

УДК 629.3.021.21

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПОТОКАМИ В ТРАНСМИССИИ СОЧЛЕНЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**Е.Е. Баженов**ORCID: **0000-0001-5475-1000** e-mail: **st194@yandex.ru**

Южно-Уральский государственный университет

*Челябинск, Россия*

Уральский институт ГПС МЧС России

*Екатеринбург, Россия*

Уральский государственный аграрный университет

*Екатеринбург, Россия***В.Н. Бондарь**ORCID: **0009-0007-2465-6476** e-mail: **bondarvn@susu.ru**

Южно-Уральский государственный университет

*Челябинск, Россия***В.В. Крудышев**ORCID: **0009-0003-3651-1822** e-mail: **krudishev@gmail.ru**

Уральский институт ГПС МЧС России

*Екатеринбург, Россия***Л.А. Новопашин**ORCID: **0009-0007-3347-1182** e-mail: **novopashin.leonid@yandex.ru**

Уральский государственный аграрный университет

*Екатеринбург, Россия*

Разработан алгоритм распределения силовых потоков в трансмиссии активных сочлененных транспортно-технологических машин. Адаптивный алгоритм, основанный на принципах нечеткой логики, позволяет распределять силовые потоки от источника энергии между элементами движителя машины на основе анализа параметров опорной поверхности, по которой осуществляется движение, и характеристик машины. К совокупности факторов, являющихся основными компонентами для формирования управляющего воздействия, относятся кинематические показатели работы элементов движителя и показатели свойств поверхности по сцеплению и сопротивлению. Основу работы составляют имитационные модели движения активной сочлененной транспортной системы. На основании имитационного моделирования, учитывающего стохастический подход к характеристикам грунтовых условий, получены закономерности изменения силового потока и построен алгоритм его распределения между элементами движителя по критерию максимальной свободной силы тяги. Формализована задача управления распределением силового потока на основе принципов нечеткой логики. Коммутатор управления распределением силового потока, алгоритм которого основан на формализованной задаче нечеткого управления, позволяет обеспечить качественное адаптивное управление активными сочлененными машинами, имеющими трансмиссию, отличную от механической.

**Ключевые слова:** транспортная система, активная секция, сочлененная машина, силовой поток, нечеткое управление, функция управления.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Баженов, Е.Е. Алгоритм управления силовыми потоками в трансмиссии сочлененной транспортной системы на основе нечеткой логики / Е.Е. Баженов, В.Н. Бондарь, В.В. Крудышев, Л.А. Новопашин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 90-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

## POWER FLOW CONTROL ALGORITHM BASED ON FUZZY LOGIC FOR TRANSMISSION OF AN ARTICULATED TRANSPORT SYSTEM

**E.E. Bazhenov**

ORCID: 0000-0001-5475-1000 e-mail: [st194@yandex.ru](mailto:st194@yandex.ru)

South Ural State University

*Chelyabinsk, Russia*

Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia

*Yekaterinburg, Russia*

Ural Agrarian University

*Yekaterinburg, Russia*

**V.N. Bondar'**

ORCID: 0009-0007-2465-6476 e-mail: [bondarvn@susu.ru](mailto:bondarvn@susu.ru)

South Ural State University

*Chelyabinsk, Russia*

**V.V. Krudyshev**

ORCID: 0009-0003-3651-1822 e-mail: [krudishev@gmail.ru](mailto:krudishev@gmail.ru)

Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia

*Yekaterinburg, Russia*

**L.A. Novopashin**

ORCID: 0009-0007-3347-1182 e-mail: [novopashin.leonid@yandex.ru](mailto:novopashin.leonid@yandex.ru)

Ural Agrarian University

*Yekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The article presents a developed algorithm for the distribution of power flows in the transmission of active articulated transport and technological machines. The algorithm is adaptive and based on a fuzzy logic. It allows to distribute the power flows from the energy source between the elements of the machine engine based on the analysis of the parameters of the support surface on which the movement is carried out, and the characteristics of the machine. Kinematic performance indicators of the propulsion elements and indicators of surface properties for adhesion and resistance are the combination of factors that are the main components for the formation of the control action. The main results have been obtained on a simulation model of the movement of an active articulated transport system taking into account the stochastic approach to the characteristics of ground conditions. The regularities of power flow change are obtained and an algorithm for its distribution between the elements of the propulsion according to the criterion of maximum free thrust force is developed. The problem of power flow distribution control based on the fuzzy logic is formalized. The power flow distribution control switch with formalized fuzzy control algorithm allows for high-quality adaptive control of the active articulated machines with a transmission other than mechanical.

**Key words:** transport system, active section, articulated machine, power flow, fuzzy control, control function.

**FOR CITATION:** E.E. Bazhenov, V.N. Bondar', V.V. Krudyshev, L.A. Novopashin. Power flow control algorithm based on fuzzy logic for transmission of an articulated transport system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 90-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

### Введение

Обеспечение высоких эксплуатационных свойств подразумевает движение активной сочлененной транспортной системы (АСТС) по различным грунтовым поверхностям: от дорог с усовершенствованным покрытием до бездорожья. Существующие работы в этом направлении в качестве основного критерия, определяющего величину подводимой энергии к движителю или активной секции, учитывают, как правило, величину вертикальной нагрузки, действующую на элемент движителя [1-4]. В реальных условиях вертикальная нагрузка является

лишь фактором, изменяющимся в широком диапазоне, ведущим к возникновению более значимого для осуществления движения показателя. Исследования показали, что определяющим фактором являются сцепные свойства движителя с опорной поверхностью [5]. Работами отечественных ученых установлено, что значения параметров, характеризующих опорную поверхность, носят стохастический характер [6, 7]. При этом чем ниже качество опорной поверхности, тем больше значение среднего квадратического отклонения случайной величины от ее математического ожидания. Соответственно, способность АСТС перемещаться по грунту будет зависеть от мгновенных дорожных условий под каждым движителем в конкретный момент времени. Таким образом, современное транспортно-технологическое средство должно обладать свойствами, позволяющими оценивать состояние каждого элемента движителя в процессе движения и передавать на него такую величину силового потока, которая, с одной стороны, не будет превышать сцепные свойства с опорной поверхностью, а с другой стороны, будет выше суммарного сопротивления движению АСТС на конкретном элементарном участке пути.

Цель работы – разработка основанного на принципах нечеткой логики алгоритма распределения силовых потоков в трансмиссии транспортно-технологической машины. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- декомпозиция АСТС для определения структуры системы на основе универсальных объектов, позволяющая перейти к имитационному моделированию;
- выбор метода моделирования свойств опорной поверхности по сцеплению и сопротивлению;
- имитационное моделирование движения АСТС;
- создание алгоритма работы контроллера управления силовыми потоками в трансмиссии АСТС на основе принципов нечеткой логики.

