

АВТОМОБИЛЬНЫЙ КРУИЗ-КОНТРОЛЬ С УДЕРЖАНИЕМ НА ПОЛОСЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ И КРИВИЗНЫ ТРАЕКТОРИИ МИКРОВОЛНОВЫМИ ДАТЧИКАМИ

Хаблов Д.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
dkhablov@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется модель автоматического управления движением автомобиля с функциями контроля скорости, предотвращения столкновения с впереди идущим транспортом с одновременным удержанием на середине полосы движения. В качестве входных параметров контроллера используется продольная скорость, боковое отклонение и угол рыскания. Выходными параметрами являются ускорение и рулевой угол. Для ввода прогнозируемого участка траектории используется видеокамера, расстояние до объекта и относительная скорость сближения измеряется микроволновым радаром с частотной модуляцией. Измерение скорости, кривизны и бокового отклонения производится микроволновыми доплеровскими датчиками на задних колесах автомобиля.

Ключевые слова: круиз-контроль, кривизна, прогнозируемое управление, боковое отклонение, угол рыскания, микроволновый доплеровский датчик скорости.

Введение

На транспорте большое значение имеют автоматические системы управления движением. Они используются для помощи водителю из-за естественной усталости при длительных поездках или в экстренных ситуациях на дороге, требующих быстрого реагирования. Используются эти системы также для беспилотного управления.

Наиболее распространенной является система адаптивного круиз контроля (ACC), которая работает в двух режимах. Она или сохраняет установленную скорость, или поддерживает безопасное расстояние до впереди идущего автомобиля. Контроллер системы использует модуль прогнозирующего управления (MPC) [1], который строится на основе физических и геометрических параметров автомобиля с входными и выходными переменными, сопряженными с динамическим блоком [2]. Измеряемыми параметрами являются расстояние до впереди идущего автомобиля и относительная скорость сближения. Эти параметры наиболее надежно определяются с помощью автомобильного радара непрерывного излучения с частотной модуляцией (FMCW) [3], хотя можно использовать видеокамеру или лазерный дальномер. Не измеряемыми параметрами являются ускорение от акселератора и угол рыскания от угла поворота руля. В этом случае это не так важно, поскольку непредсказуемое изменения параметров пространства состояний модели MPC, таких как масса, коэффициенты трения шин и др. может быть нивелировано увеличением предельным безопасным расстоянием.

Однако такая система не может работать в беспилотном режиме, поскольку рассчитана для прямолинейного движения и требует постоянной корректировки рулевым управлением водителем из-за изменяющейся кривизны дороги. Поэтому к системе подключается датчик слежения за центральной линией полосы на основе видеокамеры, который строит прогнозируемую траекторию движения на несколько шагов вперед. Далее, за счет изменения бокового отклонения и угла рыскания блок MPC нужные сигналы с критическими ограничениями отправляет на динамический блок, сближая их значения до нуля.

В таком режиме работы выясняется, что изменения параметров системы состояний MPC могут внести существенные возмущения в передаточную функцию управления рулевым углом, обладающей и так существенной нелинейностью и инерционностью. Однако, характеристики управляемости можно улучшить, если применить прямое измерение вектора скорости автомобиля и текущей кривизны движения с помощью микроволновых доплеровских датчиков [4].

В работе описывается модель управления автомобилем, включающая в себя адаптивный круиз-контроль на основе микроволнового радара с частотной модуляцией и систему удержания в полосе движения. Модель дополнена системой удержания на полосе с использованием прямого измерения текущей кривизны траектории, угла рыскания и бокового смещения с использованием микроволновых доплеровских датчиков.

1. Модель системы адаптивного круиз-контроля

Рассмотрим вначале классическую модель системы адаптивного круиз контроля [5], схема которого приведена на Рис. 1. Модель состоит из контроллера ACC, ведомого и ведущего автомобиля Car1 и Car2, а также радара непрерывного излучения с частотной модуляцией – FMCW Radar.

