

УДК 629.3.052

ПОСТРОЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

К.А. Палагута, А.А. Алексеев

Приведен анализ возможности предотвращения столкновения автомобиля с динамическим препятствием и, в частности, лобового столкновения автомобилей. Предложен метод прогнозирования лобового столкновения и сформулировано условие оценки эффективности маневра, направленного на предотвращение лобового столкновения путем перестроения на соседнюю полосу. Представлены результаты вычислительных экспериментов для проверки предложенного метода.

Ключевые слова: кинематическая траектория, лобовое столкновение, метод прогнозирования, транспортное средство, автомобиль.

Введение

В настоящее время системы активной безопасности транспортных средств, в особенности автомобилей, такие как антиблокировочные системы и системы динамической стабилизации, стали стандартом де-факто для большинства моделей автомобилей, выпускаемых ведущими производителями. Тем не менее, рынок систем активной безопасности автомобиля продолжает развиваться, предлагая новые средства, повышающие безопасность вождения. Так, в последнее время ведущие автомобильные фирмы начали разрабатывать, а некоторые и внедрять в свои изделия системы безопасности, осуществляющие «разумное вмешательство» в процесс управления автомобилем. В частности, компания BMW в серии автомобилей BMWX использует ряд технических средств, предотвращающих действия водителя, которые могут привести к аварийной ситуации.

Следует особо отметить, что, несмотря на то, что перечисленные системы имеют разное назначение, все они направлены, главным образом, на предотвращение аварийной ситуации и относятся к классу интеллектуальных систем активной безопасности [1].

Особый интерес вызывают интеллектуальные системы активной безопасности, позволяющие прогнозировать возможность лобового

столкновения, имеющего тяжелые последствия. Такие системы являются первым шагом к созданию систем автоматического управления автомобилем в тех ситуациях, когда водитель не справляется с управлением автомобилем.

Теоретически ситуации, в которых водитель не справляется с управлением автомобилем, должны возникать крайне редко при соблюдении всеми участниками движения правил дорожного движения, грамотной оценке дорожной обстановки и постоянном обновлении дорожной разметки.

На практике состояние водителя и состояние дороги как элементы системы «водитель – автомобиль – дорога» далеки от идеальных, особенно в России.

Постановка задачи

Попытаемся оценить возможность самого опасного для участников дорожного движения лобового столкновения на дороге с двумя полосами движения при отсутствии дорожной разметки, например после укладки нового асфальта.

Пусть один из автомобилей движется по крайней левой полосе, а второй совершает обгон с выездом на полосу встречного движения. Предположим, что водитель второго автомобиля не учел особенностей профиля

дороги, на которой имеется участок ограниченной видимости. Тогда после прохождения этого участка оба водителя могут внезапно обнаружить, что автомобили движутся точно навстречу друг другу. Предположим, что скорости каждого из автомобилей равны 100 км/ч, а расстояние между ними составляет 100 м. С учетом того, что время реакции водителя, как правило, находится в диапазоне 0,5 – 2,0 с, примем его равным 1 с. Тогда за 1 с при скорости сближения 200 км/ч расстояние между автомобилями, равное 100 м, сократится приблизительно до 45 м. Время 1 с – это время, когда ни один из водителей еще не начал действовать. Стандартный тормозной путь автомобиля, движущегося со скоростью 100 км/ч, составляет около 40 м. Следовательно, при торможении столкновение становится неизбежным. В такой ситуации основным способом для предотвращения столкновения является маневрирование, которое позволит, в худшем случае, от лобового столкновения перейти к столкновению по касательной, менее опасному для участников движения.

На примере данной экстремальной ситуации видно, что любая помощь водителю в подобных случаях может быть полезна. В то же время необходимо отметить, что решение о том, чтобы воспользоваться помощью автоматических систем, в любом случае остается за водителем и принимается заранее.

Рассмотрим задачу прогнозирования лобового столкновения подробнее.