### **Методология исследований**

При разработке имитационной модели движения АСТС необходимо учитывать условия движения и достаточную степень универсальности, которая заключается в возможности изменения в широком диапазоне факторов внешних условий и конструктивных параметров. Это свойство позволяет реализовать алгоритм работы системы автоматического регулирования силовых потоков по различным критериям, в том числе, по критерию максимальной силы тяги СТС. При этом оценивается величина рекуперативного нагружения в трансмиссии (независимо от ее конструктивного исполнения), рассчитывается суммарная сила тяги машины и оценивается вероятность потери (или обеспечения) проходимости в различных грунтовых условиях. На эти показатели основное влияние оказывает кинематическое рассогласование, возникающее во время движения машины между движителями одной секции и между секциями АСТС. Основными факторами, влияющими на величину кинематического рассогласования, являются грунтовые условия и криволинейное движение АСТС.

Наиболее эффективным подходом для решения поставленных задач следует считать методологию системного анализа.

### **Декомпозиция АСТС для определения структуры системы на основе универсальных объектов**

Декомпозиция системы позволяет определить пути совершенствования технической системы путем структурного или параметрического анализа. Принципиальная схема технической системы и ее связь с внешней средой показана на рис. 1. Структура АСТС строится на основании модульного принципа (рис. 2). Она включает измерительный и исполнительный комплексы, обеспечивающие необходимую информативность о дорожных условиях и пара-

метрах факторов, характеризующих взаимодействие между подсистемами и элементами модулей. Такой принцип представления структуры позволяет объединить в отдельные классы объектов элементы АСТС, выполняющие определенные функции (рис. 3):

- источник энергии совместно с согласующим устройством;
- элемент распределения силового потока;
- рабочий орган.

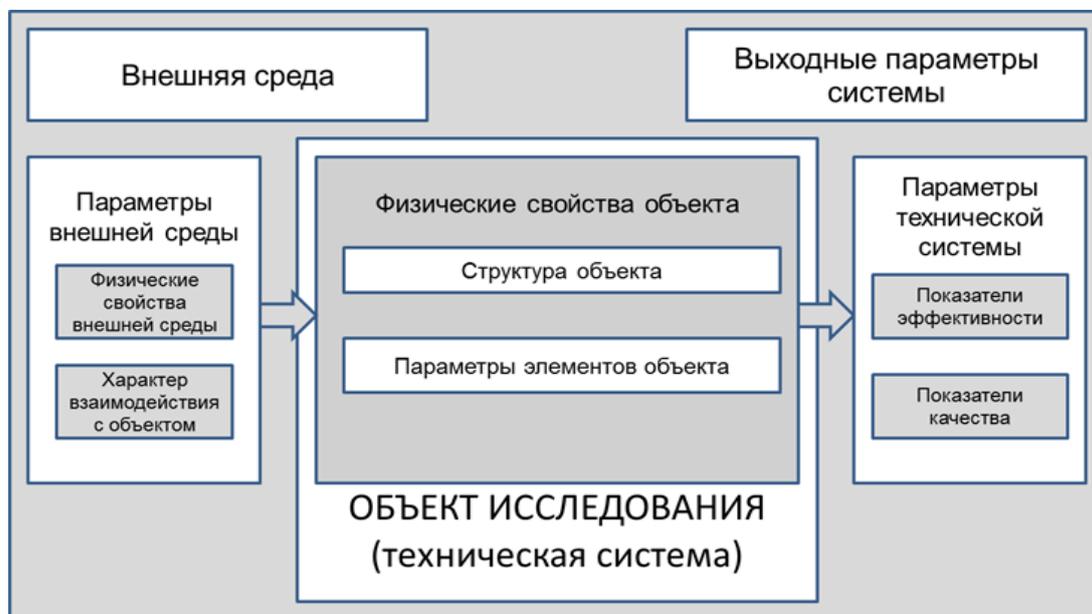


Рис. 1. Схема системы и ее связи с внешней средой

Fig. 1. Scheme of the system and its connections with the external environment

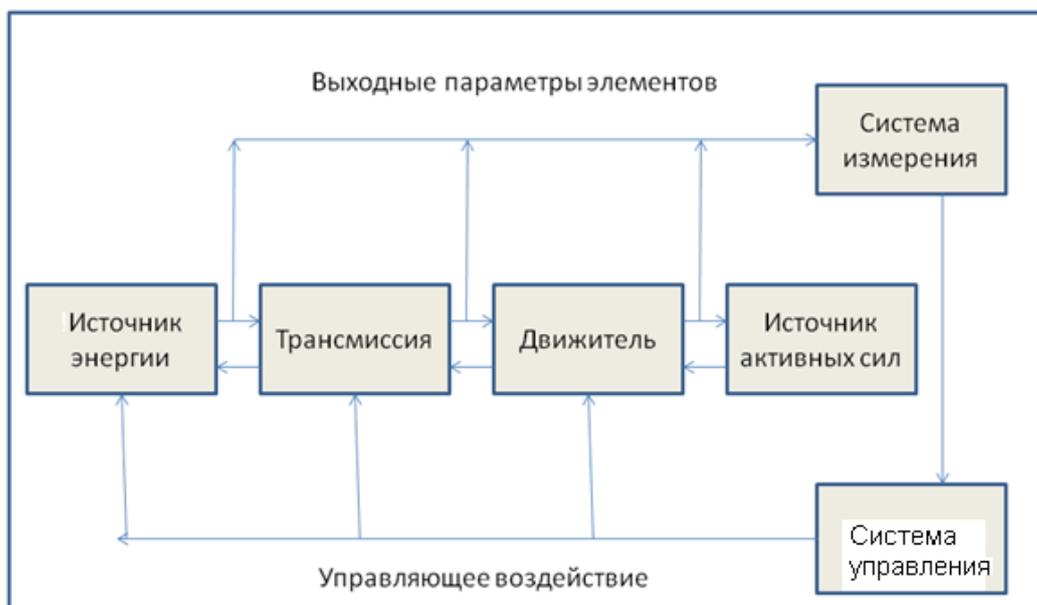
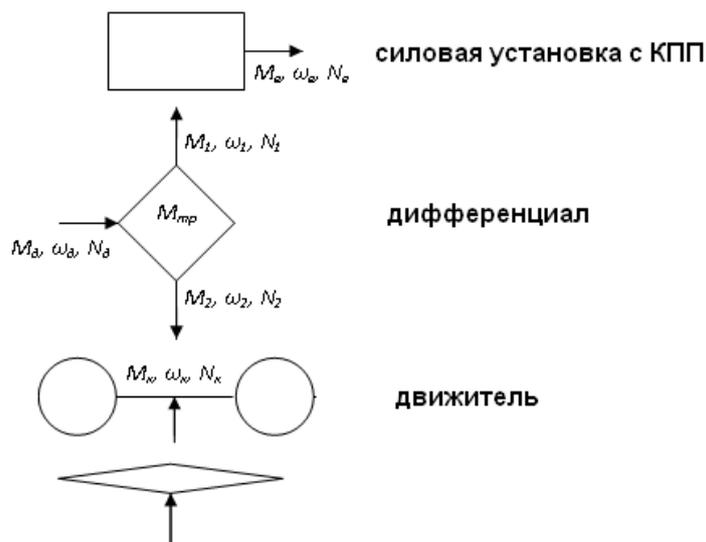


Рис. 2. Функциональная схема транспортной системы

Fig. 2. Functional diagram of the transport system



**Рис. 3. Объекты для описания процесса распределения силового потока между секциями АТС:**  
 $M, N, \omega$  – соответственно, крутящий момент, мощность и угловая скорость на входе и выходе объекта

**Fig. 3. Objects for describing the process of power flow distribution between sections of an active articulated transport system,**

where  $M, N, \omega$  – torque, power and angular velocity at the input and output of the object, respectively

Объект «источник энергии с согласующим устройством» – двигатель внутреннего сгорания и совокупность механизмов, обеспечивающих трансформацию или мультипликацию силового потока и передачу его объекту распределения. Объект «элемент распределения силового потока» – суть дифференциал. Для гидравлических и электрических трансмиссий с мотор-колесами или непосредственной связью мотора с двигателем в структуру АТС не включается. Объект «рабочий орган» – двигатель АТС.

