- 6. **Malyshev R. A.** *Kratkii analiz metodov ispytanii inertsial'nykh MEMS-datchikov* (Short analysis of test methods inertial MEMS sensors), *Datchiki i Sistemy*, 2011, no. 8, pp. 64—66 (in Russian).
- 7. **Sun Y., Kim K.** Patent SShA na izobretenie US 8317245. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors. Opubl. 27.11.2012. 7 p.
- 8. **Bairak V. V., Sharkov M. V.** *Stend dlya ispytanii izdelii na sovest-noe vozdeistvie vibratsionnykh i lineinykh uskorenii. Patent* (Stand for testing of products on conscientious impact vibration and linear accelerations. Patent) G01M7/02 Opublik. 10.08.2010 (in Russian).
- 9. **Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R.** A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor. Expo proceedings*, 1998, pp. 195—213.
- 10. **Katomin N. N.** *Ispytaniya giroskopov i akselerometrov* (Tests of gyroscopes and accelerometers), Moscow, Published in MATI, 1993, 94 p. (in Russian).

Corresponding author:

Parfenov Nikolay M., Ph. D., Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: sedennik@mail.ru

УДК 629.13(075.8)

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., зав. сектором управления и навигации, devyatis@iacp.dvo.ru, **А. К. Стоценко,** аспирант, stotsenko@iacp.dvo.ru,

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером

Предложены и исследованы теоретико-механические модели управляемого продольного движения пары (звена) роботизированных транспортных единиц, движущихся с заданной абсолютной скоростью и сохраняющих заданное расстояние между собой. Рассмотрены способы сохранения требуемого режима совместного движения при управлении со стороны каждой из транспортных единиц пары. Выявлена асимметрия этих возможностей. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: движение, скорость, расстояние, транспортный поток, транспортная единица, управление, обратная связь, модель

Введение

Одной из распространенных причин дорожнотранспортных происшествий является неспособность транспортного средства, движущегося в транспортном потоке, своевременно учесть изменения скорости и режима работы двигательно-тормозной системы впереди идущего участника движения. При этом ответственность за отсутствие столкновений возлагается на позади идущего [1]. По сути (де-факто), уже изложенного достаточно для актуализации исследований по управлению продольным движением с конечной целью создания математической, информационной и технической платформ, обеспечивающих решение проблемы активной безопасности движения на сухопутных транспортных магистралях. Вместе с тем, для полноты представления проблемы следует указать еще на один аспект актуальности предлагаемого исследования, который связан уже с целевой организацией группового (коллективного) движения, когда речь идет о системах экологического мониторинга и оценки параметров физических полей естественного и искусственного происхождения.

Настоящая работа посвящена теоретико-механическим моделям управляемого продольного движения двух транспортных единиц (ТЕ) — пары (звена) ТЕ — как простейшей системы коллективного (группового) поведения (движения), понимание которого существенно необходимо для после-

дующего аналитического конструирования и исследования более сложных составных систем.

Главным образом, работа ориентирована на создание и исследование автоматических (роботизированных) систем коллективного движения (поведения); вместе с тем, в моделях управления движением выделен сегмент, который при необходимости (хотя бы по соображениям полноты методологии) можно интерпретировать как режим "ручного" (человеком-пилотом) управления, что позволяет далее, заполняя пространство между понятиями "ручной" и "автоматический", обращаться к образам полуавтоматического и корректируемого движений.

Модели управления и их исследование

Начнем с модели управляемого продольного движения базового системообразующего элемента транспортного потока — отдельно взятой ТЕ, представив ее в следующем виде:

$$\dot{R} = V, R(0) = R_0;
\dot{V} = F - S - g_v, V(0) = V_0, S = A + Q;
\dot{F} = -\mu(F - \varphi(V_d) + \gamma(V - V_d) + T), F(0) = F_0,$$
(1)

где R — расстояние, пройденное ТЕ; V — линейная скорость движения ТЕ, $V \ge 0$; F, S — удельные силы (далее — силы), F — сила, создаваемая двигательнотормозной системой ТЕ, и S — сила сопротивления движению; $A = 0.5kV^2$ — сила аэродинамического