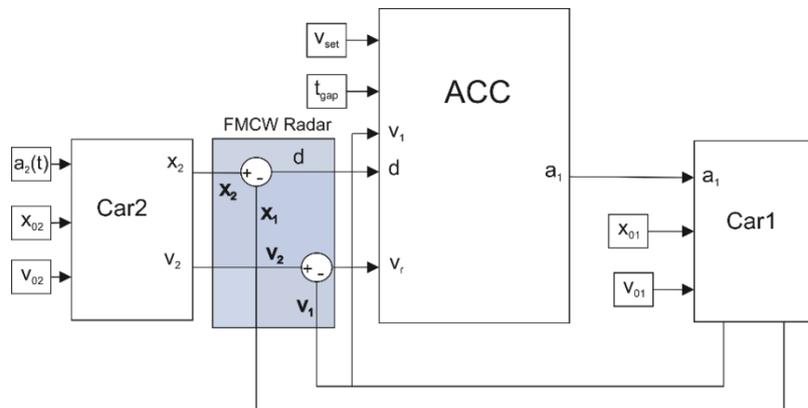


Рис. 1. Модель системы адаптивного круиз контроля

Радар имеет следующие параметры:

- Рабочая частота F (ГГц) 77
- Максимальная дальность до цели d (м) 200
- Разрешение по дальности Δd (м) 1
- Максимальная целевая скорость v (км /ч) 230
- Время развертки $\Delta\tau$ (10^{-6} с) 7,33
- Полоса развертки Δf_m (МГц) 150
- Максимальная частота биений f_b (МГц) 27,30
- Частота дискретизации f_s (МГц) 150

Благодаря использованию треугольной развертки по частоте, радар, расположенный на ведомом автомобиле, одновременно получает данные о текущем расстоянии до ведущего автомобиля d и относительную скорость сближения между ними v (см. Рис.2). Эти значения вычисляются по разностным частотам (частоты биений) между излучающей волной и отраженной волной на растущем участке модуляции – f_1 и на падающем – f_2 :

$$v = \frac{\lambda(f_2 - f_1)}{4} \cos \alpha \quad d = \frac{c(f_2 + f_1)}{8\Delta f_m F_M}$$

Где $c = 3E^8$ (м/с) – скорость света, $F_M = 1/\Delta\tau$ частота модуляции, α – угол падения волны (в данном случае близок к нулю).

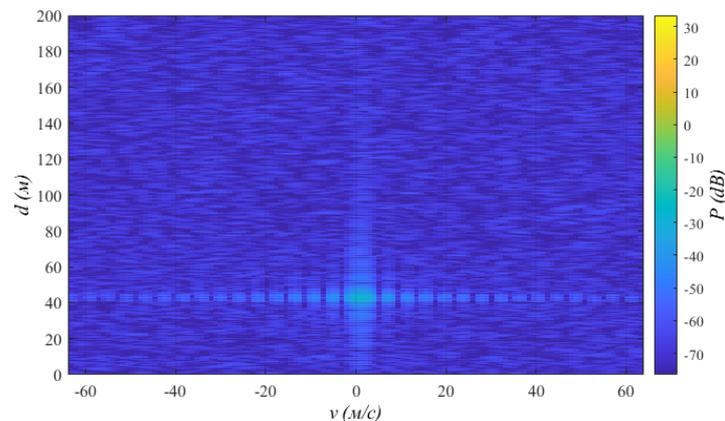


Рис. 2. Сигналы взаимного расстояния и скорости между автомобилями Car1 и Car2 на выходе FMCW радара

Для моделирования зададим начальные условия для расстояний и скоростей обоих автомобилей, время выборки и длительность моделирования T_s и T – $[x_{01}, v_{01}, x_{02}, v_{02}, T_s, T] = [10, 20, 50, 25, 0.1, 80]$

Изменения в ускорении для ведущего автомобиля моделируем синусоидой. Если движение идет по прямой, по динамике между ускорением и скоростью для обоих автомобилей моделируем передаточной функцией, которая аппроксимирует динамику корпуса, акселератора и инерцию

$$G = \frac{1}{s(0.5+1)} \quad (1)$$

Входными данными для системы АСС являются задаваемое ограничение по скорости V_{set} , временной разрыв t_{gap} , линейная скорость автомобиля v_1 , расстояние между автомобилями d , относительная скорость сближения v_2 . Безопасное расстояние между автомобилями зависит от скорости v_1 :

$$D_s = D_{def} + t_{gap}v_1$$

Где $D_{def} = 10$ м – интервал остановки по умолчанию. Результат моделирования при $V_{set} = 30$ (м/с) ограничениях ускорения акселератора $a_{min} = -3$, $a_{max} = 2$ представлен на Рис. 3.