### Моделирование свойств опорной поверхности по сцеплению и сопротивлению

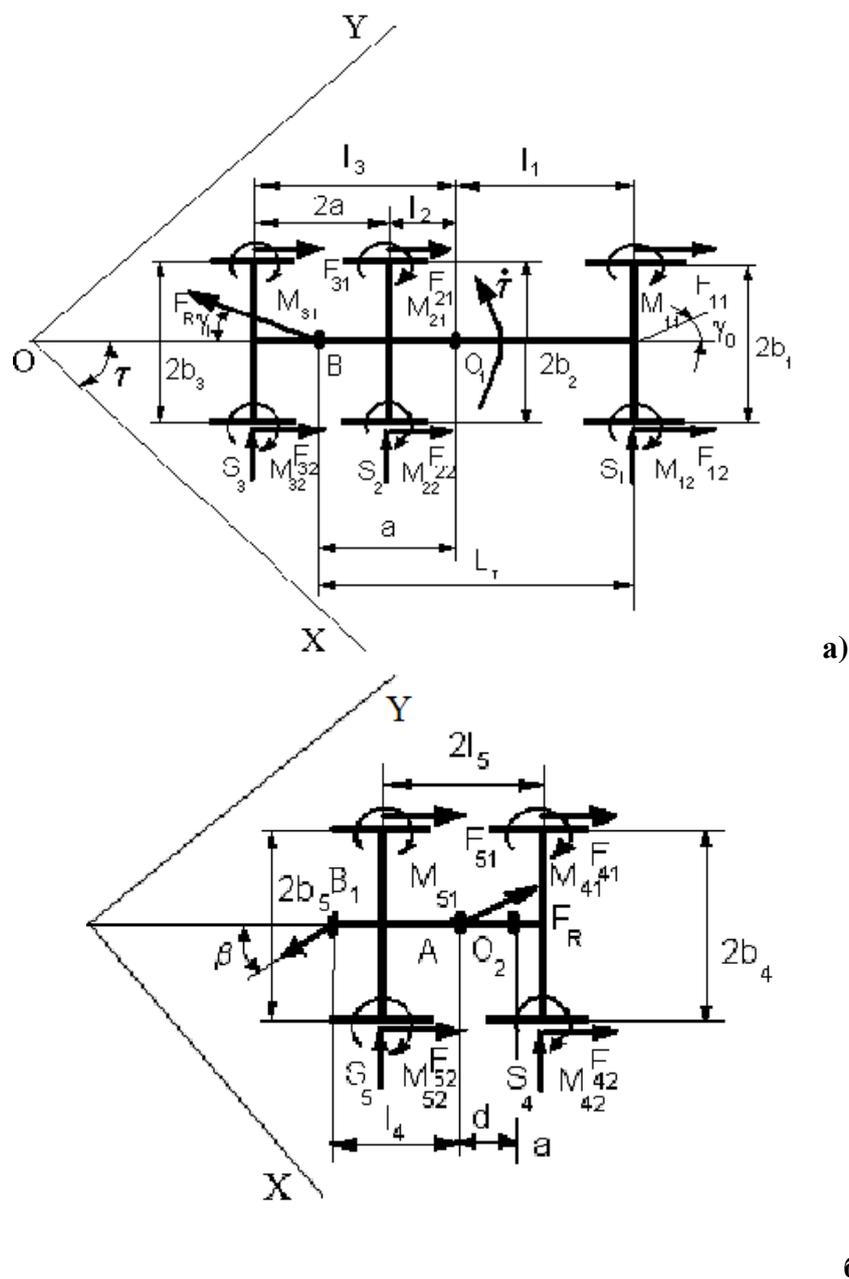
Моделирование параметров опорной поверхности проводится на основе их стохастической оценки. В [6] на основании собранного статистического материала приведены оценки среднего квадратического отклонения случайных значений коэффициентов сцепления ( $\varphi$ ) и суммарного сопротивления ( $\psi$ ) для различных видов опорной поверхности. Случайные значения этих показателей распределяются по нормальному (для  $\varphi$ ) и закону распределения Вейбулла (для  $\psi$ ). Из этого следует, что при определенных обстоятельствах не будет выполняться условие проходимости по сцеплению и сопротивлению [5]

$$P_{\psi} \leq P_{\kappa} \leq P_{\varphi}, \quad (1)$$

где  $P_{\psi}$  – суммарная сила сопротивления движению АТС;  $P_{\varphi}$  – суммарная сила сцепления колес АТС с опорной поверхностью;  $P_{\kappa}$  – сумма элементарных касательных реакций в зоне контакта ведущих колес с опорной поверхностью.

### Имитационное моделирование движения АТС

Имитационное моделирование проводится на математической модели, известной как уравнение Рауса [8]. Такой подход учитывает неголономные связи двигателя с опорной поверхностью. На рис. 4 приведена расчетная схема для первой (а) и второй (б) секций АТС.



**Рис. 4. Расчетная схема активной сочлененной транспортной системы:**  
*a – первая секция; б – вторая секция*

**Fig. 4. Calculation scheme of an active articulated transport system:**  
*a – the first section; b – the second section*

Системы дифференциальных уравнений (2а) и (2б) описывают движение АСТС. При этом взаимодействие между секциями АСТС заменены силами в узле сочленения. Узел сочленения принят с тремя степенями свободы. При решении системы уравнений в качестве ограничений приняты:

- равенство радиусов качения колес первой секции;
- равенство радиусов качения колес второй секции;
- равенство углов поворота  $ij$ -го колеса первой секции;
- равенство углов поворота  $ij$ -го колеса второй секции.

