

УДК 629.014.17

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ДВУХЗВЕННЫХ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТЕРОВ «ВИТЯЗЬ»

Б. Г. Ильясов<sup>1</sup>, Д. З. Хуснутдинов<sup>2</sup>, Ч. А. Яруллин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, <sup>2</sup>dz\_khusnutdinov@mail.ru, <sup>3</sup>chin.yaru@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 16.12.2015

**Аннотация.** Предлагается метод синтеза моделей движения двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь». Представлены результаты численных экспериментов с использованием математической модели движения и доказана адекватность получаемых моделей.

**Ключевые слова:** транспортер «Витязь»; моделирование движения; математическая модель; имитационное моделирование, метод получения моделей.

Одним из направлений развития двухзвенных гусеничных транспортеров «Витязь» является создание на их конструкторско-технологической базе беспилотных дистанционно управляемых машин: пожарных, спасательных, боевых и др. При разработке беспилотных транспортных средств весьма эффективно использование функциональной имитационной математической модели, позволяющей не только имитировать управляемое движение двухзвенной машины, но и оптимизировать ее характеристики.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В результате анализа публикаций по теме исследования установлено, что работы по управлению движением и имитационному моделированию двухзвенных транспортеров практически отсутствуют. Среди имеющихся можно отметить работы по исследованию динамики поворотов [1, 2], динамики заносов транспортера [3]. Динамика двухзвенных колесных машин рассмотрена в статье [4], являющейся наиболее близкой к рассматриваемой тематике. В работе [5] рассмотрен синтез системы управления гусеничного транспортного средства на основе имитационного моделирования. Но в статье рассматриваются однозвенная машина, и рулевое управление производится в ней посредством разности скорости вращения гусениц.

Таким образом, в настоящее время накоплен небольшой опыт в моделировании систем управления движением двухзвенных гусеничных машин.

При этом число работ, посвященных многозвенным механизмам в виде манипуляторов и управлению их движением, достаточно велико. В [6–8] рассматривается имитационное моделирование, однако в большинстве публикаций модели основываются на уравнении Лагранжа второго рода. К сожалению, опыт моделирования роботов плохо подходит для рассматриваемой задачи, так как модель получается сложной и неудобной для работы. И, как показал опыт, при использовании ее совместно с моделью рулевой системы выдает неадекватные решения.

Настоящая статья преследует две цели. Первая – разработка методики имитационного моделирования движения двухзвенных гусеничных машин, позволяющей получить удобные, простые и функциональные модели. Вторая – проведение численных экспериментов с использованием массо-габаритных характеристик двухзвенного транспортера «Витязь» и проверка адекватности модели

### МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основой управления движением болотохода является принцип двухзвенности. Поворот гусеничного вездехода осуществляется за счет угла складывания между передним и задним звеньями

с помощью силовых гидроцилиндров [7]. Конструкция поворотного-сцепного устройства (рис. 1) выполнена таким образом, что плечи сил гидроцилиндров, действующих на второе звено, больше плеч, действующих на первое звено. Или другими словами, момент сил, действующих на второе звено, превышает момент сил, действующих на первое звено.

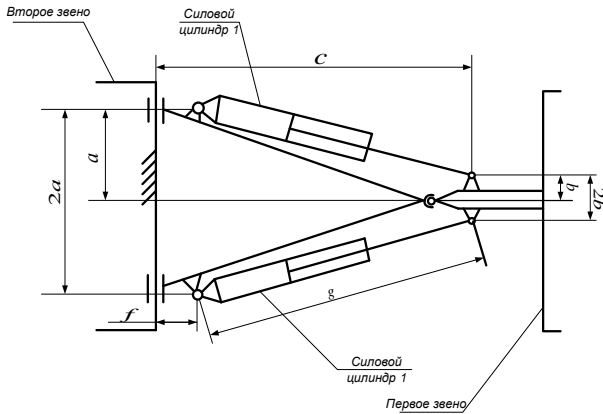


Рис. 1. Поворотно-сцепное устройство

Складывание звеньев относительно друг друга представляет собой относительное движение. Учитывая эту особенность сцепного устройства, переднее звено будем считать неподвижным.

Все четыре гусеницы двухзвенника являются ведущими. Поэтому при прямолинейном движении, когда угол складывания звеньев равен нулю, силовое воздействие звеньев друг на друга несущественно, и при составлении модели ими можно пренебречь.

