

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.331

DOI 10.18698/0536-1044-2016-6-42-49

Логика управления прогностического типа для транспортного средства*

Е.Е. Баулина, Ю.В. Дементьев, А.В. Круташов, В.В. Серебряков,
О.И. Деев, А.И. Филонов

Университет машиностроения, 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38

Control Logic of Prognostic Type for Vehicles

E.E. Baulina, U.V. Dementiev, A.V. Krutashov, V.V. Serebryakov,
O.I. Deev, A.I. Filonov

University of Mechanical Engineering, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38



e-mail: baulina@mami.ru, dementiev.satr@mail.ru, 7239378@mail.ru, vvs@mami.ru, oleg-deev@ro.ru, filonov@mami.ru



Стремительное развитие систем активной безопасности транспортных средств требует создания более совершенной логики управления, учитывающей время запаздывания механических систем, время обработки сигнала контроллером, различные варианты получения количественных данных выходных параметров внутри широкого диапазона значений с возможностью прогнозирования характеристик реализуемого программного цикла. Наиболее используемым методом оптимизации логики управления транспортным средством является увеличение точности интеллектуальной оценки ситуации, т. е. увеличение числа датчиков, позволяющих отслеживать по основным параметрам положение автомобиля. Однако это сопровождается накоплением ошибок и погрешностей вследствие несовершенства управляющих элементов и зависимости от управляющих действий водителя транспортного средства. Для обеспечения соответствия логики управления в текущий момент времени действиям механических систем, а также оптимизации накопления ошибок предложена прогностическая модель. Модель позволяет синхронизировать количественные показатели выходных данных и информации, возвращаемой на управляемый элемент в текущий момент времени, тем самым сокращая несоответствие времени начала обработки информации и времени выполнения определенных действий управляющим элементом.

Ключевые слова: прогностическая логика управления, система экстренного контроля, обратная связь, цепь Маркова.



The rapid development of active safety systems for vehicles necessitates improvement in vehicle control logic that takes into account delay time of mechanical systems, signal processing time by the controller, various options for obtaining quantitative data on the

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы прикладных научных исследований (идентификатора проекта RFMEFI57414X0014).

output parameters within a wide range of values with the ability to predict characteristics of the implemented program cycle. Currently, the most popular optimization method of control logic is improving the accuracy of the intellectual assessment of the situation, i.e. increasing the number of sensors that can monitor the vehicle's position with regards to the basic parameters. However, this method is associated with accumulation of errors and inaccuracies due to the imperfection of control elements and control actions of the driver. To ensure compliance of control logic with the actions of mechanical systems in real time, a prognostic model of control logic is proposed. This model allows synchronization of the quantitative indicators of the output data and the information returned to the control element in real time, thus reducing the discrepancy between the start time of information processing and the time of performing the required actions by the control element.

Keywords: prognostic type of control logic, emergency control system, v2v scheme, Markov chain.

В настоящее время над проблемой оптимизации логики управления (ЛУ) транспортным средством (ТС), как по предотвращению нештатных ситуаций, так и в случае их возникновения, работают лучшие инженеры ведущих автомобильных концернов. Наиболее распространенным методом решения этой проблемы является повышение точности оценки ситуации [1], что вызывает необходимость увеличения числа датчиков, позволяющих отслеживать по основным параметрам, например, положение относительно линии разметки на дороге, положение относительно движущегося впереди ТС, координаты всех участников движения в заданном квадрате (перспективная разработка, v2v-, v2i-технологии), положение автомобиля. Этот метод позволяет уменьшить вероятность возникновения нештатной ситуации [2]. Однако во время нештатной ситуации водитель должен предпринять определенные действия, например, задать направление движения автомобиля от потенциального препятствия (результатирующий вектор), чтобы система курсовой устойчивости смогла правильно дозировать несимметричную тягу, не допуская разворота машины, а также ее выезда более чем за одну дорожную полосу. Возникает также вопрос о существовании режима действительно «реального времени», поскольку цепь обратной связи строится следующим образом: снятие информации датчиками → обработка полученного сигнала контроллером → возврат результирующего набора операций на управляющие элементы → выполнение заданного алгоритма управляющими элементами (например, тормозные механизмы, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), комбинированная энергетическая установка, рулевая рейка и т. д.). При этом связь между результирующими наборами ко-