сопротивления [2], 0.5k — фактор обтекаемости, $k = 2c\rho\sigma$, с — коэффициент лобового сопротивления, ρ —плотность воздуха, $\sigma = \alpha BH/m$ — лобовая удельная площадь ТЕ, а — коэффициент заполнения лобовой площади, B и H — наибольшие ширина и высота TE, m — масса TE; Q — сила сопротивления качению, причем Q = fg при V > 0, g — ускорение свободного падения, f — коэффициент сопротивления качению; T — сила торможения; g_v проекция ускорения свободного падения на направление движения, далее полагаем $g_v = 0$; V_d задаваемая скорость движения TE, $\varphi(V_d)$ — удельная сила, реализующая задаваемое движение; $\mu = \tau^{-1}$, τ — постоянная времени реализации силы F; γ коэффициент обратной связи, поддерживающей режим заданного движения. Значение т зависит от того, каким образом осуществляется управление TE — в режиме так называемого ручного управления (пилотом) или в автоматическом режиме (случай роботизированной ТЕ). При пилотном управлении вероятность того, что у пилота $\tau_p \leqslant 0.07$ с, чрезвычайно мала; причем τ_p является показателем, описывающим моторику человека; у роботизированных ТЕ $\tau = \tau_a$ — технический параметр, и, вообще говоря, возможны значения $\tau_a < 0.07$ и $\tau_a > 0,07$. Далее примем $\tau_p = \tau^* = 0,07$ за критическое значение при пилотном управлении и, соответственно, обозначим $(\tau^*)^{-1} = \mu^*$.

Заметим, что в настоящей работе принято значение $\mu = \text{const}$, хотя μ , вообще говоря, может быть некоторой функцией времени, например, ступенчатой.

Теперь обратим внимание на следующее. Модель (1) корректна с момента времени, принимаемого за t=0, начиная с которого V>0, и ему при изначально неподвижной ТЕ предшествует отрезок времени длительностью Δt , на котором сила F меняется от значения $F^*<Q$ до значения $F=F_0=Q$. Принимая $\gamma=0$, $V_d={\rm const}>0$ (при этом $\phi(V_d)=kV_d^2+Q$), находим $F_0=F^*{\rm e}^{-\mu\Delta t}+\phi(V_d)(1-{\rm e}^{-\mu\Delta t})=Q$ и, соответственно, $\Delta t=(\ln(kV_d^2+Q-F^*)-\ln(kV_d^2))/\mu$. Как видим, изложенное доопределяет силу как $Q=F(\theta)$, $\Delta t\geqslant\theta\geqslant0$. Таким образом, по сути, сила сопротивления качению отождествляется с некоторой силой сухого трения; одновременно с этим в модели (1) доопределяются возможные значения F_0 , а именно, $F_0\geqslant Q$.

Систему уравнений (1) назовем моделью ординарного управляемого движения ТЕ. Исследуем устойчивость такого движения с заданной скоростью V_d , для чего обратимся к методологии уравнений "первого приближения" А. М. Ляпунова [3]. В предположении, что T и Q не зависят от V, эти уравнения, согласно (1), имеют вид

$$\delta V = \delta F - S \delta V, \ \delta V(0) = \delta V_0,
\delta F = -\mu \delta F - \mu \gamma \delta V, \ \delta F(0) = \delta F_0,$$
(2)

где δV и δF — первые вариации переменных состояния, $S' = S'(V_d) = \frac{\delta S}{\delta V}, \ V = V_d;$ очевидно, S' > 0.

Пусть V_d = const. Необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости системы (2), согласно критерию Рауса—Гурвица [4], принимают вид $S' + \mu > 0$, $(S' + \mu)(S' + \gamma)\mu > 0$.

Тогда, учитывая, что S' > 0 в силу однонаправленности движения, а $\mu > 0$ в силу очевидных физических представлений об инертности процесса реализации силы F, получаем область определения параметра γ : $\gamma > -S'$. Заметим, что этой области принадлежит и значение $\gamma = 0$ — случай отсутствия обратной связи по скорости. Вместе с тем, ввиду определенной фатальности значений S и μ именно наличие обратной связи по скорости обеспечивает возможность реализации желаемого состояния комфортности движения — движения без гармонических колебаний переменных состояния. В определенном смысле у играет, таким образом, роль коэффициента комфортности. В последнем нетрудно убедиться, решив соответствующее (2) характеристическое уравнение. Следует заметить, что, говоря о комфортности движения, мы понимаем ее исключительно при анализе линейного приближения модели, а не в рамках исходных представлений о модели движения как нелинейной.