В процессе поворота, при угле складывания звеньев отличным от нуля, сила, действующая на первое звено со стороны второго, возрастает. Если рассматривать первое звено, данная сила действует на шарнир и направлена вдоль оси второго звена (рис. 2). Эта сила стремится развернуть первое звено относительно оси, тем самым совершая поворот, при котором изменяется угол абсолютного движения  $\varphi(t)$  относительно оси  $X$ . Для наблюдения за объектом движения достаточно знать координаты первого звена. Движение второго звена, при моделировании движения транспортера в целом, можно не рассматривать, а силовое воздействие со стороны второго звена заменить силой, приложенной к шарниру поворотного-сцепного устройства, при рассмотрении первого звена.

Таким образом, в качестве входного параметра в абсолютную часть движения транспортера рассматривается угол складывания звеньев  $\alpha(t)$ . Направление движения транспортера определяется углом  $\varphi(t)$  относительно оси координат.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

Рассмотрим уравнения равновесия сил для движущегося объекта. Напишем проекции сил на оси:

$$F_{z1}^x \cos(\varphi(t)) + F_{z2}^x \cos(\varphi(t) - \alpha(t)) - F_u^x \cos(\varphi(t)) - F_{mp}^x \cos(\varphi(t)) = 0; \quad (1)$$

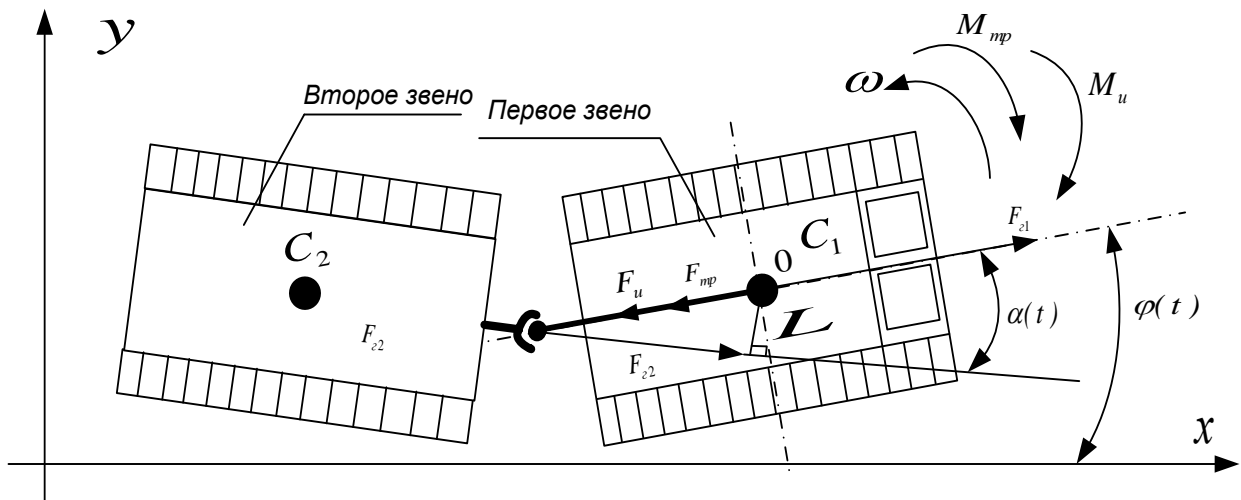


Рис. 2. Расчетная схема

$$F_{21}^y \cos(\varphi(t)) - F_{22}^y \cos(\alpha(t) - \varphi(t)) - F_u^y \cos(\varphi(t)) - F_{mp}^y \cos(\varphi(t)) = 0, \quad (2)$$

где  $F_{21}$  – сила тяги гусениц первого звена,  $F_{22}$  – сила тяги гусениц второго звена,  $F_u$  – инерционная компонента сопротивления силам тяги,  $F_{mp}$  – сила трения прямого движения транспортера,  $\varphi(t)$  – угол поворота транспортера,  $\alpha(t)$  – угол складывания звеньев относительно друг друга.

Сумма моментов сил равна:

$$M_u - M(F_{22}) - M_{mp} = 0, \quad (3)$$

где  $M_u$  – инерционный момент сопротивления повороту транспортера,  $M(F_{22})$  – момент силы тяги гусениц второго звена,  $M_{mp}$  – момент трения при повороте транспортера.