Прогнозирование лобового столкновения

Пусть имеются два транспортных средства (ТС), движущихся навстречу друг другу. Будем считать, что ТС I является объектом управления и движется внутри своей полосы прямолинейно, а встречное ТС II представляет собой автомобиль, движущийся с постоянной скоростью, и помимо линейной скорости сближения $V_{\text{лх}}$ имеет некоторую скорость перемещения в поперечном направлении $V_{\text{лy}}$.

Предположим, что проекция скорости ТС I на ось X ($V_{\text{лх}}$) известна. Кроме того, можно провести измерение скорости сближения $V_{\text{сб}}$ ТС I и ТС II и получить проекцию скорости ТС II на ось X $V_{\text{лх}}$ как разность скорости сближения ТС I и ТС II и проекции скорости ТС I на ось X $V_{\text{лх}}$. Проекцию скорости ТС II на ось Y $V_{\text{лy}}$ по-

лучим как разность положений любой ближайшей угловой точки ТС II относительно оси Y , отнесенную к интервалу времени Δt , за который было произведено измерение. Предположим, что начальное расстояние между ТС I и ТС II S и геометрические параметры ТС I и ТС II известны и одинаковы, а для ТС I существует возможность предотвращения лобового столкновения путем перестроения в свободный правый ряд. Это очень серьезное допущение, которое требует оснащения автомобиля программно-аппаратными средствами, обеспечивающими анализ не только окружающей обстановки, но и динамики ее развития.

При использовании данного допущения задачу можно сформулировать следующим образом. Определим возможность пересечения передней части корпуса ТС I при движении по окружности минимально возможного радиуса

$$R_{\text{min}} = f(V_{\text{лх}}) \quad (1)$$

с корпусом ТС II, движущегося со скоростью $V_{\text{лх}}$. Минимальный радиус поворота зависит как от скорости, так и от конструктивных особенностей ТС I [2] и под ним понимается расстояние от мгновенного центра вращения O_1 до оси следа переднего внешнего колеса P_2 .

Рассмотрим метод, позволяющий с заданной точностью определить время потенциального столкновения и, следовательно, возможность его предотвращения.

Метод последовательного приближения

Метод последовательного приближения базируется на изучении перемещений ТС II (встречного автомобиля). Следует отметить, что данный метод не позволяет определить точное время предполагаемого столкновения, однако с его помощью может быть найдено время предполагаемого столкновения с заданной погрешностью δt . Главная идея, положенная в основу метода, проиллюстрирована на рис. 1. Здесь $P_1 - P_4$ – точки касания соответствующими колесами поверхности дороги.

В соответствии с поставленной задачей требуется определить взаимное расположение точек A и B в момент потенциального столкновения t_c , т.е. в момент времени, когда траектория движения точки B пересекает траекторию движения точки A .

Перед тем как приступить к исследованию движения ТС II, определим зависимости

для расчета положения точки A в некоторый момент времени t . Будем считать, что точка A ТС I, начиная с момента времени t_0 , движется по окружности радиусом $R_{\min A}$:

$$R_{\min A} = f(R_{\min}). \quad (2)$$

Причем $R_{\min A}$ зависит от минимального радиуса ($R_{\min}$) [2, 3], по которому может двигаться ТС I на текущей скорости V_{lx} , и базовых геометрических параметров ТС I. На рис. 2 схематически показан метод определения текущего положения точки A ТС I.

Введем две дополнительные системы координат: декартову $X_1O_1Y_1$ и полярную. Специально отметим, что для обеих вспомогательных систем координат точка начала отсчета совпадает с центром окружности, по которой движется точка A (см. рис. 2).