манд является в основном нелинейной [3]. Сигнал, полученный в момент времени t (начальный момент времени) и имеющий набор команд для данного времени, можно применить только в момент времени $t + 2$ (поскольку ЛУ обработала два условных шага). Это не только не соответствует действительному положению ТС в данный момент времени, но и увеличивает с каждым последующим шагом результирующую погрешность (накопление ошибок). Каждый управляющий агрегат имеет собственное время срабатывания (среднее время отклика), с: ДВС — 0,6; трансмиссия — 0,2; активная рулевая рейка — 0,2; антиблокировочная система — 0,4. При этом погрешности, возникающие при стабильном и нестабильном циклическом характере срабатывания также различны (стабильный характер не нуждается в аппроксимации и имеет приблизительно одинаковый количественный показатель пиковых значений). Время реакции водителя зависит от его квалификации и варьируется от 0,3 до 2 с.

Таким образом, среднестатистическое отклонение Δt от начала нештатной ситуации до начала активной фазы коррекции составляет 0,9...1 с, что эквивалентно времени выезда ТС на противоположную полосу движения.

Цель работы — создание алгоритма управления, способного анализировать динамику изменения параметров с учетом времени запаздывания отдельных управляющих элементов, тем самым многокритериально повышая безопасность ТС.

Пусть σ — количественный показатель изменения входных параметров внутри цикла, n — количество шагов за полный промежуток времени t . Поскольку несоответствие действительного и предполагаемого временного промежутка эквивалентно двум шагам по времен-

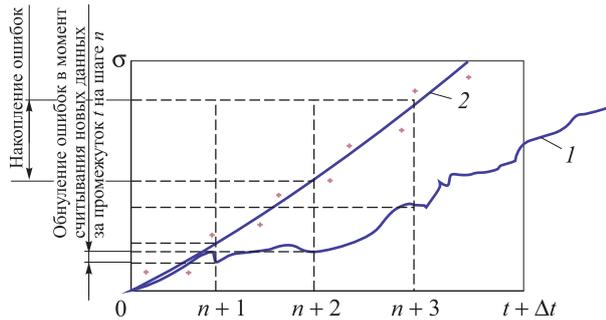


Рис. 1. Расчетный график контроля движения стандартной системы управления (1) и аппроксимированный график реального положения ТС (2)

ной шкале t , аппроксимированный результат действительного положения автомобиля становится менее точным в связи с накоплением ошибок (рис. 1).

Описание прогностической модели ЛУ. Для предотвращения нестабильного циклического характера выходных данных, точного соответствия ЛУ в момент времени t действиям механических систем в этот же момент времени (т. е. единственным способом «устранения» временных потерь является предоставление на n -м шаге выходных данных для шага $n + 2$, что невозможно при работе в режиме реального времени) и оптимизации накопления ошибок предложена прогностическая модель ЛУ, состоящая из двух потоков обработки информации.

Пусть в момент времени t происходит нештатной ситуация. Контроллер автомобиля, оперируя первой ветвью обработки данных, имеет информацию о всех характеристиках автомобиля и может возвращать количественные данные $K \in [0...n]$, где 0 — система абсолютно стабильна, n — максимальное значение дисбаланса системы. Имея начальную скорость, проводят расчет приблизительного времени останова $t_{ост}$ до скорости 40 км/ч (поскольку при такой скорости возможность получения серьезных травм в нештатной ситуации минимальна), тем самым создается коридор значений S , который можно представить в виде n -количества шагов, эквивалентных времени срабатывания системы, т. е. $S = [t_0...t_{ост}]$. На данном этапе следует решить две задачи: 1) найти оптимальную точку [4] вхождения прогностической модели ЛУ; 2) оценить возможность и динамику изменения количественных показателей системы [5–7]. Изменение количествен-

ных показателей системы эквивалентно изменению состояния системы, при этом изменение может и не происходить, следовательно, данный процесс является возвратной цепью Маркова.

На рис. 2 зеленым цветом обозначены полученные состояния, а также изображена часть цепи Маркова, действительное количество состояний на каждом переходе — $n!$.