Пусть теперь $V_d = V_d(t)$. В этом случае обратимся к достаточно общему методу исследования проблемы устойчивости — методу функций Ляпунова. В качестве функции Ляпунова возьмем положительно определенную квадратичную форму $L = q_1 \delta V^2 + q_2 \delta F^2$, где q_1 и q_2 — произвольные положительные константы. Тогда нетрудно убедиться, что $\dot{L} < 0$, т. е. исследуемая система с достаточностью асимптотически устойчива, если выполняются следующие условия: $S'q_1 > 0$, $\mu q_2 > 0$, $q_2 \mu \gamma - q_1 = 0$, причем первые два из них выполняются автоматически, а из последнего в силу свободы выбора значений q_1 и q_2 , по сути, следует определение области допустимых значений параметра обратной связи, т. е. $\gamma \geqslant 0$.

Главный вывод, следующий из изложенного анализа ординарного движения ТЕ, состоит, таким образом, в том, что при значениях $\gamma \geqslant 0$ не происходит срыва поддержания заданной скорости ТЕ при смене режима $V_d = \mathrm{const}$ на режим $V_d = V_d(t)$ и обратно.

Перейдем теперь к основной теме, обсуждаемой в настоящей статье, — моделям и анализу управляемого движения пары (звена) ТЕ с конечной целью оценить возможности поддержания заданной дистанции между ТЕ, обеспечивающей такой уровень безопасности движения с заданной скоростью V_d , при котором исключается наезд ведомой ТЕ (TE_2) на ведущую (TE_1 — лидер в звене).

Полагая, что движение каждой ТЕ удовлетворяет системе уравнений (1), и обозначая индексами $i = \overline{1,2}$ соответствующие ТЕ₁ и ТЕ₂ переменные

состояния (R, V, F) и параметры, запишем уравнения относительного движения TE, а именно:

$$\dot{r} = v, \ r(t_m) = r_m,$$

 $\dot{v} = F_1 - S_1 - F_2 + S_2, \ V(t_m) = V_m,$
(3)

где t_m — момент времени начала мониторинга относительного движения; $r = R_1 - R_2 - d_0$, $v = V_1 - V_2$, d_0 — динамически поддерживаемое значение заданной дистанции между ТЕ. Как видно из (1), управление относительным движением возможно путем формирования каждой из сил F_1 или F_2 , при этом один из объектов (в данном случае — TE_1 или TE_2) выполняет ординарное движение, или путем одновременного формирования сил F_1 и F_2 с одинаковыми или отличающимися схемами обратных связей по переменным r и v, текущие значения которых доставляются измерителями. В качестве последних могут выступать как измерители локационного типа (оптические, радио- и акустические), так и навигационные спутниковые системы (НСС), например ГЛОНАСС. Использование НСС представляется наиболее перспективным в силу высокой степени унификации как метода получения навигационной информации, так и технических средств. Пусть ординарное движение выполняет ТЕ1. Тогда режим заданного движения звена будет поддерживаться движением TE_2 с помощью управляющей силы F_2 , а именно

$$\dot{F}_2 = -\mu_2(F_2 - \varphi_2(V_d) - \gamma_2 \nu - \beta_2 - T_2), \tag{4}$$

где γ_2 и β_2 — коэффициенты обратной связи. Примем $T_2=0$.

Устойчивость относительного движения (v = 0, r = 0) исследуем путем анализа уравнений первого приближения:

$$\delta \dot{r} = \delta v, \, \delta r(t_m) = \delta r_0,$$

$$\delta \dot{v} = \delta F_2 + S_2' \delta v, \, \delta v(t_m) = \delta r_0,$$

$$\delta \dot{F}_2 = -\mu_2(\delta F_2 - \gamma_2 \delta V - \beta_2(\delta r)), \, \delta F_2(0) = \delta F_2,$$
(5)

где
$$S_2' = \left. \frac{\partial S_2}{\partial V} \right|_{V = V_d}$$
.

