

# СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОЙ ПЛАТФОРМОЙ

**С.Л. Подвальный**

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14  
E-mail: [spodvalny@yandex.ru](mailto:spodvalny@yandex.ru)

**Е.М. Васильев**

*Воронежский государственный технический университет*  
Россия, 394026, Воронеж, Московский проспект, 14  
E-mail: [vgtu-aits@yandex.ru](mailto:vgtu-aits@yandex.ru)

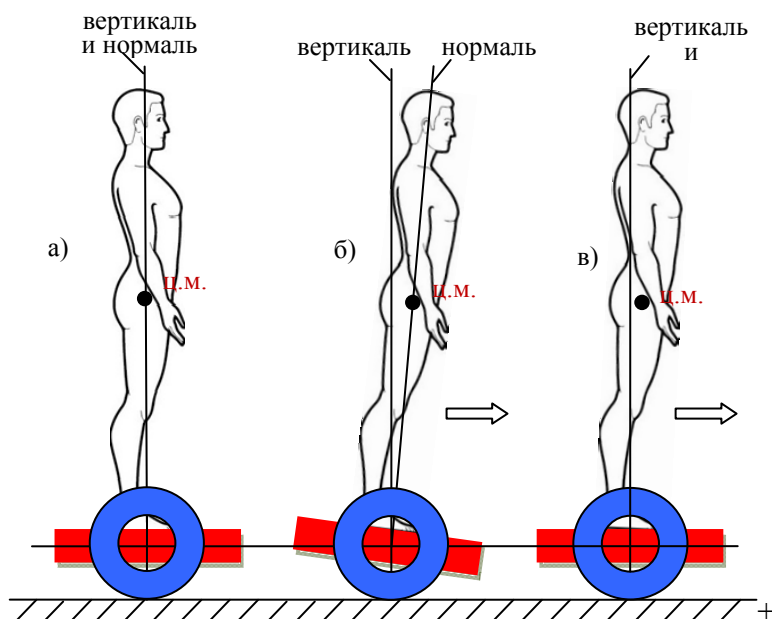
**Ключевые слова:** гироскопическая подвижная платформа, нечеткое управление, управление положением центра массы.

**Аннотация:** Работа посвящена автоматическому управлению движением гироскопической подвижной платформы. Решение этой задачи путем совмещения процесса стабилизации горизонтального положения платформы с ее движением по заданной траектории заключается в выработке некоторого компромиссного, но внутренне противоречивого воздействия: управление перемещением и управление положением оказывают взаимное возмущающее влияние. Для устранения этого противоречия предлагается воспользоваться параметрическим способом управления платформой путем перемещения ее центра масс. Указанный способ применяется, в частности, в гироскопических платформах типа «сегвей». Составлена математическая модель платформы с управлением положением центра массы и разработана структура двухконтурной системы с нечеткими регуляторами. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного способа управления.

## 1. Введение

Подвижные гиросtabilизированные платформы используются для установки на них мобильных роботов, характеризующихся высокой маневренностью при перемещениях в ограниченном пространстве с большим числом препятствий [1]. Управление такими платформами, осуществляется изменением напряжения, подаваемого на соосно расположенные двигатели-колеса. Указанное управляющее воздействие создает вращающий момент, обеспечивающий регулирование двумя координатами состояния платформы: угловым положением платформы, например, углом отклонения ее нормали от направления силы тяжести (вертикали) и линейными координатами ее центра масс, т.е. ее перемещением. Управление двумя координатами состояния с помощью одного управляющего воздействия возможно, в данном случае, в результате декомпозиции этих задач в частотной (временной) области: угловая стабилизация осуществляется быстрым контуром регулирования, а управление линейным перемещением – сравнительно медленным контуром системы [2-5]. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на алгоритмы управления платформой. Например, для горизонтального

перемещения платформы в нужном направлении необходимо предварительно сдвинуть ее в противоположную сторону, создав, тем самым, первоначальный наклон ее нормали в сторону предполагаемого перемещения, а затем уже осуществлять само перемещение с одновременной стабилизацией углового положения. Для устранения такого рода ограничений предлагается для второго управляющего воздействия системы использовать положение ее центра масс относительно оси вращения двигателей. Примером объекта с таким управлением является подвижная платформа типа «сегвей», линейное перемещение которой управляется положением центра масс оператора-человека, располагающего непосредственно на платформе и составляющего вместе с платформой единую «синергетическую» систему, рис. 1.



**Рис. 1.** Схема управления платформой путем перемещения центра масс оператора-человека: а) неподвижное состояние; б) разгон; в) равномерное движение вперед. Нормаль – вертикальная ось платформы; ц.м. – центр масс человека.