Подставим в выражения (1-3) зависимости:

$$\begin{aligned} F_{и}^x &= m \frac{dx^2(t)}{dt^2}; F_{тр}^x = k_{тр} \frac{dx(t)}{dt}; \\ F_{и}^y &= m \frac{dy^2(t)}{dt^2}; F_{тр}^y = k_{тр} \frac{dy(t)}{dt}; \\ M_u &= J \frac{d\varphi^2(t)}{dt^2}; M_{mp} = k_{мпJ} \frac{d\varphi(t)}{dt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m$  – масса звена,  $k_{тр}$  – коэффициент трения звена при прямолинейном движении,  $J$  – момент инерции звена,  $k_{мпJ}$  – коэффициент трения звена при повороте.

тогда получим:

$$F_{21}^x \cos(\varphi(t)) + F_{22}^x \cos(\varphi(t) - \alpha(t)) - m \frac{dx^2(t)}{dt^2} \times \cos(\varphi(t)) - k_{тр} \frac{dx(t)}{dt} \cos(\varphi(t)) = 0, \quad (5)$$

$$F_{21}^y \cos(\varphi(t)) + F_{22}^y \cos(\alpha(t) - \varphi(t)) - m \frac{dy^2(t)}{dt^2} \times \cos(\varphi(t)) - k_{тр} \frac{dy(t)}{dt} \cos(\varphi(t)) = 0, \quad (6)$$

$$J \frac{d\varphi^2(t)}{dt^2} - F_{r2} L \sin(\alpha(t)) - k_{мпJ} \frac{d\varphi(t)}{dt} = 0. \quad (7)$$

Для имитации входного сигнала водителя применены два динамических звена. Уравнения динамических звеньев представлены выражениями (8). В качестве динамических звеньев выбраны апериодическое и реально-дифференцирующее звенья.

$$\begin{aligned} T \frac{d\gamma(t)}{dt} + \gamma(t) &= k_p, \\ T \frac{d\alpha(t)}{dt} + \alpha(t) &= \frac{d\gamma(t)}{dt} k_d. \end{aligned} \quad (8)$$

Как известно, выходной сигнал двух рассмотренных последовательно включенных звеньев будет иметь форму, при которой руль через некоторое время, после задания некоторого угла возвращается в начальное положение.

Во втором эксперименте рассмотрим случай, когда транспортер будет возвращен в прежнее направление вдоль оси  $x$  аналогичным движением руля в обратную сторону. Для моделирования такого случая уравнение (9) перепишем в виде:

$$T \frac{d\gamma(t)}{dt} + \gamma(t) = \begin{cases} k_p & \text{if } t < 20 \\ -k_p & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (9)$$

Для адекватного воздействия на транспортер тяговыми силами предусмотрим обратные связи по скорости движения транспортера с коэффициентом  $k_{oc}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полученная система уравнений имеет восьмой порядок. На рис. 3 представлены входной сигнал складывания звеньев  $\alpha(t)$  и угол  $\varphi(t)$  направления первого звена относительно оси  $X$ . Как видно из рис. 4, 5, угол поворота транспортера после некоторого времени устанавливается и становится постоянным.

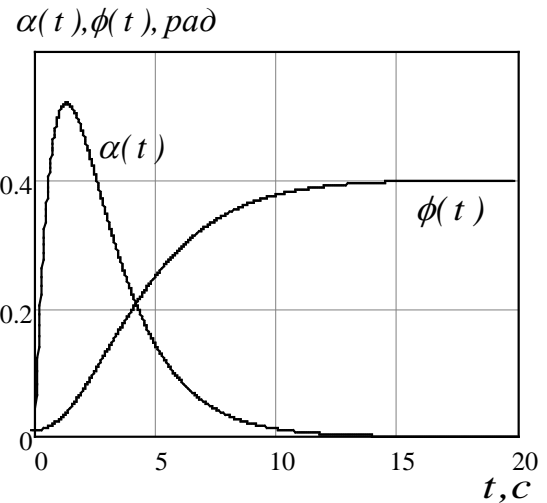


Рис. 3. Угол складывания звеньев  $\alpha(t)$  и угол  $\varphi(t)$  направления первого звена относительно оси  $x$

В соответствии с этим сигналом, изменение координат транспортера после некоторого отклонения становится постоянным. Описанная форма кривых координат транспортера является ожидаемой при управлении транспортером. Кривая траектории транспортера имеет соответствующий изменениям координат транспортера характер (рис. 6).