При моделировании по модели (2а) и (2б) принимаются следующие начальные условия:

- 1) двигатель внутреннего сгорания работает на установленной постоянной частоте вращения коленчатого вала;

- 2) в модели предусмотрен учет крутильных жесткостей и коэффициентов диссипации для случая механической трансмиссии;
- 3) модель содержит моменты инерции элементов трансмиссии и их массы;

$$\begin{aligned}
 & m_T \cdot \ddot{X}_B - m_T \cdot a \cdot \ddot{\tau} \cdot \sin \tau - m_T \cdot a \cdot \dot{\tau}^2 \cdot \cos \tau = \\
 & = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cos \tau - \sum_{i=1}^3 S_i \cdot \sin \tau - F_R \cdot \cos(\tau - \gamma_1); \\
 & m_T \cdot \ddot{Y}_B + m_T \cdot a \cdot \ddot{\tau} \cdot \cos \tau - m_T \cdot a \cdot \dot{\tau}^2 \cdot \sin \tau = \\
 & = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot \sin \tau - \\
 & - \sum_{i=1}^3 S_i \cos \tau - F_{RT} \sin(\tau - \gamma_1); \\
 & - \ddot{X}_B \cdot m_T \cdot a \cdot \sin \tau + \ddot{Y}_B \cdot m_T \cdot a \cdot \cos \tau + (ma^2 + J) \ddot{\tau} = \\
 & = \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} \left[ - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 M_{\mu ij} + S_1 \cdot L + (S_2 - S_3)c + (F_{12} - F_{11})b_1 + \right. \\
 & \left. + (F_{22} - F_{21})b_2 + (F_{32} - F_{31})b_3 \right]; \\
 & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 J_{ij} \ddot{\psi}_{ij} + J_{\delta} \cdot c_{ij} \cdot \ddot{\psi}_{ij} = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 M_{fij} + M_{\delta T} c_{ij} + \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot r_{ij}.
 \end{aligned} \tag{2a}$$

аналогичная система уравнений составляется для второй секции СТС:

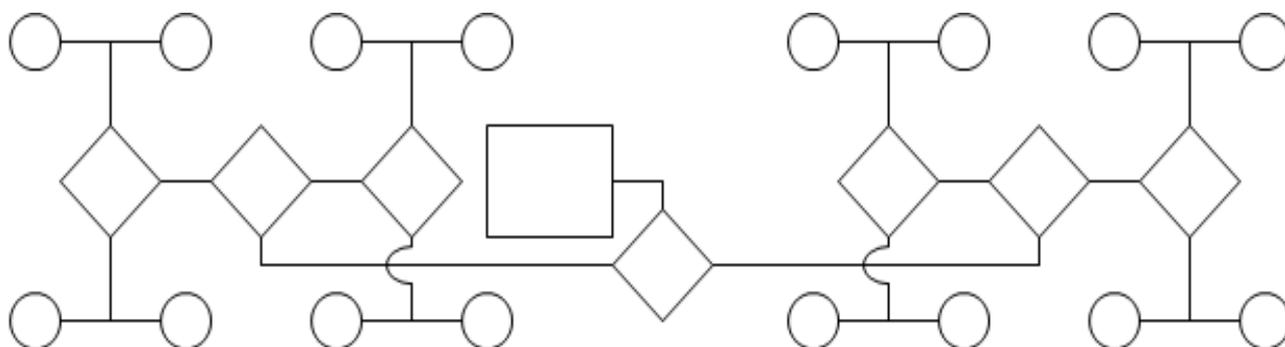
$$\begin{aligned}
 & m_{II} \cdot \ddot{X}_A - m_{II} \cdot d \cdot \ddot{\alpha} \cdot \sin \alpha - m_{II} \cdot d \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \alpha = \\
 & = \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cos \alpha - \sum_{i=4}^5 S_i \cdot \sin \alpha + F_{RII} \cdot \cos(\alpha + \gamma_3) - \\
 & = P_{KP} \cos(\alpha - \beta); \\
 & m_{II} \cdot \ddot{Y}_A + m_{II} \cdot d \cdot \ddot{\alpha} \cdot \cos \alpha - m_{II} \cdot d \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \alpha = \\
 & = \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot \sin \alpha - \\
 & - \sum_{i=4}^5 S_i \cos \tau - F_{II} \sin(\alpha + \gamma_3) - P_{KP} \sin(\alpha - \beta); \\
 & - \ddot{X}_A \cdot m_{II} \cdot d \cdot \sin \alpha + \ddot{Y}_A \cdot m_{II} \cdot d \cdot \cos \alpha + (m_{II} \cdot d^2 + J_{II}) \ddot{\alpha} = \\
 & = \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} \left[ - \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 M_{\mu ij} + (S_5 - S_4)l_5 + (F_{41} - F_{42})b_4 - \right. \\
 & - P_{KP} \cdot l_4 \sin \alpha + \\
 & \left. + P_{KP} \cdot l_4 \cdot \cos \alpha + (F_{52} - F_{51})b_5 \right]; \\
 & \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 J_{ij} \ddot{\psi}_{ij} + J_{\delta n} \cdot c_{ij} \cdot \ddot{\psi}_{ij} = - \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 M_{fij} + M_{\delta n} c_{ij} + \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot r_{ij}.
 \end{aligned} \tag{26}$$

- 4) объект «элемент распределения силового потока» содержит универсальный модуль, позволяющий регулировать внутреннее трение в передаче (внутреннее трение является одним из варьируемых факторов в процессе имитационного моделирования, это дает возможность моделировать движение с различными типами связей трансмиссии с рабочим органом (дифференциальная, блокированная, адаптивная));
- 5) характеристики опорной поверхности задаются значениями коэффициентов  $\varphi$  и  $\psi$  под каждым элементом движителя АСТС;
- 6) учитываются условия (1);
- 7) кинематическое рассогласование между секциями АСТС задается в виде коэффициента  $\xi$  [4, 5]:

$$\xi = \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot 100\% ,$$

где  $V_1$  – окружная скорость первого выходного элемента модуля, м/с;  $V_2$  – окружная скорость второго выходного элемента модуля, м/с.

- 8) из отдельных модулей составляется схема АСТС; например, для двухсекционной восьмиколесной полноприводной СТС (рис. 5):



**Рис. 5. Структура колесной машины 8x8**

**Fig. 5. 8x8 wheeled vehicle structure**

- 9) задаются варьируемые внешние факторы;
- 10) критерий оценки влияния варьируемых факторов и эффективности применения алгоритма распределения силовых потоков – свободная сила тяги АСТС.

Имитационное моделирование дает возможность оценить влияние основных варьируемых параметров машины для создания алгоритма распределения потоков в трансмиссии машины и их влияние на тягово-скоростные свойства АСТС. На рис. 6 показан алгоритм решения имитационной модели, а на рис. 7-9 – результаты имитационного моделирования для автомобиля 8x8 КамАЗ-Арктика.

В современных транспортных системах часто используются трансмиссии с гидравлическим и электрическим методами передачи силового потока от источника энергии к рабочему органу. Такие трансмиссии позволяют использовать более широкие возможности для управления силовыми потоками и распределять их между элементами движителя таким образом, чтобы обеспечить максимальные тяговые возможности машины. В этом случае автоматическое управление будет заключаться в адаптации крутящего момента, подводимого к элементам движителя, к внешним условиям, оказывающим воздействие на ведущий орган и существующему кинематическому рассогласованию. Это можно реализовать, например, электрогидравлическим усилителем для гидравлической трансмиссии или усилителем для подвода электроэнергии к электромотор-колесу.