Пусть система в данный момент времени t находится в состоянии K_n . Построение ЛУ основано на уменьшении вероятности p_{ii} при увеличении количественного показателя выходных данных K с шага $n \rightarrow n+1$ для текущего момента времени t . Таким образом, при текущем состоянии [8] вероятность остаться в начальном состоянии равна [9–11] вероятности перехода состояния на один шаг как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения количественного показателя выходных данных, т. е. $p_{nn} = p_{nn-1} = p_{nn+1}$. Вероятность перехода на два шага $p_{nn\pm 2}$ относительно текущего момента составляет $0,5p_{nn}$, соответственно на n шагов — p_{nn}/n . Систему перехода состояний можно описать следующим способом: $K_{n-3}! \cdot 3K_f$, $K \in [0...n]$, $f \in [n_k]$, где n_k — количественный показатель при текущем состоянии на шаге n . При составлении матрицы переходов следует учитывать граничные состояния, переход из которых в верхний или нижний порядок исключен, т. е. K_0 и $K_{кон}$ имеют двойную вероятность для перехода в верхний порядок при K_0 и в нижний при $K_{кон}$.

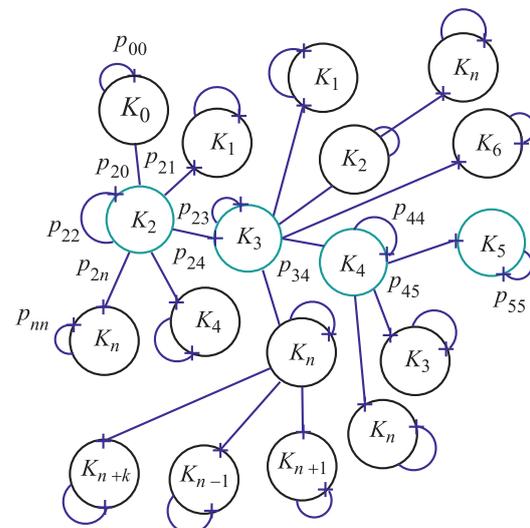


Рис. 2. Цепь Маркова, эквивалентная началу дестабилизации системы

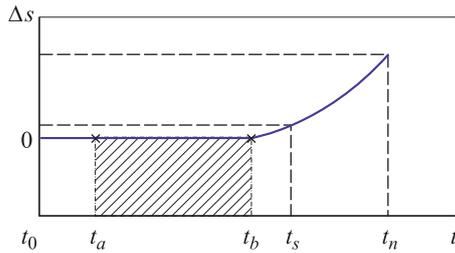


Рис. 5. График смены циклов ЛУ

Последовательный критерий отношения вероятности

$$L_n(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \frac{p_1(x_i)}{p_0(x_i)},$$

где $n=1, 2, 3, \dots$ — полученные результаты на n -м шаге.

Введем следующие обозначения: A и B — соответственно верхние и нижние пороги, $0 < B < 1 < A$; H_1 — гипотеза оптимальности принятия решения перехода на прогностическую модель, наблюдения распределены с плотностью вероятности $p_1(x_i)$; H_0 — гипотеза принятия решения сохранения статистической модели логики управления, наблюдения распределены с плотностью вероятности $p_0(x_i)$.

Оценим показатель σ на каждом шаге:

- если $L_n(x_1, \dots, x_n) \geq A$, то принимаем запись H_1 , и цикл заканчивается;
- если $L_n(x_1, \dots, x_n) \leq B$, то принимаем запись H_0 , и цикл заканчивается;
- если $B < L_n(x_1, \dots, x_n) < A$, то цикл продолжается.

Проведем оценку некоторых вероятностных ошибок в зависимости от числа контрольных точек, эквивалентных n -му шагу внутри цикла:

$$\alpha = \alpha(A, B) = P\{H_1/H_0\};$$

$$\beta = \beta(A, B) = P\{H_0/H_1\};$$

$$n_0 = n_0(A, B) = M(n/H_0);$$

$$n_1 = n_1(A, B) = M(n/H_1);$$

$$\alpha(\sigma') \leq \alpha_0; \quad \beta(\sigma') \leq \beta_0,$$

где α , α_0 , и β , β_0 — вероятности ошибок первого и второго рода; P — вероятность; M — математическое ожидание; σ' — последовательный критерий отношения вероятностей на каждом шаге.