Для начала движения оператор-человек переносит центр массы тела вперед и наклоняет, тем самым, вертикальную ось платформы. Изменение углового положения платформы приводит к вращению двигателей, и платформа начинает разгоняться. По мере достижения желаемой скорости линейного перемещения оператор уменьшает смещение центра масс, после чего платформа продолжает двигаться равномерно: угловое положение платформы горизонтальное, а центр масс системы смещен немного вперед и создает вращающий момент, компенсирующий момент сил трения качения. Стабилизация углового положения платформы осуществляется в это время независимым контуром регулирования по сигналам гироскопических датчиков.

Таким образом, ставится задача воспроизвести указанный способ управления гироскопической платформой в системе автоматического регулирования.

## 2. Математическая модель платформы как объекта управления

Кинематическая схема платформы, управляемой положением центра масс, показана на рис. 2.

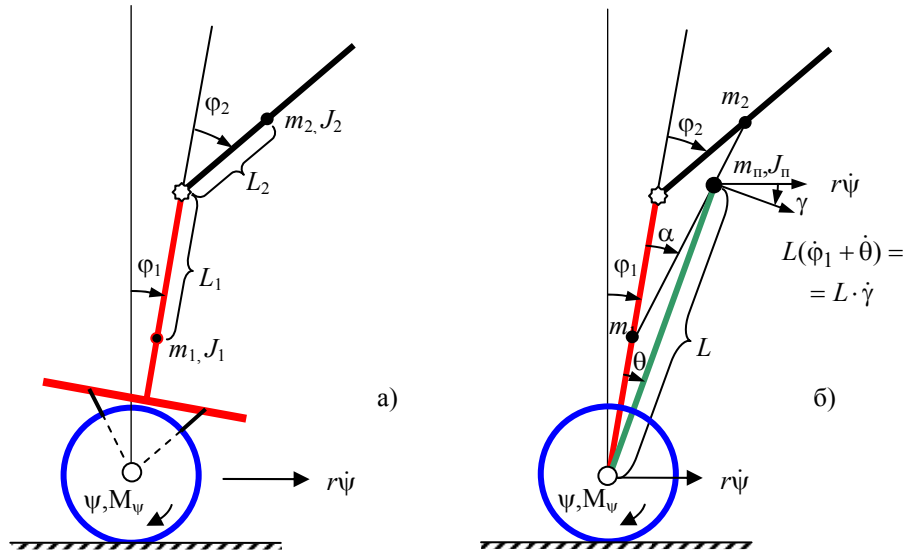


Рис. 2. Кинематическая схема платформы, управляемой положением центра масс.

Платформа представляет собою двухзвенный механизм, верхнее звено 2 которого связано с нижним звеном 1 через заторможенный шарнир, а звено 1 с колесами – через свободно вращающуюся ось. Вращающие моменты  $M_{дв}$  электродвигателей действует на соответствующие колеса и – в обратном направлении – на платформу (звено 1). Угловое отклонение  $\varphi_2$  звена 2 от продольной оси звена 1 может изменяться переносом центра масс звена 2 вперед или назад.

Введем в рассмотрение величины:  $U$  – напряжение питания, подаваемое на двигатели;  $R$  – сопротивление якорной обмотки;  $C_e$ ,  $C_m$  – постоянные по противоЭДС и моменту двигателя;  $k_{тр}$  – коэффициент трения качения колеса;  $m_k$  – масса колеса;  $J_k$  – момент инерции колеса;  $r$  – радиус колеса;  $\psi$  – угол поворота колеса;  $m_1$  и  $m_2$  – массы звеньев;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L_1$  и  $L_2$  – расстояния центров масс  $m_1$  до оси колес и  $m_2$  до шарнира;  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции звеньев относительно центров их масс;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – угловые положения звеньев (см. рис. 2а).

Рассматриваемая система имеет две степени свободы: координаты  $\varphi_1$  и  $\psi$ , и два управляющих воздействия: напряжение питания  $U$  (вращающий момент двигателей) и угловое отклонение  $\varphi_2$  звена 2 от продольной оси звена 1, создающее вращающий момент силы тяжести. Возмущающее воздействие – момент трения  $M_{т.к}$  качения колес.