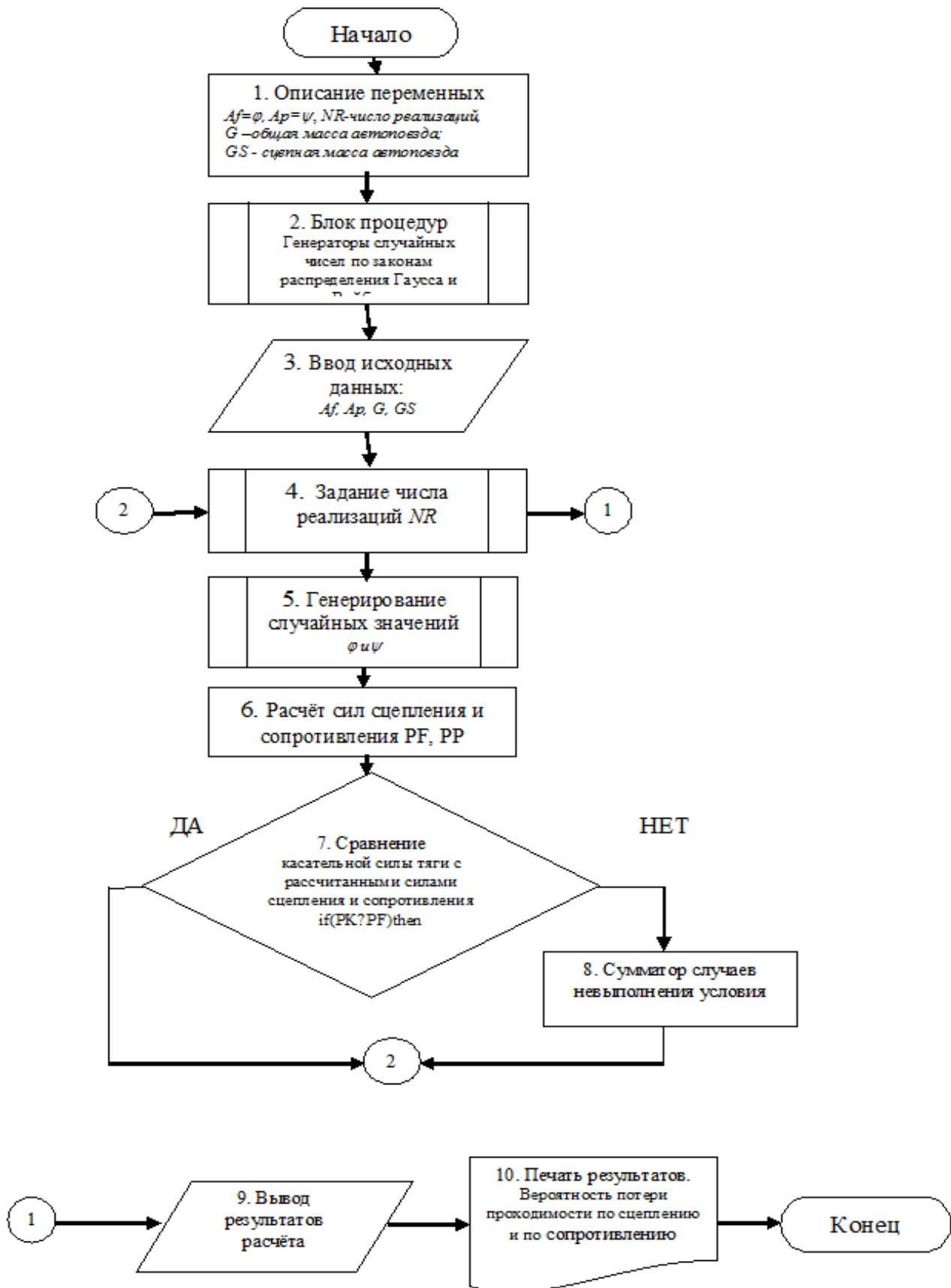


Рис. 6. Алгоритм оценки возможности АСТС перемещаться по местности

Fig. 6. Algorithm for assessing the ability of an active articulated transport system to move around the terrain

