленность градиента к единице.

Возможно, в этих рассуждениях не учтены какие-то факторы или допущения, поэтому было бы желательно получить соответствующие разъяснения по этому вопросу.

6. Замечание касается математической модели динамики автомобиля, представленной в гл. 2, п.2., стр.56 - 58.

Во-первых, приведенная система уравнений по своей сути является линейной. При малых углах поворота переднего управляемого колеса тригонометрические функции могут быть заменены значениями аргументов. Но в процессе дорожных испытаний проводимых с целью проверки адекватности системы, когда использовалась модель движения автомобиля совместно с траекторным регулятором Pure Pursuit, выполнялись маневры сложной конфигурации («Восьмерки», «Петля» и «Змейка»). В эксперименте, как оказалось, углы поворота рулевого колеса $\theta_{р.к.}$ достигали 500^0 (см. стр. 74; 75, рис. 2.15 и 2.16), следовательно, углы поворота переднего управляемого колеса могли достигать величины не менее 25^0 .

Во-вторых, работоспособность синтезируемого нейросетевого алгоритма планирования траектории движения автомобиля в реальных условиях может оказаться под вопросом, поскольку реакции колеса с опорной поверхностью являются сугубо нелинейными, а реакции неголомономных кинематических связей при движении по скользкой дороге оказываются к тому же еще и несовершенными.

В-третьих, система уравнений (см. стр. 58) может решаться относительно вторых производных траектории движения автомобиля и чтобы совместить ее с планируемой траекторией, нужны дополнительные уравнения, которые было бы желательно включить в представленную модель. Следует также заметить, что в первом уравнении системы в левой части опущены индексы при моменте инерции автомобиля относительно оси Z , а в правых частях третьего и четвертого – индекс при угле поворота переднего обобщенного колеса.

7. Замечание касается условных обозначений.

Наблюдается неточность в определении переменных, например: δ_k – угол поворота переднего обобщенного колеса (стр. 57); угол поворота колеса передней оси δ_k (стр. 57); угол поворота среднего колеса δ_k (стр. 60).

8. Замечание касается взятым из источника [126] траекторного регулятора, типа Pure Pursuit, осуществляющего слежение за траекторией движения автомобиля (см. гл. 2, п. 2.2, стр 58).

Заметим, что способ и конструкция подобного устройства описаны еще более, чем за 40 лет до упомянутого источника, в работах (1. Катанаев Н.Т., Морозов Б.И., Карелин В.И. Способ определения среднего интегрального угла отклонения продольной оси автомобиля от заданной траектории. А.С. N662840 от 15.05.79, Б.И. N8, 1979 г.; 2. Катанаев Н.Т., Морозов Б.И., Карелин В.И. Устройство для исследования характеристик управляемости автомобиля в режиме слежения. А.С. N662841 от 15.05.79, Б.И. N18, 1979 г.), В работе [20] в списке литературы рассматриваемой диссертации изложен подробный математический аппарат системы, ее

испытание и анализ результатов исследований, которые, кстати, проводились с участием ученых МАМИ и НАМИ. Несмотря на большую разницу в конструктивном исполнении устройств, описанных в работах [20] и [126], способы слежения во многом идентичны. Существенное отличие этих систем состоит в том, что для доказательства адекватности модели в работе [20] использовались интегральные оценки качества слежения за траекторией движения, которые в отличие от прямых оценок качества дают возможность осуществлять процедуру оптимизации системы. Надеюсь, что изложенная в этом пункте информация может быть Вам полезной в дальнейших исследованиях систем АСУД.

9. Замечание касается второго способа проверки модели движения автомобиля совместно с траекторным регулятором Pure Pursuit (см. стр.66).

Эксперимент проводился с двумя наборами параметров регулятора: $l_d=1.5$, $P=1$ и $l_d=3$, $P=2$. Однако в соответствии с формулой регулятора (см. стр. 60)

$$\delta_k = \operatorname{arctg}\left(P \frac{2L \sin(\alpha)}{l_d}\right),$$

оба варианта равнозначны, т.к. в обоих случаях отношение $(P/l_d)=0.666$.

10. Замечание касается терминологии, используемой при исследовании АСУД и представленной в гл. 5.6 на стр.130:

«Маневренность – способность системы осуществлять движение по сложной траектории в условиях ограниченного пространства.

Управляемость – способность системы осуществлять движение по заданной траектории с заданной скоростью и соблюдением ограничения на боковое ускорение».