Тогда минимальное среднее количество контрольных точек n

$$n_0(\sigma^*) \leq n_0(\sigma'); \quad n_1(\sigma^*) \leq n_1(\sigma'),$$

где σ^* — критерий принятия решения на данном шаге.

Опишем неравенство, связывающее пороги с вероятностями ошибок:

$$A \leq (1 - \beta)/\alpha;$$

$$B \leq \beta/(1 - \alpha).$$

Для средних чисел наблюдений выделим следующие формулы:

$$n_0 = M(n/H_0) = \frac{\alpha \ln A' + (1 - \alpha) \ln B'}{M(\vartheta/H_0)};$$

$$n_1 = M(n/H_1) = \frac{(1 - \beta) \ln A' + \beta \ln B'}{M(\vartheta/H_1)},$$

где $\vartheta = \ln(p_1(x)/p_0(x))$ — отношение правдоподобия; A' , B' — приближенные пороговые значения, обусловленные динамикой движения ТС в текущий момент времени.

Анализ применимости прогностической модели ЛУ. С физической точки зрения это означает возможность оптимальной смены ЛУ комбинированной энергетической установки в момент времени t_b . Чем выше отклонение параметров после момента времени t_b от параметров, полученных за время последнего цикла, тем быстрее происходит нахождение оптимального варианта контроля траектории ТС, что и необходимо в нештатных ситуациях. Контроль показателей во время выполнения цикла без наличия обратной связи требует введения коэффициента τ , обозначающего уровень отклонения графика средних величин на основе последовательности Вальда от реальных замеров датчиков в момент времени t . Коэффициент τ является постоянным и не зависит от количества контрольных точек и времени последнего обновления базы, не требует корректировки в процессе оценки параметров движения ТС.

По результатам многочисленных экспериментальных данных установлено, что $\tau \leq 0,3$. При таком значении параметра цикл без обратной связи сохраняется. При увеличении коэффициента τ происходит обработка данных по обратной связи с последующим переходом в режим без обратной связи. Данный метод успешно реализуется для выделения (распознавания) момента дестабилизации системы, однако информация, полученная во время работы системы из расчета граничных условий, вызовет общий сдвиг плотности вероятности статистических данных, полученных за момент

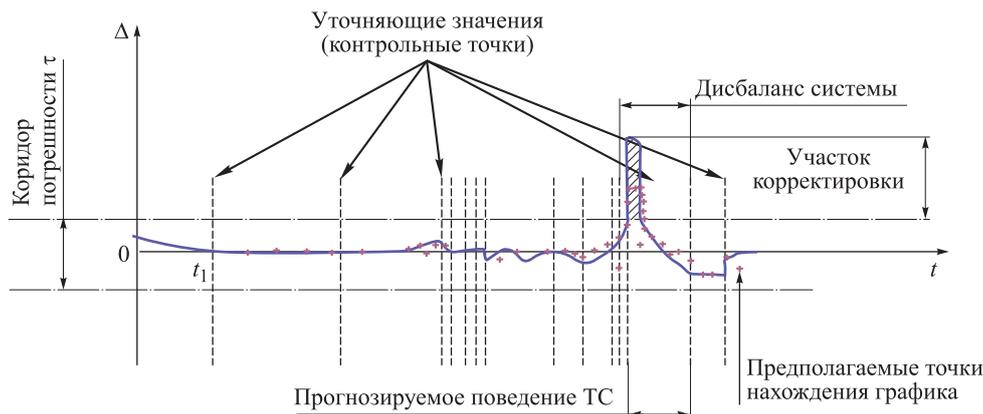


Рис. 6. Создание граничных условий и оценка начала неуправляемого движения ТС:
 Δ — действительные параметры движения