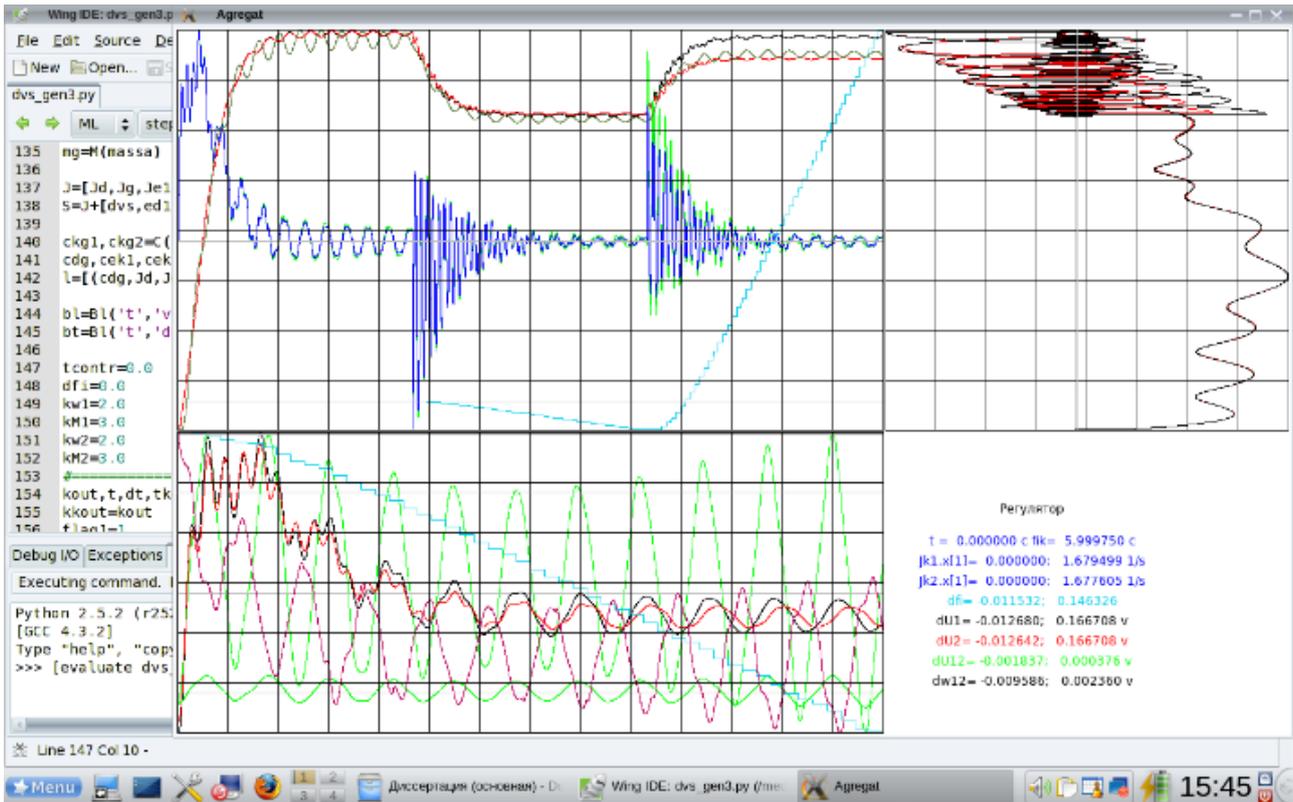


Рис. 7. Скриншот результатов моделирования движения

Fig. 7. Screenshot of motion simulation results

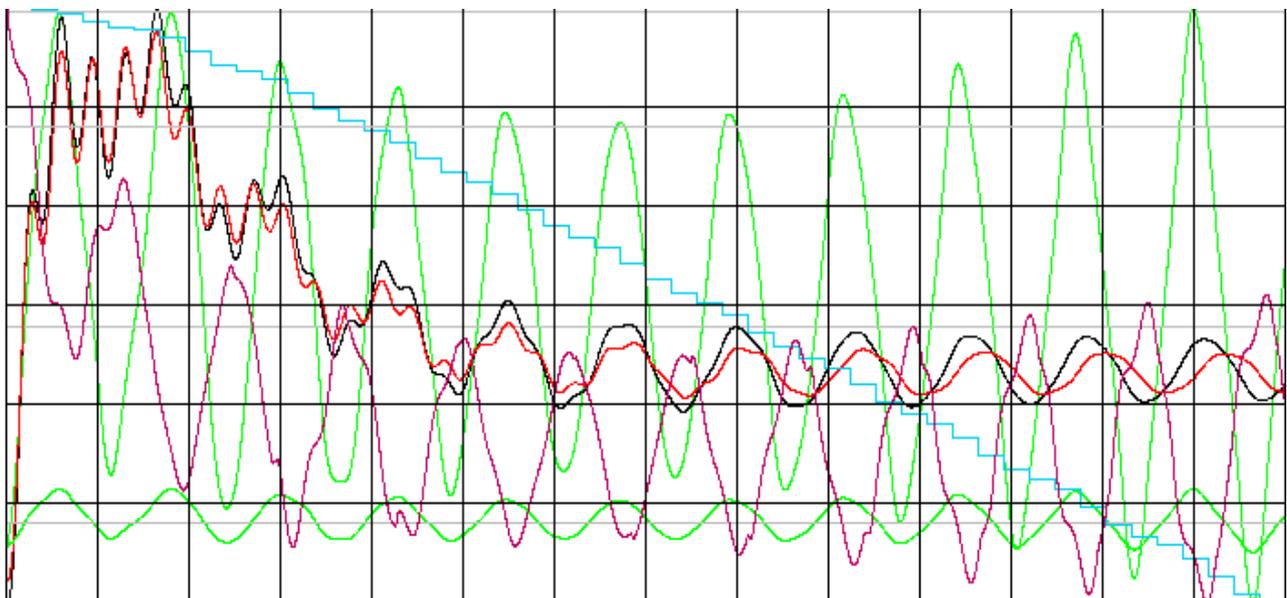
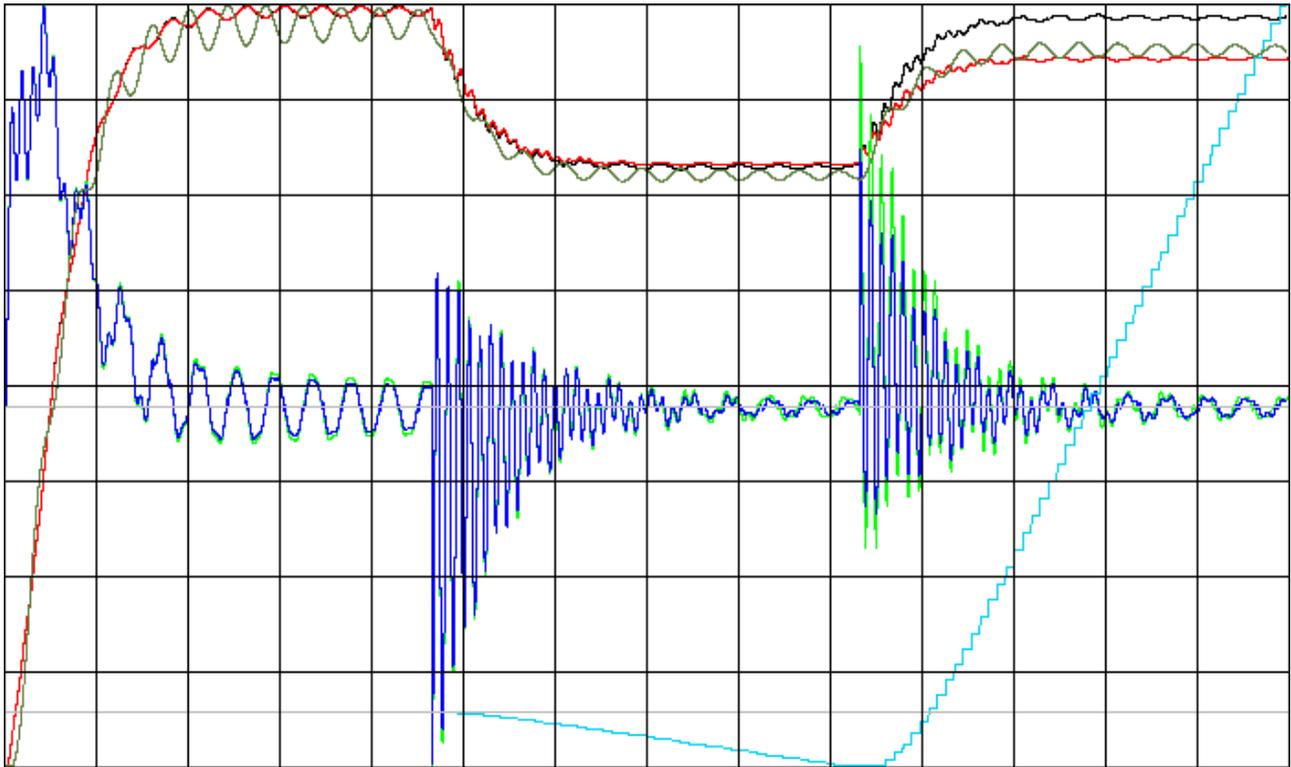


Рис. 8. Характер изменение линейных скоростей и углов поворота ведущих колес при моделировании

Fig. 8. The nature of the change in linear speeds and angles of rotation of the driving wheels in the simulation



**Рис. 9. Линейные скорости ведущих колес первой и второй секций (красный и темно-зеленый цвет); ведущие моменты на колесах (светло-зеленый и голубой); разность закрутки колес за счет тангенциальной эластичности (голубой)**

**Fig. 9. Linear speeds of the driving wheels of the first and second sections (red and dark green); driving moments on wheels (light green and blue); wheel spin difference due to tangential elasticity (blue)**

### **Создание алгоритма работы контроллера управления силовыми потоками в трансмиссии АСТС на основе принципов нечеткой логики**

Алгоритм работы контроллера управления распределением силовых потоков включает два этапа:

- контроль величины кинематического рассогласования между элементами АСТС, двигателя с каждого борта на каждой ведущей оси;
- обеспечение стабильной, без пробуксовки и юза, частоты вращения элементов двигателя в соответствии с возникшим кинематическим рассогласованием  $\xi$ .