Координаты точки A в системе координат $X_1O_1Y_1$ будем вычислять, используя систему уравнений:

$$\begin{cases} X_{A1}(t) = R_{\min A} \cos \varphi; \\ Y_{A1}(t) = R_{\min A} \sin \varphi; \\ \varphi = \frac{\pi}{2} - [\alpha(t_0) + \beta(t_i)], \end{cases} \quad (3)$$

в которой $\beta(t_i)$ определяется выражением

$$\beta(t_i) = \frac{V_{Ax}}{R_{\min A}} t, \quad (4)$$

а угол $\alpha(t_0)$ – выражением

$$\alpha(t_0) = \arccos \left[\frac{\sqrt{R_{\min}^2 - L_{6д2}^2} + \frac{L_{ш} - L_{к}}{2}}{\sqrt{(L_{6д1} + L_{6д2})^2 + \left(\sqrt{R_{\min}^2 - L_{6д2}^2} + \frac{L_{ш} - L_{к}}{2} \right)^2}} \right], \quad (5)$$

где $L_{ш}$, $L_{к}$, $L_{6д1}$, $L_{6д2}$ – базовые параметры ТС [4] (табл. 1).

Тогда в системе координат XOY положение точки A с учетом системы уравнений (3) можно

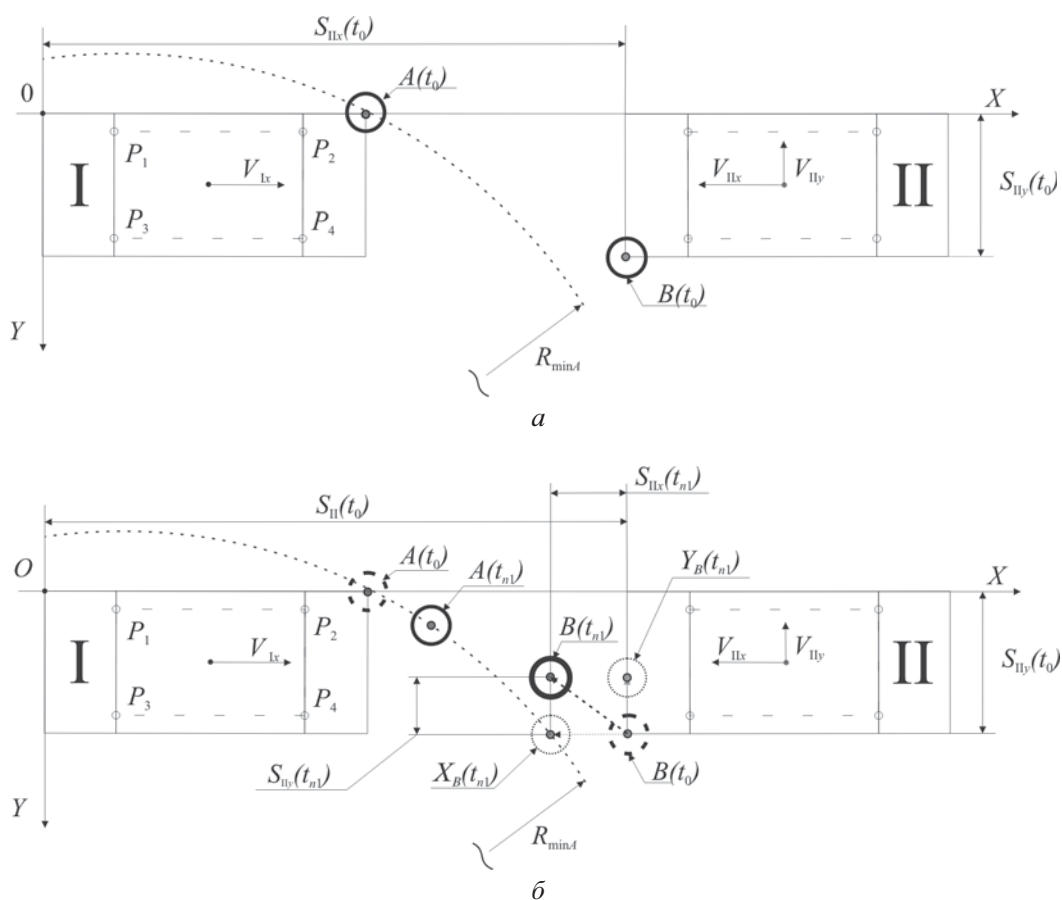


Рис. 1. Схематическое представление метода последовательного приближения:

a – начальный момент времени; b – первая итерация алгоритма

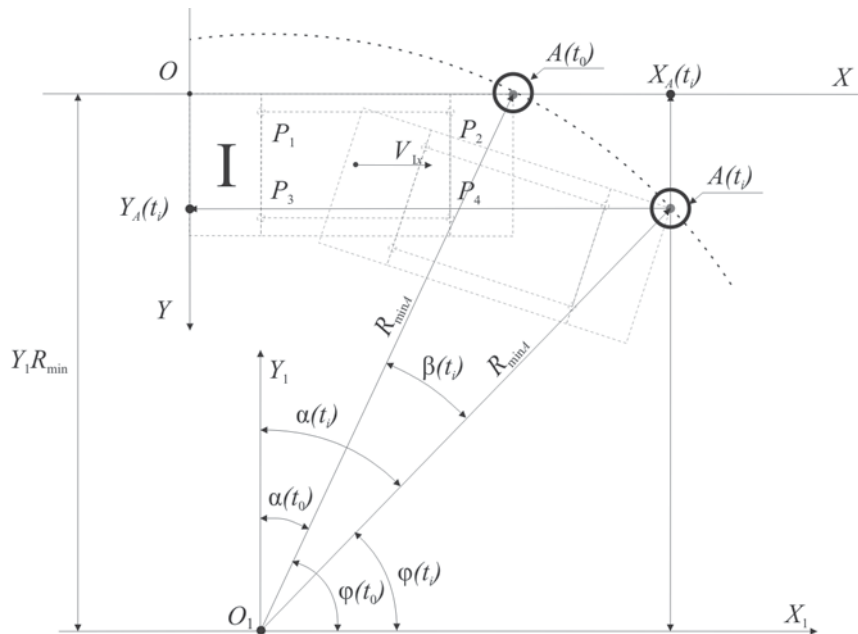


Рис. 2. Метод последовательного приближения (определение координаты точки A)

определить, используя систему уравнений:

$$\begin{cases} X_A(t) = L_{\text{од1}} + X_{A1}(t); \\ Y_A(t) = R_{\text{min}A} - Y_{A1}(t). \end{cases} \quad (6)$$

Далее, с учетом выражений (4) и (5) получим окончательную систему уравнений для определения положения точки A в системе координат XOY :

$$\begin{cases} X_A(t) = L_{\text{од1}} + X_{A1}(t); \\ Y_A(t) = R_{\text{min}A} - Y_{A1}(t); \\ \varphi(t) = \frac{\pi}{2} - \\ - \arccos \left\{ \frac{\sqrt{R_{\text{min}}^2 - L_{\text{од2}}^2} + \frac{L_{\text{ш}} - L_{\text{к}}}{2}}{(L_{\text{од1}} + L_{\text{од2}})^2 + \sqrt{R_{\text{min}}^2 - L_{\text{од2}}^2} + \frac{L_{\text{ш}} - L_{\text{к}}}{2}} \right\} + \frac{V_A}{R_{\text{min}A}} t \end{cases} \quad (7)$$

Теперь, когда можно определить положение точки A в любой момент времени t , появилась возможность вычисления времени столкновения t_c . Для этого итеративно исследуем движение точки B .

На рис. 1, б показана итерация предлагаемого алгоритма. Положим скорость $V_{\text{шy}}$ равной нулю, тогда движение точки B можно описать следующим уравнением кинематики:

$$S_{\text{шx}}(t) = S_{\text{шx}}(t_0) - V_{\text{шx}} t. \quad (8)$$

В соответствии со сделанными предположениями о скорости перемещения точки B относительно оси OY и характере движения точки A (точка A движется по окружности радиусом $R_{\text{min}A}$) можно представить траекторию движения точки B в виде прямой, параллельной оси координат OX и определяемой уравнением:

$$y = S_{\text{шy}}. \quad (9)$$

Тогда координату точки, в которой потенциально произойдет столкновение, для n -й итерации алгоритма определим из системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 = R_{\text{min}A}^2; \\ y_n = S_{\text{шy}n}. \end{cases} \quad (10)$$

Система уравнений (10) сводится к квадратному уравнению относительно переменной x_n , решив которое в общем случае, получим два корня, значения которых будут соответствовать координатам точек пересечения прямой, заданной уравнением (9), и окружности, по которой движется точка A ТС I. Очевидно, что интерес представляет положительный корень с наибольшим значением (см. рис. 1).