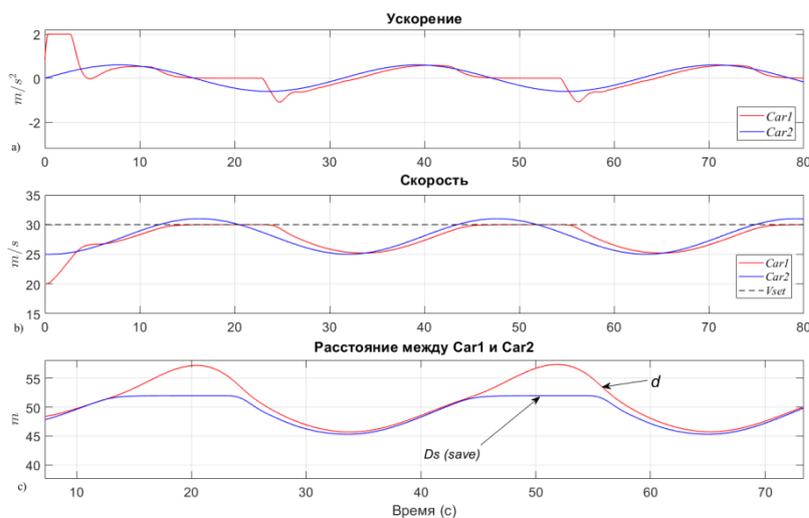


Рис. 3. Результат моделирования системы АСС

В модели ведущий автомобиль Car2 меняет свое ускорение по синусоиде то удаляясь, то приближаясь к ведомому автомобилю Car1 (см. Рис.3а). Контроллер Car1 следует за этими движениями то замедляясь, то ускоряясь. При этом его скорость не превышает установленного значения V_{set} (см. Рис.3б), а расстояние d между автомобилями остается всегда больше, чем установленное значение D_s (см. Рис. 3с).

2. Принцип действия системы удержания автомобиля на полосе

Для безопасного вождения одного круиз контроля недостаточно, поскольку дорога имеет траекторию с некоторой кривизной. Поэтому без дополнительных систем управления водитель вынужден непрерывно следить за дорогой, чтобы в нужный момент изменять направление движения. Для автономизации этого процесса применяют систему удержания автомобиля на полосе движения.

Динамическая модель автомобиля по схеме велосипеда Car1 (см. Рис. 4) в условиях действия системы АСС с учетом входных данных угла поворота переднего руля δ и продольного ускорения a [7], приблизительно определяется следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V_x \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2C_f+2C_r}{mV_x} & 0 & -V_x - \frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{mV_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2C_f l_f - 2C_r l_r}{I_z V_x} & 0 & -\frac{2C_f l_f^2 + 2C_r l_r^2}{I_z V_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ \psi \\ \dot{\psi} \\ V_x \\ \dot{V}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{2C_f l_f}{I_z} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_y \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Где I_z – момент инерции транспортного средства при рыскании (кгм^2); l_f и l_r – продольное расстояние от центра тяжести до передних и задних шин (м); C_f и C_r – жесткость передних и задних шин на поворотах (Н/рад); m – масса автомобиля (кг); V_x – продольная скорость автомобиля (м/с); V_y –

боковая скорость (м/с), ψ – угол рыскания и скорость его изменения $\dot{\psi}$ (рад/с); R – текущий радиус кривизны траектории, с центром в точке O (см. Рис.4). Данная модель позволяет прогнозировать продольную динамику корпуса, акселератора и инерцию, используя постоянную времени τ .