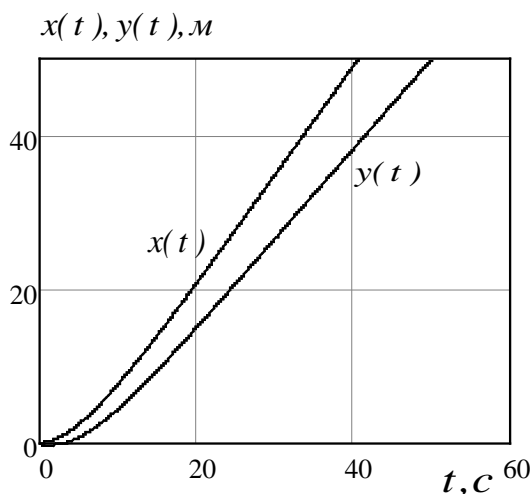


Рис. 4. Кривые координат звена

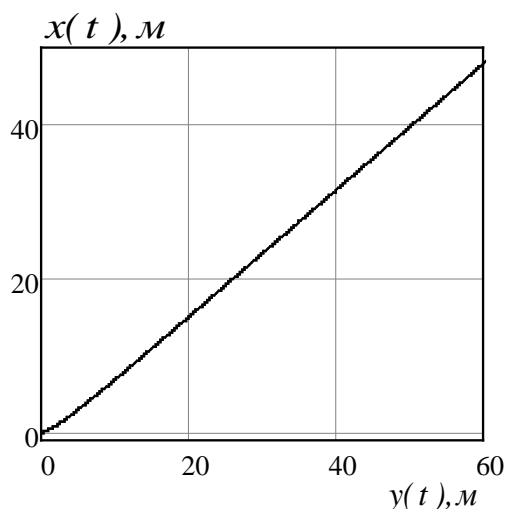


Рис. 5. Траектория движения транспортера

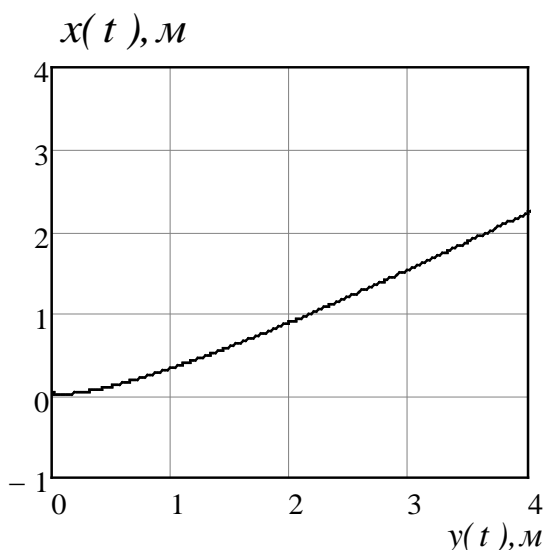


Рис. 6. Траектория движения транспортера в начальный момент времени

Во втором эксперименте имитируется случай, когда машина возвращается в прежнее направление путем поворота руля в обратном направлении через двадцать секунд после начала движения (рис. 7). Эксперимент проводился четыре раза при разных величинах входного углового воздействия. Угол воздействия руля в каждом последующем эксперименте был выше на 25 %. Зависимости между углом направления движения и углом складывания звеньев (рис. 8) имеют линейный характер, так как пиковые забросы кривых угла направления имеют равные расстояния между собой.