Обозначим интересующее решение как x_n^* . Подставив найденную координату x_n^* в уравнение (8), где $S_{\text{шx}}(t) = x_n^*$, вычислим время потенциального столкновения для текущей итерации алгоритма $t_{\text{сн}}$. Однако за время $t_{\text{сн}}$ точка B ТС II сместится по оси OY на расстояние, которое

можно найти, используя формулу.

$$S_{\Pi y}(t) = S_{\Pi y}(t_0) - V_{\Pi y} t_{cn}, \quad (11)$$

т.е. в общем случае столкновение не будет зафиксировано в момент времени t_{cn} .

Однако по условию задачи время t_{cn} можно считать временем столкновения, если время Δt ($\Delta t = t_{cn} - t_{cn-1}$) меньше допустимой погрешности ∂t , которую будем определять по формуле:

$$\partial t = \frac{(L_{\text{бд}} / \Delta L)}{V_{\text{ix}}}, \quad (12)$$

где ΔL – настраиваемый параметр алгоритма, представляющий собой целое число.

Повторяя указанную последовательность действий для точки B n раз, получим время предполагаемого столкновения t_c с заданной точностью, соответствующей погрешности ∂t .

Теперь, когда определено время потенциаль-

ного столкновения, возможность маневрирования для предотвращения лобового столкновения ТС I и ТС II может быть определена исходя из положения точки A для ТС I и точки B для ТС II в момент времени t_c . Запишем условие отсутствия столкновения

$$A_y(t_c) > B_y(t_c), \quad (13)$$

т.е. крайняя точка ТС I в момент времени t_c должна иметь большее значение координаты Y , чем точка B ТС II, что позволит избежать лобового столкновения.

В случае если столкновение автомобилей при использованных допущениях оказывается неизбежным, необходимо рассмотреть вопрос о маневрировании с переменной скоростью, т.е. перейти к решению динамической задачи, а также рассмотреть вопрос о переходе от лобового столкновения к удару в заднюю часть кузова ТС I.

Таблица 1

Входные параметры для вычислительных экспериментов

Параметр ТС, выбранный в качестве расчетного	Значение параметра ТС	Входной параметр, физические постоянные	Значение входного параметра	Приращения скоростей и расстояний	Значения приращений скоростей и расстояний
Длина базы $L_{\text{бд}}$, м	4,703	Начальная скорость ТС I по оси OX V_{ix} , м/с	5	Шаг изменения скорости ТС I по оси OX ΔV_{ix} , м/с	1,39
Длина передней части ТС $L_{\text{бд1}}$, м	1,043	Начальная скорость ТС II по оси OX V_{Iix} , м/с	5	Шаг изменения скорости ТС II по оси OX ΔV_{Iix} , м/с	1,39
Длина средней части ТС $L_{\text{бд2}}$, м	2,703	Начальная скорость ТС II по оси OY V_{Iiy} , м/с	0,5	Шаг изменения скорости ТС II по оси OY ΔV_{Iiy} , м/с	0,5
Длина задней части ТС $L_{\text{бд3}}$, м	0,957	Минимальное расстояние между ТС I и ТС II S_{0x} , м	9,406	Шаг изменения расстояния между ТС I и ТС II ΔS_{0x} , м	2
Ширина базы ТС (включая выступающие части) $L_{\text{бш}}$, м	1,912	Ускорение свободного падения g , м/с ²	9,8	Делитель расчета допуска ΔL	100
Ширина колеи L_k , м	1,515	Коэффициент сцепления с дорожным покрытием f	0,7	Точность p вычисления чисел с плавающей точкой	0,001
Дорожный просвет B , м	0,124	—	—	—	—