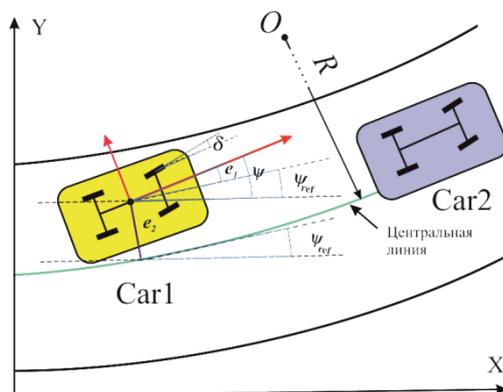


Рис. 4. Расположение автомобилей на дороге в процессе управления системы удержания на полосе

Выходные данные динамики автомобиля V_x и V_y основаны на собственных фиксированных координатах кузова. Для расчета траектории, пройденной транспортным средством, фиксированные координаты кузова преобразуются в глобальные с помощью следующих преобразований:

$$\dot{X} = V_x \cos(\psi) + V_y \sin(\psi) \quad \dot{Y} = V_x \sin(\psi) + V_y \cos(\psi) \quad (3)$$

Цель рассматриваемой модели рулевого управления – удерживать автомобиль на своей полосе движения и следовать по извилистой дороге, регулируя угол поворота переднего руля δ , в соответствии с [7]. Цель достигается за счет уменьшения погрешности бокового смещения e_1 и погрешности угла рыскания e_2 до нуля (см. Рис.4) с помощью следующих уравнений:

$$\dot{e}_1 = V_x e_2 + V_y \quad e_2 = \psi - \psi_{ref} \quad (4)$$

Важным элементом системы удержания автомобиля на полосе является определение центральной линии полосы дороги на некотором горизонте прогнозирования. Это выполняется с помощью одной или двух видеокамер с последующей обработкой изображений с целью приблизительного выделения контура дороги и ее центральной линии на видимом участке. Таким образом, вычисляется основное направление центральной линии дороги и ее производная на прогнозируемом горизонте. Определяется также время выборки T_s и длительность прогнозирования – T . В результате образуется эталонный маршрут в виде массива $N = T/T_s$ путевых точек.

Согласно уравнениям (1) и (2) воздействие управляющих сигналов рулевого управления δ и ускорения от акселератора a имеют сильно инерционный характер, параметры которого могут меняться, в том числе и случайным образом. Для устойчивой работы системы управления входные параметры вектора скорости (3) должны быть измеряемыми с максимальным быстродействием. Очевидно, что использование для этой цели обработки изображений видеокамер недостаточно из-за длительных вычислений. Инерциальные датчики вектора скорости не обладают достаточным быстродействием и чувствительны к изменению параметров модели (2), которые могут меняться. Вектор скорости можно измерить с помощью одометров задних колес. Однако, при движении с большой скоростью, возможно скольжение задних и передних колес, что может привести к резкому изменению угла рыскания и сбою системы управления. Более подходящими для прямого мгновенного измерения вектора скорости и кривизны траектории могут быть микроволновые доплеровские датчики скорости.

3. Прямое измерение вектора скорости микроволновыми доплеровскими датчиками

Наиболее подходящим быстродействующим методом измерения мгновенного вектора скорости является применение СВЧ доплеровских датчиков линейных скоростей задних колес [8]. В них используется непрерывное излучение радиоволн СВЧ диапазона на одной частоте. Приемопередающая антенна излучает вперед и под углом α к направлению поступательного движения колеса в вертикальной плоскости СВЧ волны с частотой f_0 . Отраженные от поверхности дороги СВЧ волны принимаются этой же антенной. Затем они смешиваются в смесителе с частью излучаемых волн, в

результате чего выделяется доплеровский сигнал с частотой f . Эта частота будет пропорциональна линейной скорости колеса v :

$$f = 2vcos(\alpha)/\lambda_0$$

Где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны электромагнитных колебаний, c – скорость света. Соответственно скорость колеса можно выразить через доплеровскую частоту:

$$v = \lambda_0 f / 2cos(\alpha) \quad (5)$$

Для определения вектора скорости на задних колесах транспортного средства размещаются два СВЧ датчика – на левом и правом колесе. Продольные скорости левого и правого заднего колеса V_L и V_R можно выразить как функции угла рыскания автомобиля ψ :

$$V_L = \dot{\psi}(R - W/2) \quad V_R = \dot{\psi}(R + W/2)$$

Где R – мгновенный радиус траектории движения транспортного средства, W – расстояние между задними колесами автомобиля (колея). Из этих двух уравнений можно найти продольную скорость V_x , скорость угла рыскания $\dot{\psi}$ и мгновенный радиус поворота автомобиля R :

$$V_x = (V_R + V_L)/2 \quad \dot{\psi} = (V_R - V_L)/W \quad R = V_x W / (V_R - V_L) \quad (6)$$