Полагая $V_d = \text{const} > 0$, запишем характеристическое уравнение для системы (5):

$$a_0\lambda_3 + a_1\lambda_2 + a_2\lambda + a_3 = 0, (6)$$

где $a_0=1$, $a_1=\mu_2-S_2'$, $a_2=\mu_2(\gamma_2-S_2')$, $a_3=\mu_2\beta_2$. Согласно критерию Рауса—Гурвица, для того чтобы все корни действительного уравнения (6) имели отрицательные действительные части, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись неравенства

$$C_0 = a_0 > 0, \ C_1 = a_1 = \mu_2 - S_2' > 0,$$

 $C_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 = \mu_2 ((\mu_2 - S_2')(\gamma_2 - S_2') + \beta_2) > 0,$
 $C_3 = \mu_2 \beta_2 C_2 > 0.$ (7)

По сути, неравенства (7) описывают область значений параметров μ_2 , β_2 и γ_2 , обусловливающих асимптотическую устойчивость управляемого (со стороны TE_2) относительного движения. Перепишем (7) в более явной форме:

$$\mu_2 > S_2', \, \beta_2 > 0, \, \gamma_2 > S_2' - \frac{\beta_2}{\mu_2 - S_2'}.$$
 (8)

Из неравенств (8) наиболее интересным для интерпретации является первое, т. е. $\mu_2 > S_2'$, или $\mu_2 > kV_d$, которое выполняется, в чем нетрудно убедиться, для всех видов автотранспорта, за исключением, возможно, ряда легких скоростных молелей.

Поменяем теперь ролями TE_1 и TE_2 , т. е. пусть ординарное движение выполняет TE_2 , а управление относительным движением осуществляется со стороны впереди идущей TE_1 с помощью силы F_1 :

$$F_1 = -\mu_1(F_1 - \phi_1(V_d) + \gamma_1 \delta V + \beta_1(r - r_0) - T_1),$$
 (9) где полагаем $T_1 = 0.$

Повторяя ранее выполненную процедуру анализа устойчивости относительного движения в новой ситуации, приходим к следующим необходимым и достаточным условиям асимптотической устойчивости: $C_1 = \mu_1 + S_1' > 0$, $C_2 = \mu_1((\mu_1 + S_1')(\gamma_1 + S_1') - \beta_1) > 0$, $C_3 = \mu_1\beta_1$, $C_2 > 0$, или

$$\mu_1 > -S_1',$$

$$\gamma_1 > -S_1' + \frac{\beta_1}{\mu_1 + S_1'},$$

$$\beta_1 > 0$$
(10)

Учитывая, что $S_1'>0$ и $\tau_1>0$, единственно допустимое определение области значений μ_1 — это $\mu_1>0$, из чего, в свою очередь, следует тот факт, что, в отличие (и это существенное отличие) от предыдущей ситуации (с управляющей силой F_2), в рассматриваемой ситуации выбор режима управления (пилотного или автоматического) вполне произволен, так как не зависит от значения выбранной скорости движения звена V_d .

Ранее, при обсуждении ординарного движения ТЕ, было введено понятие его комфортности. Транслируя это понятие на относительное движение, поддерживаемое двумя изложенными способами организации обратной связи, потребуем, чтобы все корни соответствующих кубичных характеристических уравнений были действительными отрицательными, что эквивалентно требованию обнуления мнимых частей корней в решениях Кардано. Выполняя последнее, приходим к уравнению относительно коэффициента a_3 :

$$a_3^2 + 2\left(\frac{2a_1^2 - 9a_1a_2}{27}\right)a_3 + a_2^2\left(\frac{4a_2 - a_1^2}{108}\right) = 0,$$
 (11)

которое, по существу, учитывая вид коэффициентов a_i , $i=\overline{1,3}$, является уравнением связи между параметрами каждой отдельно взятой системы организации относительного движения.

Существенно, что $a_3 > 0$. Необходимость сохранения этого свойства накладывает ограничения на коэффициенты уравнения (11), включая первый, равный 1, а именно: знаки коэффициентов должны чередоваться. Выполняя это условие, получаем систему двух простых неравенств:

$$a_2 > \frac{2a_1}{9}$$
, (12)

$$a_2 > \frac{a_1^2}{4}$$
. (13)

Сравнивая (12) и (13) между собой, приходим к следующему правилу вывода, с гарантией обусловливающему заявленные выше свойства корней кубичных уравнений.

Правило.