Рассмотрим влияние кинематического рассогласования на выходной параметр управления исполнительного механизма, введя лингвистические переменные и заменив ими числовые значения факторов. Результаты анализа сведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения значений параметров:

- низкое значение параметра обозначается символом  $\vee$ ;
- высокое значение параметра  $\wedge$ ;
- отрицательное значение параметра  $-$ ;
- положительное значение  $+$ ;
- любое значение  $a$ ;
- нулевое значение параметра  $0$ .

Таблица 1.  
Зависимость функции управления от входных параметров

Table 1.  
Dependence of the control function on the input parameters

№	Кинематическое рассогласование, $\Delta u$	Скорость изменения кинематического рассогласования, $V$	Величина тока управления, $i$
1	V+	V+	V-
2	V-	V+	V+
3	Λ+	Λ+	Λ-
4	V+	Λ-	0
5	V-	Λ-	0
6	Λ+	0	Λ-
7	Λ-	0	0
8	0	$a$	0

Формализовать корпус правил можно, вводя различные варианты лингвистических переменных и увеличивая количество варьируемых факторов. Обозначим предложенные в табл. 1 лингвистические переменные следующим образом: высокое – В, низкое – L, среднее – М, положительное – Р, отрицательное – N, нулевое – Z. Введем для предложенных лингвистических переменных терм-множества (множество всех возможных значений лингвистической переменной) [10, 11]:

- «кинематическое рассогласование,  $\Delta u$ » = { $\Delta u_{BN}$ ,  $\Delta u_{MN}$ ,  $\Delta u_Z$ ,  $\Delta u_{MP}$ ,  $\Delta u_{BP}$ };
- «скорость изменения кинематического рассогласования,  $V$ » = { $V_{MN}$ ,  $V_{MN}$ ,  $V_Z$ ,  $V_{MP}$ ,  $V_{BP}$ };
- «ток управления,  $i$ » = { $i_{BN}$ ,  $i_{MN}$ ,  $i_Z$ ,  $i_{MP}$ ,  $i_{BP}$ }.

Для удобства представления данных введем нормализованные обозначения для лингвистической переменной, описывающей отклик изменения варьируемых факторов (т.е. «ток управления,  $i$ »), и сгруппируем их в табл. 2.

Таблица 2.  
Нормализованные значения лингвистических переменных

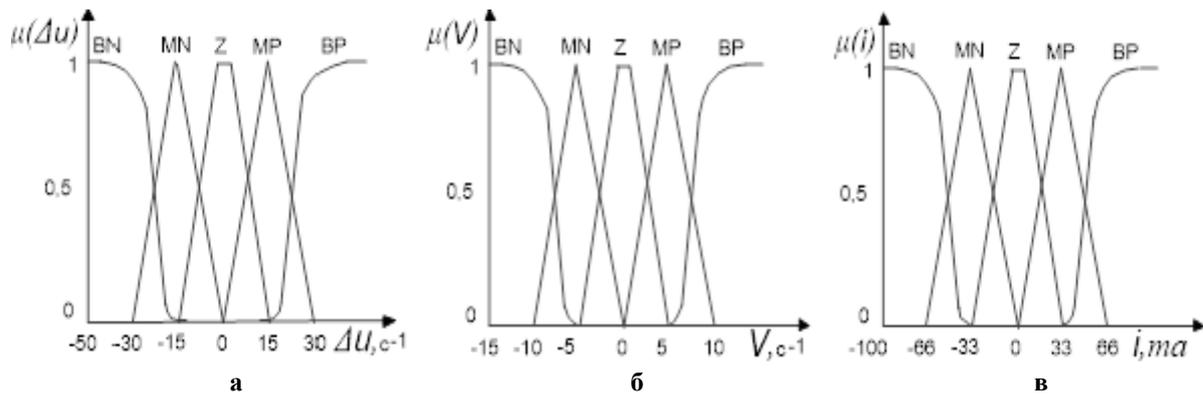
Table 2.  
Normalized values of linguistic variables

№		BN	MN	Z	MP	BP
1	$i$	$-2i$	$-Ii$	$0i$	$Ii$	$2i$
2	$V$	$-2V$	$-IV$	$0V$	$IV$	$2V$
3	$u$	$-2u$	$-Iu$	$0u$	$Iu$	$2u$

Пример терм-множества лингвистической переменной представлен на рис. 10. Корпус правил системы нечеткого вывода формируется на основе метода, изложенного в [2, 4], представлен в табл. 3. Задача управления выполнена в *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* [13] в среде *FIS Editor* (рис. 11). Последовательность реализации алгоритма следующая:

- определение нечеткости (фазификация) (рис. 11 а – 11 в);
- формирование нечеткого корпуса правил (рис. 11 г);
- нечеткий вывод (рис. 11 д);
- реализация четкости (дефазификация) (рис. 11 д).

Функция автоматического нечеткого управления системой представлена на рис. 11 е.



**Рис. 10. Пример нечеткой функции принадлежности факторов:**

*а* – кинематическое рассогласование;  
*б* – скорость изменения кинематического рассогласования; *в* – ток управления

**Fig. 10. An example of a fuzzy membership function of factors:**

*a* – kinematic mismatch; *b* – rate of change of kinematic mismatch; *c* – control current

**Таблица 3.  
Матрица корпуса правил**

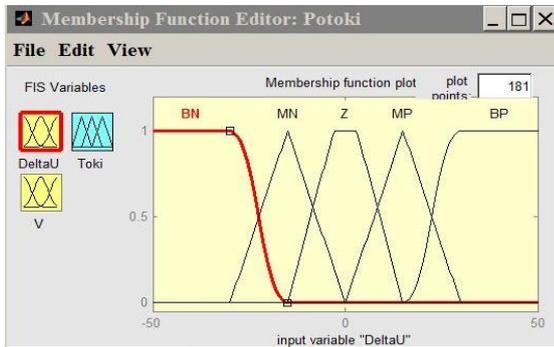
**Table 3.  
Fuzzy associative matrix**

Скорость изменения кинематического рассогласования, $V$	«ток управления, $i$ » как функция от «кинематическое рассогласование, $\Delta u$ »				
	$-2u$	$-1u$	$0u$	$1u$	$2u$
$-2V$	$0i$	$0i$	$0i$	$0i$	$0i$
$-1V$	$1i$	$0i$	$0i$	$0i$	$-1i$
$0V$	$2i$	$1i$	$0i$	$-1i$	$-2i$
$1V$	$2i$	$2i$	$0i$	$-2i$	$-2i$
$2V$	$2i$	$2i$	$0i$	$-2i$	$-2i$