Таблица 2

Результаты вычислительных экспериментов

Номер эксперимента	Скорость ТС I относительно оси OX V_{Ix} , м/с	Минимально допустимый радиус разворота для ТС R_{min} , м/с	Расстояние между ТС I и ТС II S_{0x} , м	Скорость ТС II относительно оси OX V_{Ixx} , м/с	Скорость ТС II относительно оси OY V_{Iyy} , м/с	Потенциальная возможность столкновения	Время потенциального столкновения t_c , с	Точность расчета времени потенциального столкновения Δt	Проекция $X_A^1(t_c)$, м	Проекция $X_B^1(t_c)$, м	Возможность предотвращения столкновения	Количество итераций
21	5	3,644	11,406	7,78	0,5	Есть	0,653	0,009	2,933	1,586	Есть	2
141	5	3,644	23,406	24,46	0,5	—//—	0,699	0,009	2,723	1,563	—//—	2
35008	6,39	5,952	25,406	20,29	0,5	—//—	0,915	0,007	3,603	1,455	—//—	2

Примечание. $X_A^1(t_c)$, $X_B^1(t_c)$ – проекции исследуемых точек ТС I и ТС II относительно оси OX в момент времени t_c .

Таблица 3

Трассировка вычислительного эксперимента

Номер эксперимента	Номер итерации	Углубление ТС II во встречную полосу на i -м шаге алгоритма, см	Координаты точек пересечения прямой $y = S_{Iyy}$ и секущей окружности на i -м шаге алгоритма, см	Координата исследуемой точки на i -м шаге алгоритма X , см	Время потенциального столкновения t_c , с	Разность текущего и предыдущего значений времени столкновения Δt , с
21	0	1,912	6,541, – 4,455	6,541	0,625	0,625
	1	1,6	6,333, – 4,247	6,333	0,652	0,027
	2	1,586	6,323, – 4,237	6,323	0,653	0,001
141	0	1,912	6,541, – 4,455	6,541	0,689	0,689
	1	1,568	6,31, – 4,224	6,31	0,699	0,01
	2	1,563	6,307, – 4,221	6,307	0,699	0
35008	0	1,912	7,293, – 5,207	7,293	0,893	0,893
	1	1,466	6,85, – 4,764	6,85	0,915	0,022
	2	1,455	6,839, – 4,753	6,839	0,915	0

Результаты вычислительных экспериментов

Для экспериментальной проверки предложенного метода была произведена серия вычислительных экспериментов в количестве, равном 601 663. Геометрические параметры ТС I и ТС II, а также значения скоростей, расстояний и их приращений приведены в табл. 1. Начальное расстояние между ТС I и ТС II для каждого эксперимента генерировалось автоматически с шагом ΔS_{0x} . Скорости ТС I и ТС II также генерировались автоматически с шагами ΔV_{Ix} , ΔV_{Iy} , ΔV_{Iz} соответственно.

В табл. 2 приведены входные параметры для экспериментов № 21, 141, 35008. Наглядно процесс приближения к решению для экспериментов № 21, 141, 35008 отражен в табл. 3.

Помимо проверки наличия столкновения при условиях n -го эксперимента и определения времени столкновения t_c проводили анализ количества итераций, необходимых для вычисления времени потенциального столкновения с заданной погрешностью δt . По результатам выполненных экспериментов установили, что среднее количество итераций, необходимое для вычисления t_c с погрешностью δt , равно 2, а максимальное составляет 13 (рис. 3).

Заключение

Предложенный метод позволяет определять возможность маневрирования для предотвращения лобового столкновения автомобилей

путем перестроения в свободный правый ряд и синтезировать соответствующую кинематическую траекторию движения. Проверка предложенного метода с помощью вычислительного эксперимента показала, что максимальное количество итераций составляет 13.