Если
$$a_1 < 8/9$$
, то $a_2 > 2a_1/9$;
если $a_1 > 8/9$, то $a_2 > a_1^2/4$. (14)

Обсуждение (14) начнем с неравенств $a_1 < 8/9$ и $a_1 > 8/9$. Если управляющей силой является F_1 , то $a_1 = \mu_1 + S_1'$ и неравенство $a_1 < 8/9$ трансформируется к виду $\mu_1 < 8/9 - S_1'$; учитывая, что S_1' — величина малая, находим, что $\tau_1 = \mu_1^{-1} > 1,1$ с, т. е. сталкиваемся с ситуацией очень медленной функции $F_1(t)$. Допуская, что для пилота существуют пределы возможностей участия в генерации как быстрых, так и медленных процессов, примем, что при его участии характерное время процесса $F_1(t)$ характеризуется значением $\tau_1 = \tau_p \in \Omega_p = (\tau_p^*, \tau_p^{**})$, где $\tau_p^* = 0.07$ с и $\tau_p^{**} = 1.1$ с. Безусловно, существуют аналогичные ограничения и при автоматическом (беспилотном) управлении, такие что $\tau_1 = \tau_a \in \Omega_a =$ = ($\tau_a^*, \, \tau_a^{**}$). Примем, что $\Omega_p \in \Omega_a$. Таким образом, режим комфортного относительного движения при малых ($V_d \le 8/9k$) абсолютных скоростях звена ТЕ может осуществляться только при автоматическом формировании управляющей силы F_1 .

Рассуждая так же, как и выше, о неравенстве $a_1 > 8/9$ или $\mu_1 + S_1' > 8/9$, можем утверждать, что оно реализуется как в пилотном, так и в беспилотном вариантах управления F_1 для любых значений $V_d > 0$, если $\mu_1 \in \Omega_\mu = (\mu_p^{**}, \ \mu_p^*)$, где $\mu_p^* = (0.07)^{-4}$ и $\mu_p^{**} = 8/9$.

Пусть теперь имеет место случай, когда управляющей силой, поддерживающей заданное относительное движение, является F_2 . В этом случае, рассматривая неравенства $\mu_2 - S_2' < \mu_p^{**}$ и $\mu_2 - S_2' > \mu_p^{**}$, необходимо учитывать еще и условие $\mu_2 - S_2' > 0$. Тогда нетрудно убедиться, что для $\mu_2 \in \Omega_\mu$ всегда существует $V_d \in \Omega_\nu = (0, (\mu_p^* - \mu_p^{**})/k)$, так что указанные неравенства могут быть реализованы при пилотном управлении (как, разумеется, и при беспилотном).

Перейдем к раскрытию Правила (14) в частных случаях комфортного управления относительным движением двух ТЕ.

• Случай управления силой F_1 . **Правило.**

Если
$$\mu_1 + S_1' < 8/9$$
, то $\gamma_1 > -S_1' + 2(\mu_1 + S_1')/9\mu_1$; если $\mu_1 + S_1' > 8/9$, то $\gamma_1 > -S_1' + (\mu_1 + S_1')^2/4\mu_1$. (15)

• Случай управления силой F_2 **Правило.**

Если
$$\mu_2 - S_2' < 8/9$$
, то $\gamma_2 > S_2' + 2(\mu_2 - S_2')/9\mu_2$;
если $\mu_2 - S_2' > 8/9$, то $\gamma_2 > -S_2' + (\mu_2 - S_2')^2/4\mu_2$. (16)

Область значений γ_i и β_i , $i=\overline{1,2}$, обусловливающих комфортное относительное движение, может быть построена, таким образом, путем выбора значений γ_i в соответствии с правилами (15) и (16) с последующим вычислением значений β_i , учитывая, что $a_3=\mu_\beta$; при этом параметры μ_i и V_d остаются известными. Вместе с тем, вполне закономерен вопрос о том, при всех ли значениях последних существуют решения, обусловливающие заданные динамические свойства системы, включая и сформулированное здесь свойство комфортности относительного движения. Ответ на такой вопрос дается теоремой Виета, теперь уже в рамках проблемы синтеза управляющей системы с желаемыми динамическими свойствами.