времени, равный промежутку $(t - t_{\text{осд}})$, где $t_{\text{осд}}$ — время обновления статистических данных. Интерпретируя данную логику в соответствии с физическими параметрами, в качестве примера можно привести движение автомобиля за последние 30 с (рис. 6). Пусть автомобиль движется стабильно до 10 с, в интервале 10...14 с происходит развитие заноса с дальнейшей стабилизацией системы, в интервале 14...26 с автомобиль передвигается без значительных отклонений от расчетной математической траектории, на 26-й с автомобиль снова входит в занос. Если ввести расчетное время обновления статистических данных равное 30 с, то происходит сдвиг экстремальных значений, следовательно, нарушается логика работы системы. Эта проблема устраняется самостоятельно путем оценки интенсивности возрастания или убывания функции. Таким образом, с минимальной погрешностью можно установить время предположительного начала заноса даже при $\tau \leq 0,3$, что, с одной стороны, позволяет принимать решение на основе статистических данных внутри устоявшегося цикла (т. е. цикла, по которому движется автомобиль в момент времени t), а с другой, — избежать «быстрых» многочисленных переходов при наступлении граничных условий. Наглядно данное утверждение можно представить, «увеличив» график на рис. 5 с точностью до одного контрольного значения (рис. 7).

На основании сверки значений на n -м шаге, полученных от первой и второй ветви обработки информации, можно не только установить момент дестабилизации системы, но и наиболее точно спрогнозировать количественные показатели выходных параметров, возвращаемые в процессе выполнения цикла.

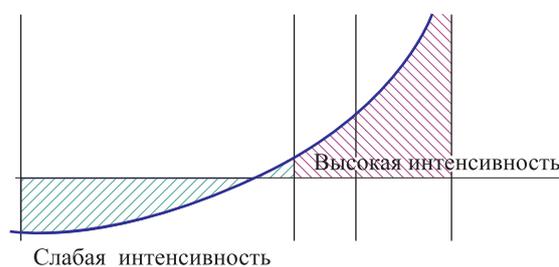


Рис. 7. Интенсивность приращения количественных данных выходных параметров

Выводы

1. Параметры движения ТС, включая те, которые получены во время возникновения нештатных ситуаций, можно рассматривать как большое количество слабо зависимых случайных величин, имеющих распределение, близкое к нормальному.
2. На основании динамики изменения параметров при возникновении нештатной ситуации можно оценить степень их интенсивности, построить предполагаемый цикл и вернуть на управляющий элемент команды с количественным показателем, учитывающим время запаздывания механических элементов.
3. На основании многочисленных экспериментальных данных установлено, что пороговое значение для переключения на прогностическую модель не должно превышать 0,3 от максимального допустимого значения для каждого параметра при заданных граничных условиях.
4. Логика управления прогностического типа позволяет возвращать количественные показатели на каждом шаге цикла, наиболее близкие к значениям, полученным при прогнозируемом движении по идеальной математической траектории.

Литература

- [1] Ragesh R. *Vehicle Dynamics and Control*. New York, Springer, 2006. 121 с.
- [2] Pacejka H.B. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, Society of Automotive Engineers Inc., 2002. 627 p.
- [3] Bakker E., Nyborgi L., Pacejka H.B. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies. *SAE Technical Paper*, 1987, no. 870421.
- [4] Гусейн-Заде С.М. *Задача о разборчивой невесте*. Москва, Изд-во МЦНМО, 2003. 24 с.
- [5] Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1989. 432 p.
- [6] Li Z. *Measure-valued branching Markov processes. Probability and its Applications*. New York, Heidelberg, Springer, 2011. 362 с.
- [7] Shiryaev A.N. A remark on the quickest detection problems. *Statistics and Risk Modeling*, 2004, vol. 22, pp. 79–82.
- [8] Ширяев А.Н. Об оптимальных методах в задачах скорейшего обнаружения. *Теория вероятностей и ее применения*, 1963, т. 8, вып. 1, с. 26–51.
- [9] Бадалбаев И.С., Зубков А.М. Предельные теоремы для последовательности ветвящихся процессов с иммиграцией. *Теория вероятностей и ее применения*, 1983, т. 28, вып. 2, с. 382–388.
- [10] Березовский Б.А., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. *Бинарные отношения в многокритериальной оптимизации*. Москва, Наука, 1981. 150 с.
- [11] Пугачев В.С. *Теория вероятностей и математическая статистика*. Москва, Физматлит, 2002. 496 с.
- [12] Ватутин В.А., Топчий В.А. Предельная теорема для критических каталитических ветвящихся случайных блужданий. *Теория вероятности и ее применения*, 2004, т. 49, вып. 3, с. 463–484.
- [13] Воловик М.А. *Многокритериальный выбор технологии управления восстановлением работоспособности космических аппаратов связи и ретрансляции на стационарных орбитах*. Дис. ... канд. техн. наук, Красноярск, 1989. 153 с.
- [14] Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1989. 432 p.