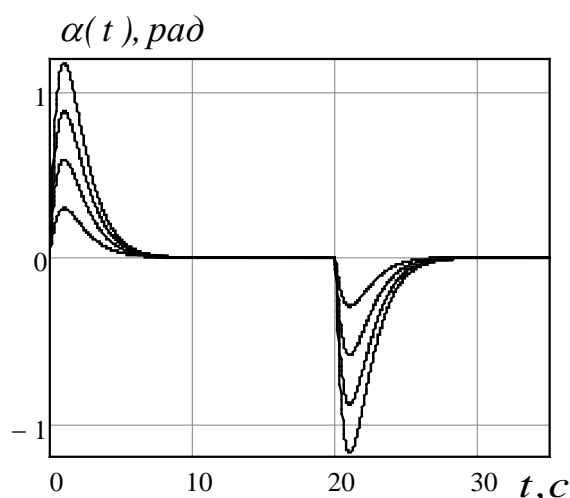


Рис. 7. Задающий угол складывания звеньев относительно друг друга

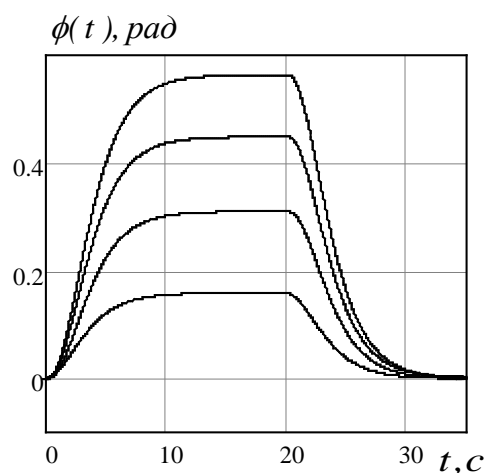


Рис. 8. Угол поворота транспортера относительно системы координат

На двадцатой секунде, после обратного движения управляющего угла складывания звеньев, угол поворота транспортера возвращается в начальное направление. При этом траектория движения принимает параллельное оси  $x$  положение на тридцатой секунде после окончания возвратного поворота (рис. 8).

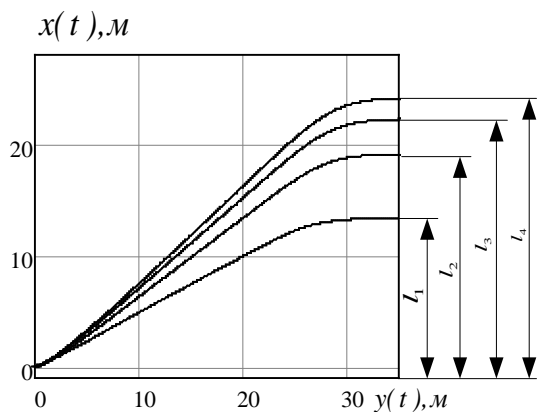


Рис. 9. Траектория движения транспортера

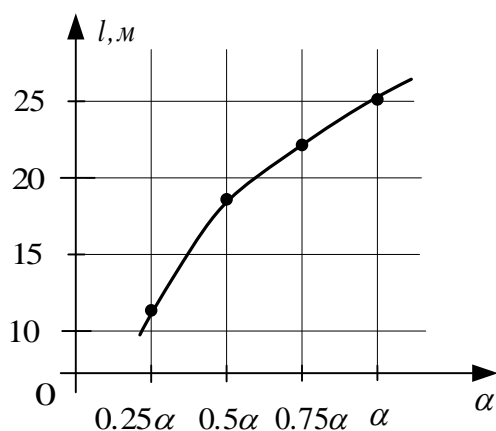


Рис. 10. К пояснению нелинейности модели

Анализ зависимости пиковых значений рулевого воздействия и расстояния между начальным и последующим положением  $l_i$  показывает нелинейность системы (рис.9, 10).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен удобный метод исследования динамики двухзвенного гусеничного транспортера «Витязь». Как показали численные эксперименты, полученная модель адекватна и чувствительна к входным воздействиям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин, М.: Машиностроение, 1970. [Y. E. Farobin, *The theory of rotation of transport vehicles*, (in Russian). Moscow: Mshinostroenie, 1970. ]
2. Барахтанов Л. В., Вахидов У. Ш., Манянин С. Е. Определение сил сопротивления повороту сочлененных двухзвенных гусеничных машин // НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2013. №1. С. 154–160. [L. V Barakhtanov, U. S. Vakhidov, S. E. Manyanin, "Determination of the resistance forces turn articulated tracked vehicle", (in Russian), NGTU im. R.E. Alekseeva, no. 1, pp. 154-160, 2013.]
3. Ермаков Б. Е. Боковой уход двухзвенного транспортера при его движении по криволинейной траектории //

Механизация строительства. 2012. № 2 (812). [B. E. Ermakov, "Lateral withdrawal of two-conveyor as it moves along a curved path" (in Russian), *Mekhanizatsiya stroitelstva*, № 2 (812), 2012].