Пусть эти свойства представлены набором отрицательных характеристических чисел $\Lambda=(\lambda_1,\,\lambda_2,\,\lambda_3)$ кубичного уравнения. Тогда $a_0=1,\,a_1=\sum\limits_{i=\overline{1,3}}|\lambda_i|,$

$$a_2=rac{1}{2}\sum_{i,j=rac{1}{1,\,3,\,i
eq j}}\!\!\!|\lambda_j\!|\lambda_j\!|,\;a_3=|\lambda_1\!||\lambda_2\!||\lambda_3\!|,\;$$
и при раздель-

ном управлении силами F_1 и F_2 имеем соответственно:

$$\mu_1 + k_1 V_d = a_1, \, \gamma_1 = a_2 / \mu_1 - k_1 V_d, \, \beta_1 = a_3 / \mu_1; \, (17)$$

$$\mu_2 - k_2 V_d = a_1, \, \gamma_2 = a_2/\mu_2 - k_2 V_d, \, \beta_2 = a_3/\mu_2.$$
 (18)

Сравнивая (17) и (18), находим, что симметрия ролевых функций сил F_1 и F_2 , строго говоря, отсутствует, и это хорошо заметно при $\mu_1 = \mu_2$ и $k_1 = k_2$.

Завершая этот раздел статьи, приведем таблицу, в которую включены одиннадцать моделей управ-

Виды моделей управления относительным движением

Функции		№ модели										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_1	β_1	+ +	1 1	+ +	+	- +	- +	- +	+ +	+ +	+	+
F ₂	γ_2 β_2	1 1	+	+	- +	+	_	+	+	- +	+ +	+

ления относительным движением, способных обеспечить решение задачи его асимптотической устойчивости. Под номерами 1 и 2 в таблицу включены и рассмотренные выше две модели, в которых относительное движение находится под управлением либо ТЕ1, либо ТЕ2; "+" и "-" означают наличие или отсутствие соответствующей обратной связи.

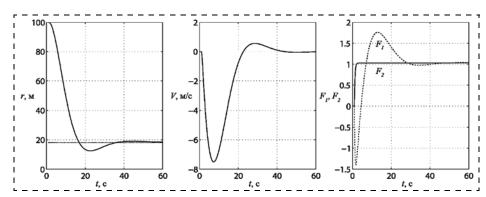


Рис. 1. Результаты эксперимента 1

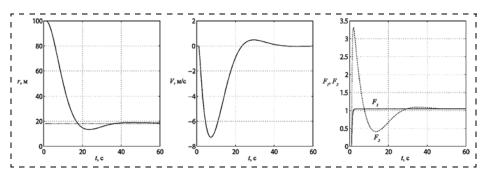


Рис. 2. Результаты эксперимента 2

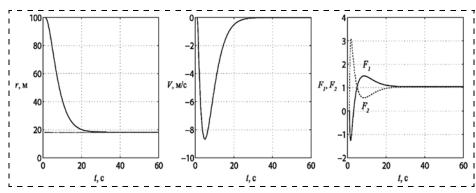


Рис. 3. Результаты эксперимента 3

Численное моделирование движения ТЕ

В численных экспериментах была рассмотрена пара ТЕ:

1) пассажирский автобус ГАЗ 3221 "Газель" 2012 года выпуска со следующими динамическими характеристиками: мощность двигателя — 107 л. с., максимальная скорость $V_{\rm max}=36$ м/с (129,6 км/ч), время разгона до 100 км/ч: $t_{0:100}=30$ с [5], $\mu_1=1,487$, фактор обтекаемости $k_1=0,0013$;

2) легковой автомобиль Subaru Forester 2014 года выпуска (АКПП, двигатель FA20 с турбонаддувом) со следующими динамическими характеристиками: мощность двигателя — 241 л. с., максимальная скорость $V_{\rm max}=61.4$ м/с (221,04 км/ч), время разгона до 100 км/ч: $t_{0:100}=7.9$ с [6], $\mu_2=1.509$, фактор обтекаемости $k_2=0.0009$.

Эксперименты проводили с использованием среды моделирования MATLAB. Были проведены три эксперимента — для моделей 1, 2, 3 согласно

таблице соответственно. Начальная дистанция между ТЕ была принята равной 100 м, для движения звена была выбрана скорость V_d , равная 10 м/с, минимальная безопасная дистанция между ТЕ — 18 м. Эксперименты проводили на временном интервале в 60 с. Параметры обратной связи составили: для эксперимента 1 $\gamma_1 = 0,2392,$ $\beta_1 = 0.0336$; для эксперимента 2 $\gamma_2 = 0.2395, \ \beta_2 = 0.0331; \ для$ эксперимента 3 $\gamma_1 = 0,2392,$ $\beta_1 = 0.0336, \ \gamma_2 = 0.2395, \ \beta_2 = 0.0336$ = 0,0331, т. е. те же, что для экспериментов 2 и 1.