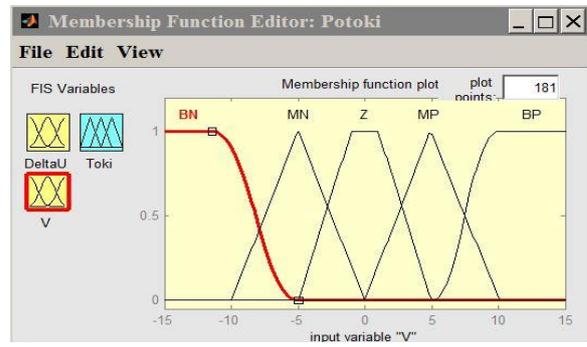
### Выводы

1. Разработан адаптивный алгоритм распределения силовых потоков в трансмиссии активных сочлененных транспортно-технологических машин, основанный на принципах и методах нечеткой логики. К совокупности факторов, являющихся основными критериями для формирования управляющего воздействия, относятся кинематические показатели работы элементов движителя и показатели свойств поверхности по сцеплению и сопротивлению.
2. Алгоритм получен на основании имитационного моделирования движения активной сочлененной транспортно-технологической машины. Математическая модель учитывает кинематическое рассогласование в приводе элементов движителя и скорость изменения кинематического рассогласования. Характеристика опорной поверхности носит стохастический характер. Критерием эффективности выбрана свободная сила тяги машины.
3. Коммутатор управления распределением силового потока, алгоритм которого основан на формализованной задаче нечеткого управления, позволяет обеспечить качественное адаптивное управление активных сочлененных машин, имеющих трансмиссию, отличную от механической.

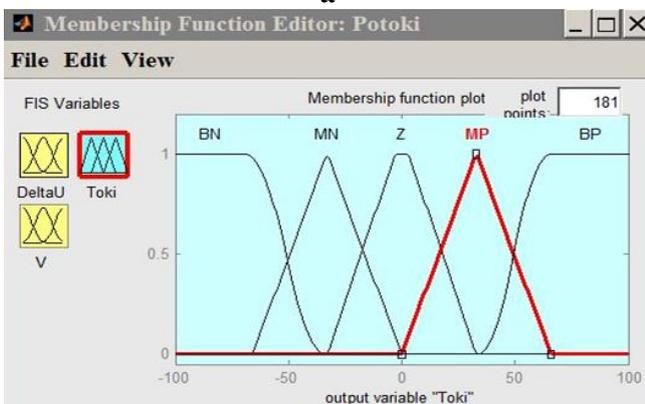
4. Модели, полученные в результате корректной постановки задачи, продемонстрировали свою адекватность; нечеткие выводы сделаны на основании известных общепринятых методик.



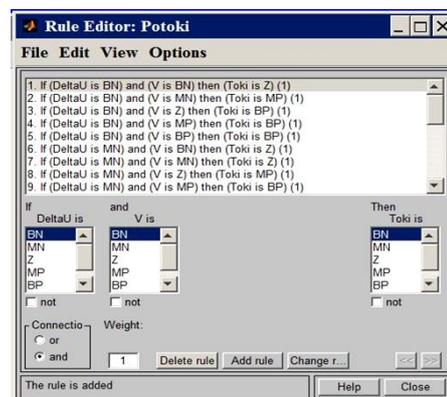
а



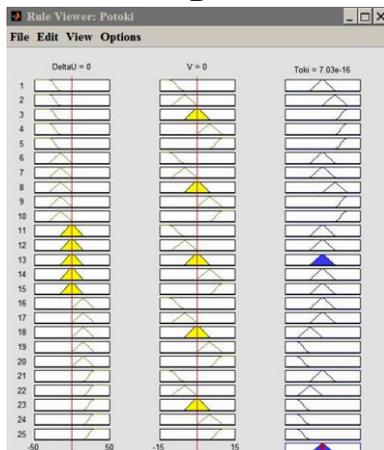
б



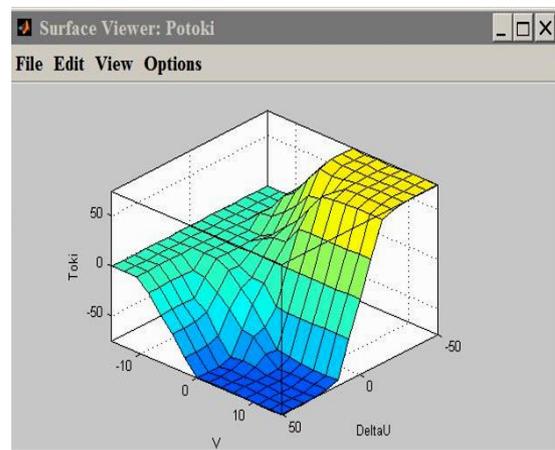
в



г



д



е

Рис. 11. Нечеткий вывод, полученный в среде [14]

а, б – фазификация входных факторов; в – фазификация функции отклика; г – корпус правил нечеткого вывода; д, е – процедура вывода и функция нечеткого управления

Fig. 11. Fuzzy output obtained in Simulink model [14]:

а, b – membership functions of input factors; c – membership function of the response function; d – fuzzy inference rules; e, f – inference procedure and fuzzy control function

**Библиографический список**

1. **Пирковский, Ю.В.** Теория движения полноприводного автомобиля. Прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман. – М.: Юнити, 2001. – 230 с.
2. **Жилейкин, М.М.** Алгоритм работы системы динамической стабилизации за счет управления дифференциалами механической трансмиссии и корректирующего подруливания для трактора / М.М. Жилейкин, Е.В. Ягубова, А.Г. Стрелков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12 (657). С 45-52.
3. **Антонян, А.В.** Алгоритм распределения крутящего момента в автомобиле с колесной формулой 4x4 для обеспечения устойчивости движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С 31-37.
4. **Вольская, Н.С.** Алгоритм работы системы управления тяговыми электродвигателями при криволинейном движении многоосных колесных машин по неровностям деформируемого опорного основания / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 3 (696). С 33-40.
5. **Прядкин, В.И.** Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля / В.И. Прядкин, В.В. Гудков, П.А. Сокол // Лесотехнический журнал. 2019. № 3. С 205-224.
6. **Баженов, Е.Е.** Сочлененные транспортные системы: теоретические основы / Е.Е. Баженов. – Lambert Academic Publishing, 2012. – 276 с.
7. **Платонов, В.Ф.** Полноприводные автомобили / П.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 308 с.
8. **Платонов, В.Ф.** Многоцелевые гусеничные шасси / В.Ф. Платонов, В.С. Кожевников. – М.: Машиностроение, 1998. – 342 с.
9. **Неймарк, Ю.И.** Динамика неголономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 520 с.
10. **Баженов, Е.Е.** Управление силовыми потоками в трансмиссии автомобиля на нечеткой логике / Е.Е. Баженов, В.В. Побединский, А.В. Берстенов // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 4 (51). С 42-48.
11. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ, 2009. – 798 с.
12. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MatLab и fussyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
13. **Васильев, В.И.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 393 с.
14. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2008a [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) (Дата обращения 15.05.2023).

*Дата поступления  
в редакцию: 14.06.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 25.07.2023*