Во-первых, управляемость логично рассматривать относительно траектории движения и чтобы добраться до нее нужно дважды проинтегрировать боковое ускорение, поскольку объект представляет собой двойное интегрирующее звено. Во вторых, в определении должна быть заложена основа формируемой целевой функции управления, которая в данном определении не просматривается. Поэтому было бы целесообразно воспользоваться определением, принятым в кибернетике и сформулированным в работах Калмана Р.Е. (см., например, Kalman R.E.;Bertram J.E. A Unified Approach to the Theory of Sampling Systems, J.Franklin Inst., 1959, 267, p.p. 405 – 436), в которых под управляемостью понимается наличие таких законов управления, которые переводят объект из одной точки фазового пространства в другую за конечный интервал времени. Глубокое осмысление этого определения позволяет представить структуру системы с четко сформулированными законами управления.

Например, если рассматривается управление боковым движением автомобиля, то в качестве функции цели человеко-машинной системы АСВ можно принять интегральное уравнение

$$A = \int_{t_0}^{t_k} M_{pk}(x_1, x_2, \dots, x_n; t; u) \omega_{pk} dt \rightarrow \min_{u \in U},$$

где A – работа, совершаемая водителем на заданном интервале времени; М_{рк} – момент на рулевом колесе; x₁, x₂, ..., x_n – координаты состояния объекта управления; ω – угловая скорость вращения рулевого колеса; u – управление, принадлежащее области U.

Что же касается маневренности, то в представленной трактовке заложена некоторая неопределенность. К примеру, высокая маневренность – это хорошо или плохо? Если же рассматривать маневренность как чувствительность системы к изменению поворота руля, то картина проясняется. Автомобиль с избыточной поворачиваемостью имеет более высокую чувствительность к повороту руля по сравнению с автомобилем с недостаточной поворачиваемостью и, следовательно, имеет лучшую маневренность. Однако при этом с ростом скорости движения автомобиля повышается нестабильность процесса управления и при достижении критической скорости система становится неустойчивой. Чем выше чувствительность к управлению, тем меньше критическая скорость.

Приведенные замечания не снижают ценность работы как в практическом, так и в теоретическом плане, они подтверждают важность развития исследований в выбранном направлении, связанном с созданием работоспособных АСУД, обладающих высоким уровнем безопасности транспортных средств.

Заключение

Рассмотренная диссертация является самостоятельной и завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи совершенствования алгоритмов автоматического управления движением автомобилей. Диссертационное исследование имеет научную ценность и практическую значимость для автомобильной промышленности. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы. Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Автореферат диссертационной работы в достаточной мере отражает ее содержание и соответствует требованиям ВАК РФ. Выполненное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и критериям оценки диссертационных работ, изложенным в Постановлении Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней». Автор

диссертации «Совершенствование алгоритмов автоматического управления движением автомобиля посредством нейросетевых решений и анализа дорожной обстановки», Васин Павел Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Официальный оппонент
профессор кафедры
«Менеджмент», ФГБОУ ВО
«Московский политехнический
университет» (Московский
Политех),
д.т.н., профессор

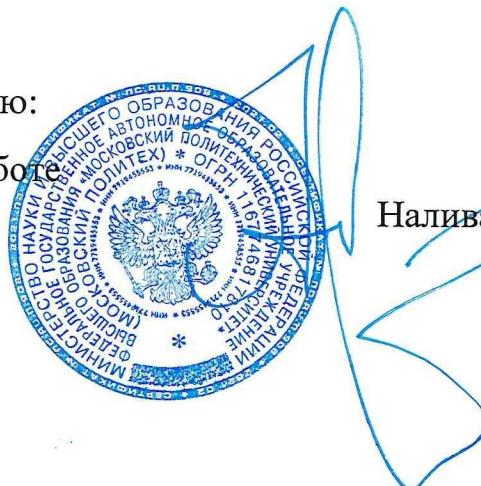
тел.: 89161742342
E-mail: kafedra-mami@mail.ru

Научная специальность оппонента Катанаева Николая Трофимовича:
05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины». Диссертация на соискание
ученой степени доктора технических наук защищена. 16.01.1990 г. в
МАДИ, г. Москва.

Подпись Н.Т. Катанаева заверяю:

И.о. проректора по научной работе
Московского Политеха

 Катанаев Н.Т.



Наливайко А.Ю.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»
(Московский политех), адрес: 107023 г. Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38,
официальный сайт: https://mospolytech.ru