Обычно траекторию оценивают в виде функции кривизны $\rho(t) = 1/R(t)$, тогда

$$\rho = (V_R - V_L) / V_x W \quad (7)$$

При измерении доплеровских частот датчиков СВЧ правого и левого колес f_R и f_L , можно вычислить параметры движения из формул (5) и (6):

$$V_x = \lambda_0(f_R + f_L) / 4cos\alpha \quad \dot{\psi} = (f_R - f_L) / 2Wcos\alpha \quad R = W(f_R + f_L) / 2(f_R - f_L) \quad (8)$$

Также вычисляется и кривизна траектории ρ :

$$\rho = 2(f_R - f_L) / W(f_R + f_L) \quad (9)$$

4. Модуль системы удержания на полосе в составе общей системы круиз-контроля

Модуль системы удержания на полосе (LKM) предполагается для работы совместно и параллельно с модулем круиз контроля ACC. Схема модуля приведена на Рис.5.

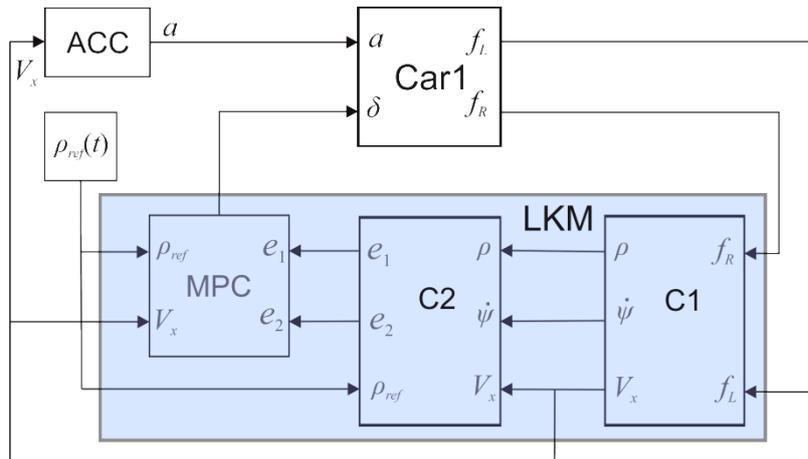


Рис. 5. Модуль совместной работы системы круиз контроля и удержания на полосе

Модуль работает следующим образом. С выхода динамического блока автомобиля сигналы доплеровских частот левого и правого заднего колеса поступают на входы преобразователя С1, где вычисляются текущие параметры движения V_x , $\dot{\psi}$ и ρ в соответствии с уравнениями (8) и (9). Далее эти сигналы поступают на входы вычислителя ошибок С2, где определяются погрешности от совпадения текущих углов рыскания и бокового смещения с эталонными значениями траектории с кривизной $\rho_{ref} - e_2$ и e_1 , в соответствии с формулами (4):

$$e_1 = \int V_x(e_2 + \cos\psi)dt \quad e_2 = \int \dot{\psi} dt - \int V_x\rho_{ref} dt \quad (10)$$

Эталонная кривизна ρ_{ref} и её производная формируется после обработки изображения с камеры в виде массива путевых точек с горизонтом по времени движения T с дискретностью T_s и затем аппроксимируется функцией кривизны $\rho_{ref}(t)$. На основании $\rho_{ref}(t)$, инерционных параметров динамической модели (2), входных сигналов погрешностей угла рысканья e_1 и бокового отклонения e_2 , модуль прогнозируемого управления MPC формирует сигнал рулевого управления δ . Этот сигнал модуль подает на динамический блок автомобиля Car1 наряду с сигналом ускорения a от блока АСС.