References

- [1] Ragesh R. *Vehicle Dynamics and Control*. New York, Springer, 2006. 121 p.
- [2] Pacejka H.B. *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, Society of Automotive Engineers Inc., 2002. 627 p.
- [3] Bakker E., Nyborgi L., Pacejka H.B. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies. *SAE Technical Paper*, 1987, no. 870421.
- [4] Gusein-Zade S.M. *Zadacha o razborchivoi neveste* [The problem of a picky bride]. Moscow, MTsNMO publ., 2003. 24 p.
- [5] Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1989. 432 p.
- [6] Li Z. *Measure-valued branching Markov processes*. New York, Heidelberg, Springer, 2011. 362 p.
- [7] Shiryaev A.N. A remark on the quickest detection problems. *Statistics and Risk Modeling*, 2004, vol. 22, pp. 79–82.
- [8] Shiryaev A.N. On Optimum Methods in Quickest Detection Problems. *Theory of Probability and its Applications*, 1963, vol. 8, iss. 1, pp. 22–46.
- [9] Badalbaev I.S., Zubkov A.M. Theorems for a Sequence of Branching Processes with Immigration. *Theory of Probability and its Applications*, 1984, vol. 28, iss. 2, pp. 404–409.
- [10] Berezovskii B.A., Borzenko V.I., Kempner L.M. *Binarnyi otnosheniia v mnogokriterial'noi optimizatsii* [Binary relations in multiobjective optimization]. Moscow, Nauka publ., 1981. 150 p.
- [11] Pugachev V.S. *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit publ., 2002. 496 p.
- [12] Vatutin V.A., Topchii V.A. Limit Theorem for Critical Catalytic Branching Random Walks. *Theory of Probability and its Applications*, 2005, vol. 49, iss. 3, pp. 498–518.

- [13] Volovik M.A. *Mnogokriterial'nyi vybor tekhnologii upravleniia vosstanovleniem rabotosposobnosti kosmicheskikh apparatov sviazi i retransliatsii na statsionarnykh orbitakh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Multicriteria choice of management technology recovery of spacecraft communications and relay on stationary orbits. Dr. tech. sci. diss.]. Krasnoyarsk, NPO PM publ., 1989. 153 p.
- [14] Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1989. 432 p.

Статья поступила в редакцию 15.07.2015

Информация об авторах

БАУЛИНА Елена Евгеньевна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: baulina@mami.ru).

ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Витальевич (Москва) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: dementiev.sat@mail.ru).

КРУТАШОВ Анатолий Васильевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: 7239378@mail.ru).

СЕРЕБРЯКОВ Владимир Витальевич (Москва) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: vvs@mami.ru).

ДЕЕВ Олег Игоревич (Москва) — аспирант кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: oleg-deev@ro.ru).

ФИЛОНОВ Андрей Игоревич (Москва) — старший преподаватель кафедры «Автомобили и транспортно-технологические системы». Университет машиностроения (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 38, e-mail: filonov@mami.ru).

Information about the authors

BAULINA Elena Evgenievna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: baulina@mami.ru).

DEMENTIEV Yuriy Vitalievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: dementiev.sat@mail.ru).

KRUTASHOV Anatoliy Vasilievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: 7239378@mail.ru).

SEREBRYAKOV Vladimir Vitalievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: vvs@mami.ru).

DEEV Oleg Igorevich (Moscow) — Postgraduate, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: oleg-deev@ro.ru).

FILONOV Andrey Igorevich (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Automobiles, Transport and Technological Systems. University of Mechanical Engineering (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semyonovskaya St., Bldg. 38, e-mail: filonov@mami.ru).