Модель полученной системы составлялась на основе уравнений Лагранжа (1) для координат  $\psi$  и  $\varphi_1 + \theta = \gamma$ , где  $\theta$  – угол между вертикальной осью платформы и ее расчетной осью, проходящей через центр масс  $m_{п} = m_1 + m_2$  и ось вращения колес, рис. 2б.

$$(1) \quad \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} &= M_{\psi}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \gamma} &= M_{\gamma}, \end{aligned}$$

где  $T$  – кинетическая энергия (2) системы;  $M_{\psi}$  (3) и  $M_{\gamma}$  (4) – моменты, действующие на колеса и платформу соответственно [6,7]:

$$(2) \quad T = \left( m_k \cdot r^2 + J_k + \frac{m_{п} r^2}{2} \right) \cdot \dot{\psi}^2 + \left( \frac{m_{п} L^2 + J_{п}}{2} \right) \cdot \dot{\gamma}^2 + m_{п} r L \dot{\psi} \dot{\gamma} \cdot \cos(\gamma);$$

$$(3) \quad M_{\psi} = 2M_{дв} - (m_{п} + 2m_k) g k_{тр} \cdot \text{sign}(\dot{\psi});$$

$$(4) \quad M_\gamma = m_{\text{п}}gL \cdot \sin(\gamma) - 2M_{\text{дв}}.$$

Здесь  $J_{\text{п}}$  – момент инерции всей системы относительно центра ее масс.

В результате подстановки (2)-(4) в (1) получена искомая модель (5), (6) платформы [8, 9]:

$$(5) \quad \begin{aligned} & (2m_{\text{к}} \cdot r^2 + 2J_{\text{к}} + m_{\text{п}}r^2) \cdot \ddot{\psi} + m_{\text{п}}rL(\ddot{\gamma} \cdot \cos(\gamma) - \dot{\gamma}^2 \cdot \sin(\gamma)) = \\ & = 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_{\text{м}} - (m_{\text{п}} + 2m_{\text{к}})g \cdot k_{\text{тр}} \cdot \text{sign}(\dot{\psi}); \end{aligned}$$

$$(6) \quad (m_{\text{п}}L^2 + J_{\text{п}}) \cdot \ddot{\gamma} + m_{\text{п}}rL \cdot \cos(\gamma) \cdot \ddot{\psi} = m_{\text{п}}gL \cdot \sin(\gamma) - 2 \frac{U - C_e(\dot{\psi} - \dot{\phi}_1)}{R} \cdot C_{\text{м}},$$

где

$$(7) \quad L(\varphi_2) = \left( 2L_1L_2 \frac{m_2}{m_{\text{п}}} \left( \frac{m_2}{m_{\text{п}}} + 1 \right) \cos(\varphi_2) + L_1^2 + (L_1^2 + L_2^2) \frac{m_2^2}{m_{\text{п}}^2} + 2 \frac{m_2}{m_{\text{п}}} L_1^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$(8) \quad J_{\text{п}}(\varphi_2) = \frac{(L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos(\varphi_2))m_1m_2}{m_{\text{п}}} + J_1 + J_2.$$

### 3. Система управления платформой

Рассматриваемый объект управляется двумя физическими величинами: напряжением питания  $U$  и угловым отклонением  $\varphi_2$  звена 2 от продольной оси звена 1, создающим вращающий момент силы тяжести. Регулируемые координаты: угловое отклонение  $\varphi_1$  нормали платформы от вертикали и угол  $\psi$  поворота колес, определяющий скорость продольного перемещения платформы. Анализ физических взаимосвязей (5)-(8) перечисленных величин позволяет сделать вывод о том, что задача стабилизации  $\varphi_1$  является иерархически подчиненной по отношению к управлению продольной скоростью платформы, так как угловое отклонение  $\varphi_1$  нормали платформы возникает вследствие углового отклонения  $\varphi_2$  центра масс [10-14].

Функциональная схема управления указанными координатами показана на рис. 3.

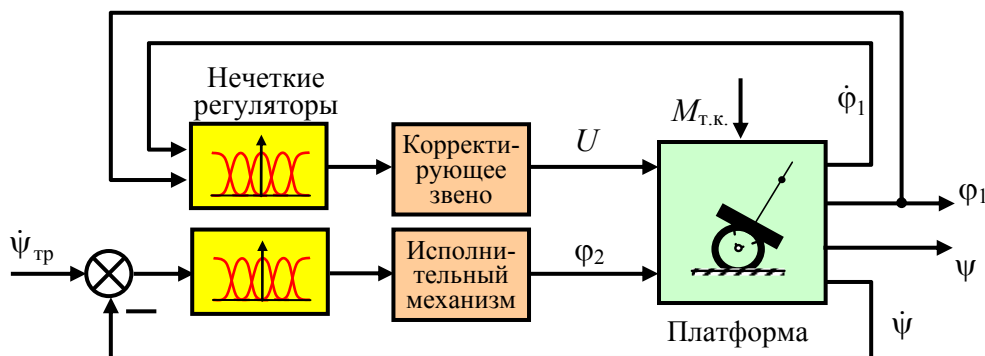


Рис. 3. Функциональная схема системы управления.