Следует отметить, что исследование динамических траекторий при маневрировании автомобиля класса «фольксваген пассат» на идеальном сухом асфальте, проведенное с использованием пакета Matlab, показало отклонение динамической траектории от синтезированной кинематической, составляющее 0,6 м на расстоянии 40 м при скорости автомобиля 100 км/ч. Это означает, что необходимо увеличивать допустимый зазор между автомобилями при их расхождении, а также корректировать динамическую траекторию по мере ее отработки.

Список литературы

1. <http://www.nissan.co.jp/EN/>
2. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 480 с.
3. Техническая эксплуатация автомобилей / под ред. Е.С. Кузнецова: 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.
4. Иванов А.М., Солнцев А.Н., Гаевский В.В. и др. Основы конструкции автомобиля. – М.: Книжное изд-во «За рулем», 2005. – 363 с.

Материал поступил в редакцию 25.11.2011

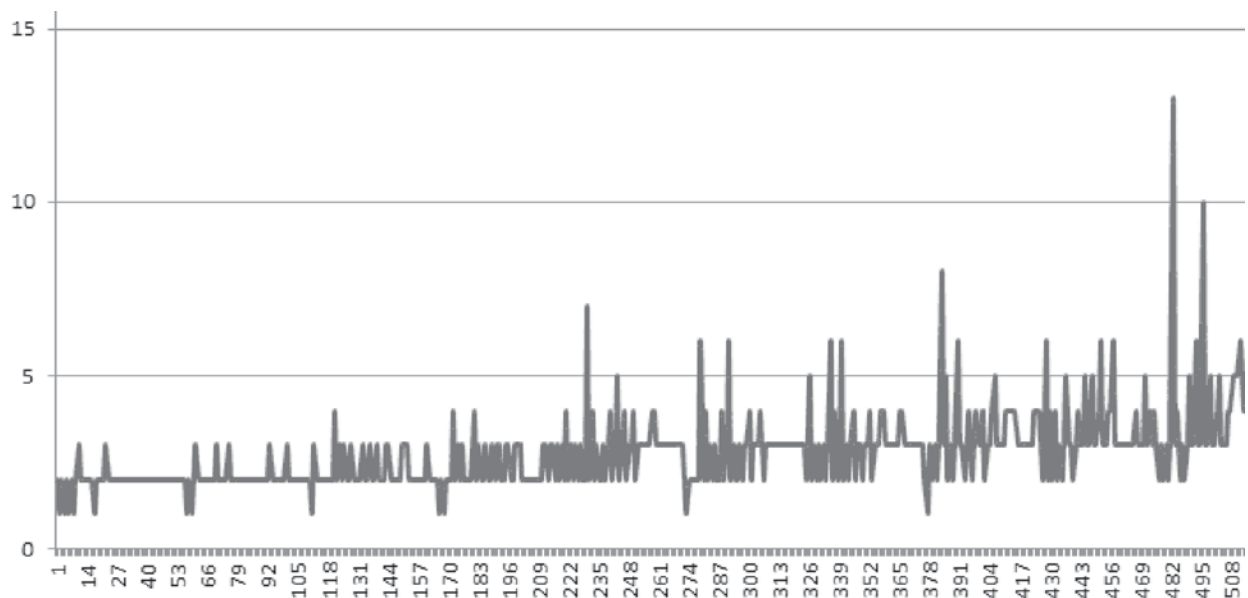


Рис. 3. Количество итераций алгоритма последовательного приближения на дистанции в 500 экспериментов (по оси ординат – номера экспериментов, по оси абсцисс – количество итераций)

**ПАЛАГУТА
Константин
Алексеевич**

Е-mail: palaguta@msiu.ru
Тел.: (909) 698-16-15 (моб.)

Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики, информатики и систем управления ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – микропроцессорные системы контроля и управления, автомобильная электроника. Автор более 100 публикаций.

**АЛЕКСЕЕВ
Александр
Александрович**

Е-mail: alexeews@mail.ru
Тел.: (916) 619-65-57 (моб.)

Аспирант ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – микропроцессорные системы управления и их применение в автомобильной электронике. Автор 10 публикаций.