4. Красовский А. Н., Парамонов А. Г. Упрощенная математическая модель криволинейного движения трактора с прицепом // Вестник Курганской ГСХА. 2013. №4. [A. N. Kravovski, A. G. Paramonov, "A simplified mathematical model of the curvilinear motion of the tractor-trailer" (in Russian), *Vestnik Kurganscoi GSCA*, №4, 2013].

5. Яцун С. Ф., Чжо Пью Вей, Мальчиков А. В., Тарасова Е. С. Математическое моделирование мобильного гусеничного робота // Известия ЮЗГУ. 2011. №1 (34). С. 10–17. [S. F. Yacyn, P. V. Chgo, A. V. Malchikov, E. S. Tarasova, "Mathematical modeling of mobile caterpillar robot" (in Russian), *Izvestia UZGU*, №1 (34), pp. 10-17, 2011].

6. Шариков Н. В. Моделирование управляемого движения манипулятора // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. №9. [N. V. Sharicov, "Simulation of controlled motion of the manipulator" (in Russian), *Izvestia TulGU*, №9, 2013].

7. Лутманов С. В., Куксенюк Л. В., Попова Е. С. Задачи управления двухзвенным манипулятором с вращательными кинематическими парами // Физические и математические науки. 2013. №6. [S. V. Lutmanov, L. V. Kukusenok, E. S. Popova, "Control problems articulated manipulator with rotational kinematic pairs" (in Russian), *Phizichiskie i matematicheskie nauki*, №6, 2013].

8. Ильин А. И., Сайфеев Т. Р., Целищев В. А., Хуснутдинов Д. З., Яруллин Ч. А. Математическое моделирование рулевого механизма двухзвенного транспортера «Витязь» с гидравлической обратной связью // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, №1 (54). С. 73–78. [A. I. Ilyin, T. R. Sayfeev, V. A. Celischev, D. Z. Khusnutdinov, C. A. Yarullin, "Comparative analysis of nonlinear mathematical models steering feeds machines with two links "Vityaz" with hydraulic feedback," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 77-78, 2013].

### ОБ АВТОРАХ

**ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич**, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж.-электромех. по авиац. электрооборуд. (МАИ, 1962). Д-р техн. наук по сист. анализу и авт. упр. (ЦИАМ, 1984), проф. Засл. деят. науки и техн. РФ, чл.-корр. АН РБ. Иссл. в обл. сист. анализа, управл. в техн. системах.

**ХУСНУТДИНОВ Дим Зинфирович**, асп. каф. технич. кибернетики, ст. преп. филиала универ. в г. Ишимбае. Дипл. инж. по автоматиз. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. упр. сл. тех. системами.

**ЯРУЛЛИН Чингиз Асхатович**, проф. каф. общепроф. дисцип. филиала универ. в г. Ишимбае. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по динамике, баллистике и упр. ЛА (МАИ, 1983). Иссл. в обл. упр. сл. системами.

**METADATA**

**Title:** Simulation methods motion of two links carrier "Vityaz".

**Authors:** B.G. Ilyasov<sup>1</sup>, D. Z. Khusnutdinov<sup>2</sup>, C.A. Yarullin<sup>3</sup>.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia

**Email:** <sup>1</sup>ilyasov@tc.ugatu.ac.ru, <sup>2</sup>dz\_khusnutdinov@mail.ru,  
<sup>3</sup>chin.yaru@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 1 (71), pp. 20-25, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** A method for the synthesis of motion of two models of crawler transporters "Vityaz". The results of numerical experiments using a mathematical model of the motion and prove the adequacy of the model.

**Key words:** Transporter "Vityaz", modeling of the move, Imitation modeling, mathematical modeling.

**About authors:**

**ILYASOV, Bary Galeevich**, Corresp. member of AN RB. Prof., Head of Technical Cybernetics Dept., Dipl. Elect Engineer of Aircraft Electr. Equipment. Dr. of Tech. Sci. on Syst. Analysis and Autom. Control (USATU, 1984). Investigations in syst. analysis, control in tech.. systems.

**KHUSNUTDINOV, Dim Zinfirovich**, Dipl. Engineer on Automation of Technological Processes (UGATU, 2006).

**YARYLLIN, Chingiz Askhatovich**, Docent. Dipl. Engineer on airplane engines (UAI, 1971). Cand. (PhD) Tech. Sci. (MAI, 1983).