На Рис.6 представлены результаты симуляции модели удержания на полосе на участке траектории длиной 15 секунд для поперечного отклонения, относительного угла рыскания и рулевого угла. Для моделирования использовались следующие параметры автомобиля: $[I_z, l_f, l_r, C_f, C_r, m, V_x] = [2875; 1,2; 1,6; 19000; 33000; 1575; 15]$. Для времени выборки $T_s = 0,1$ с и длительности прогнозирования $T = 1$ с, горизонт прогнозирования кривизны T/T_s составит 10 с. Для устранения возможных сбояв системы устанавливаются пределы регулировки рулевого угла $[\delta_{min} \delta_{max}] = [-0,5 +0,5]$.

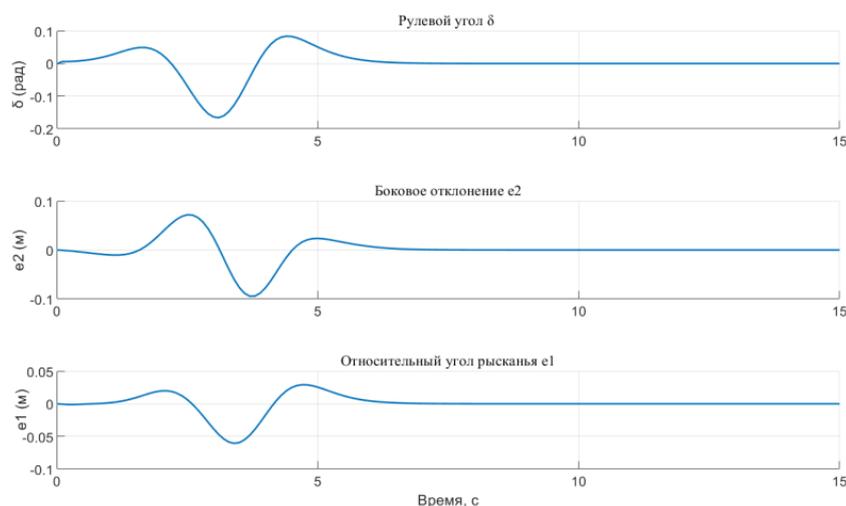


Рис. 6. Результаты симуляции модуля удержания на полосе

5. Заключение

Результаты исследования показывают возможность параллельной работы двух систем управления – адаптивного круиз контроля и удержания автомобиля на полосе в устойчивом режиме при высоких скоростях и сильной извилистости дороги. Этому способствует прямое измерение текущей кривизны и мгновенного вектора скорости транспортного средства с высоким быстродействием, свойственным доплеровским датчикам продольной скорости колес с частотным выходом. Благодаря этому обработка модулем прогнозного управления MPC на участке текущего горизонта происходит без задержек. В результате процесс следования по полосе на извилистой дороге происходит быстро, несмотря на постоянные изменения скорости из-за работы блока круиз контроля.

Литература

1. Rawlings J. B., Mayne D. Q., Diehl M. Model Predictive Control: Theory, Computation and Design. Nob-Hill Publishing, 2nd Edition, 2020.
2. Seborg D. E., Edgar T. F., and Mellichamp D. A. Process Dynamics and Control, 2nd Edition, Wiley, 2004.– P. 713.
3. Artis J.-P., Henrio J.-F. Automotive Radar Development Methodology // Proc. Of the International Conference on Radar Systems. – Brest, France, 1999. – P. 1-4.
4. Khablov D.V. Continuous terrestrial positioning based on microwave displacement sensors // Measurement Techniques. 2019. Vol. 62, No. 6. – P. 554-561.
5. Kärnfelt C., Péden A., Bazzi Ali, Shhadé G. E. H., Abbas M., and Chonavel T.. 77 GHzACC Radar Simulation Platform // Proc. of the 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST). – Lille, France, 2009. – P. 209–214.
6. Lynch, Kevin M., and Frank C. Park. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. 1st ed. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 2017.
7. Morari M., Lawrence N., Ricker. Model Predictive Control Toolbox, For Use with MATLAB®. User's Guide, www.mathworks.com.
8. Khablov D.V. Control system for unmanned transport electric vehicles based on microwave Doppler sensors // Measurement Techniques. 2022. Vol. 65, No 2. – P. 142-149.