Параметры модели подобраны таким образом, что характеристические числа принимают значения $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) =$ = (-0,5,-0,5,-0,5). Таким образом, модели с данными параметрами асимптотически устойчивы. По теореме Виета с использованием выражений (17) и (18) получаем $a_1 = 1,5$, $a_2 = 3/8$, $a_3 = 0.05$ для экспериментов 1 и 2. Условия Рауса — Гурвица (7) принимают вид $C_0 = a_0 = 1 > 0$, $C_1 = a_1 = \mu_2 - S_2' = 1.5 > 0$, $C_2 = a_1 a_2 - a_3 a_0 = 0.575 > 0$, $C_3 = \mu_2 \beta_2 C_2 = 0.575 > 0$ = 0.0287 > 0 и удовлетворяются, как и условия (12), (13).

На рис. 1—3 представлены результаты экспериментов.

Полученные результаты численных экспериментов подтвердили возможность осуществ-

ления различных видов управления, реализующих устойчивое относительное продольное движение звена ТЕ в рамках представленной в данной работе теоретико-механической модели управляемого продольного движения двух ТЕ.

Заключение

Таким образом, в работе представлены модели ординарного и относительного движений, адекватные движению реальных транспортных средств. Выполнено исследование устойчивости движения. Результаты аналитического конструирования моделей подтверждены в численных экспериментах с использованием характеристик реальных транспортных средств. Несмотря на то что статья посвящена преимущественно системам движения транспорта, с очевидностью видна возможность более широкого применения подобных моделей для оп-

ределения возможностей лидера и коллектива в задаче достижения общей цели; примечательна асимметрия таких возможностей.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН № 15-1-4-042 (программа "Дальний Восток").

Список литературы

- 1. **Девятисильный А. С., Дорожко В. М.** Исследование задачи автоматического следования за лидером в системе двух транспортных единиц // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 2. С. 163—169.
- 2. **Тарасик В. П.** Теория движения автомобиля. СПб.: БХВ, 2006. 478 с.
- 3. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. 471 с.
- 4. **Постников М. М.** Устойчивые многочлены. М.: Наука, 1981. 176 с.
- 5. **Микроавтобусы** ГАЗ-322132 Газель. URL: http://www.avto-gaz.ru/barguzin/gaz-322132 (дата обращения: 30.10.2014)
- 6. **Характеристики** Subaru Forester. URL: http://subaru.ru models/forester/specifications/ (дата обращения: 30.10.2014).

Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem

A. S. Devyatisilny, devyatis@iacp.dvo.ru, A. K. Stotsenko, stotsenko@ iacp.dvo.ru, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Received on November 13, 2015

The article is devoted to the theoretical mechanical models of the guided longitudinal motion of a couple of transport units. Such models are essential for analysis and construction of complex transportation system models, since the traffic, in which only the adjacent vehicles are interacting, can be presented as a set of transport units' couples. The key target is to create and research the models, suitable for the robot-aided vehicles, considering the difference between the piloted, semi-automated and automated control versions. A new approach is introduced for the coupled transport units' movement, considering velocity, acceleration and the dynamic parameters of the transport units. Absolute motion for a single transport unit model is analyzed, as well as an absolute and relative motion for the coupled transport units' model. Stability for the suggested dynamical system is tested in terms of Lyapunov and Routh-Hurwitz stability criteria. Motion without harmonic oscillations of the state variables is considered as a comfortable motion mode for the model's linear approximation. The ways of maintaining the required mode of the coupled movement for different types of control are considered. Limitations for the piloted control mode are determined. The asymmetry of the control options for the leading and following transport units is detected and studied. Models of an absolute and relative motion, suitable for vehicles, are presented. The results of the numerical experiments, proving the presented analytic models, show possible options for different types of traffic control, which ensure a stable coupled movement of the transport units.

Keywords: motion, velocity, distance, traffic flow, transport unit, control, feedback coupling, model

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-1-4-042 (Far East program)

For citation:

Devyatisil'nyj A. S., Stotsenko A. K. Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem, *Ekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 426—431.*

DOI: 10.17587/mau.16.426-431

References

1. **Devyatisil'nyj A. S., Dorozhko V. M.** Issledovanie zadachi avtomaticheskogo sledovaniya za liderom v sisteme dvux transportnyx edinic (Automated leader-following problem research for the transportation system of two units), Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i sistemy upravleniya, 2000, no. 2, pp. 163—169 (in Russian).

- 2. **Tarasik V. P.** *Teoriya dvizheniya avtomobilya* (Theory of automobile motion), St. Peterburg, BXV, 2006. (in Russian).
- 3. **Demidovich B. P.** *Lekcii po matematicheskoj teorii ustojchivosti* (Lectures on mathematic stability), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).
- 4. **Postnikov M. M.** *Ustojchivye mnogochleny* (Stable polinomials), Moscow, Nauka, 1981. (in Russian).
- 5. **GAZ-322132** Gazel' buses (in Russian). Available at: http://www.avtogaz.ru/barguzin/gaz-322132 (access date: 30.10.2014).
- 6. **Subaru** Forester specifications. (in Russian). Available at: http://subaru.ru/models/forester/specifications/ (access date: 30.10.2014).

Corresponding author:

Devyatisil'nyj Aleksandr S., D. Sc., Full Professor, Chief Researcher, Head of navigation and control department Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

28 сентября - 3 октября 2015 г.

пос. Дивноморское, Геленджикский район, Краснодарский край

8-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (MKNV-2015)

Председатель Президиума мультиконференции: акад. РАН В.Г. Пешехонов Состав и направления работы мультиконференции

Локальная научно-техническая конференция УПРАВЛЕНИЕ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ, ЭРГАТИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Председатель: акад. РАН С.В. Васильев

Направления работы конференции

1. Интеллектуальные системы:

- Автоматизация рассуждений и планирования действий
- Машинное обучение и методы дооснащения в условиях неопределенности
- Интеллектуальный анализ данных, распознавание и классификация
- Компьютерная лингвистика, онтологии, семантический поиск и управление знаниями
- Когнитивное моделирование и автоматизация целеполагания
- Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций
- Мультиагентные системы и распределенный искусственный интеллект
- Метолы и технологии «мягких вычислений»
- Обучающие и экспертные системы. Верификация знаний
- Прикладные интеллектуальные системы управления и принятия решений

2. Эргатические информационно-управляющие системы

- Проблемы автоматизации эргатических систем
- Интеллектуализация процессов управления и обработки информации в эргатических системах
- Проблемы человеко-машинного инртерфейса
- Обучающие и тренажерные комплексы эргатических систем управления подвижными объектами
- Опыт создания и внедрения эргатических систем

3. Организационные системы

- Управление в активных системах
- Оптимизационные и теоретико-игровые модели и методы управления в организационных системах
- Информационные технологии в организационном управлении
- Модели принятия решений в организационных системах
- Информационное управление. Модели социальных сетей
- Системы управления проектами и прошграммами

Локальная научно-техническая конференция <u>РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА</u>

Председатель: акад. РАН Ф.Л. Черноусько Направления работы конференции

- Кинематика и динамика роботов и мехатронных систем
- Средства очувствления и навигации роботов и мехатронных
- Алгоритмы и системы управления роботов и мехатронных систем
- Планирование поведения роботов в недетерминированных средах
- Групповое взаимодействие роботов
- Биоподобные роботы и экзоскелеты
- Медицинские роботы
- Беспилотные летательные аппараты
- Безэкипажные наземные машины
- Морские роботы
- Роботы для ликвидации чрезвычайных ситуаций
- Прикладные аспекты проектирования и применение роботов и мехатронных систем различного назнвакчения

Локальная научно-техническая конференция

УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ **N CETEBLIX CNCTEMAX**

Председатель: чл.-корр РАН И.А. Каляев

Направления работы конференции

- Модели и стратегии сетевого управления
- Управление в сетецентрических системах
- Самоорганизующиеся распределенные системы
- Управление в облачных средах
- Мультиагентное взаимодействие в сетях
- Программно конфигурируемые сети
- Методы реконфигурации в сетевых управляющих системах
- Сетевое управление мобильными объектами и устройствами
- Сетевое управление объектами социальной
- инфраструктуры («умный город» и «умный дом») Прикладные задачи управления в сетях

Подробная информация о Мультиконференции размещена на сайте http://www.conf.mvs.sfedu.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Т. В. Пчелкина.

Сдано в набор 30.03.2015. Подписано в печать 12.05.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН615. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.