Нечеткие регуляторы [15, 16] выполнены по типовым правилам вывода «если..., то» и используют лингвистические переменные с пятью нечеткими значениями, имеющими симметрично перекрывающиеся числовые области определения по входным координатам, см. рис. 3. Корректирующее звено может быть введено для достижения ас-

татизма в контуре регулирования  $\varphi_1$ . Исполнительный механизм перемещает центр масс и описывается моделью инерционного звена.

Результаты проверки работоспособности системы показаны на рис. 4.

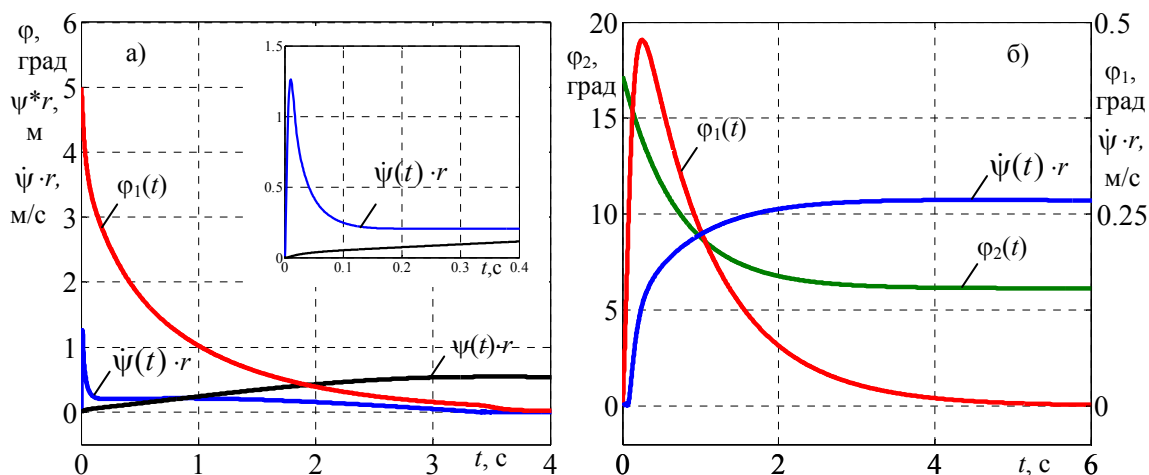


Рис. 4. Проверка работоспособности системы: а) режим приведения платформы в нормальное положение  $\varphi_1(0) = 0$  град из первоначального состояния с  $\varphi_1(0) = 5$  град; б) режим набора скорости путем начального отклонения центра масс на угол  $\varphi_2(0) = 17$  град.

Анализ рис. 4а подтверждает эффективность нечеткого контура стабилизации положения платформы в заданном положении (совпадение нормали платформы с направлением силы тяжести:  $\varphi_1(t) \rightarrow 0$ ). При изменении масс  $m_1$  и  $m_2$  звеньев от 20 кг до 80 кг качество стабилизации сохраняется без изменений.

На рис. 4б показано, что исходное отклонение центра масс на угол  $\varphi_2(0) = 17$  град приводит к первоначальному наклону всей платформы ( $\varphi_1(t)$ ) примерно на 0,5 град, после чего платформа контуром стабилизации приводится в заданное положение  $\varphi_1(t) = 0$  град. По мере набора скорости до  $\dot{\psi}(t) \cdot r = 0,28$  м/с угловое отклонение центра масс снижается до значения  $\varphi_2(t) = 6$  град и остается таким при равномерном прямолинейном движении для компенсации момента сил трения качения.

Таким образом, результаты проверки подтверждают работоспособность предложенного способа управления перемещением гироскопической платформой.

## 4. Заключение

В работе продемонстрирован пример применения синергетического подхода к задаче управления гироскопической платформой путем введения дополнительного управляющего воздействия – положения центра масс системы. Отработка этого воздействия осуществляется за счет собственных кинематических и динамических взаимосвязей координат платформы. В результате возникает движение системы, обеспечивающее согласованное решение задачи стабилизации положения платформы и задачи ее перемещения на плоскости.

Использование нечетких регуляторов в системе управления обеспечивает сохранение работоспособности системы в широком диапазоне изменения ее массы, т.е. в условиях нестационарности ее параметров.

Полученные результаты направлены на создание высокоманевренных самобалансирующихся роботов с двухколесными или шаровыми опорами.

## Список литературы

1. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движения // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 67-78.
2. Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М. Проблемы управления неустойчивыми системами // Успехи механики. 2005. Т. 3, №2. С. 71-135.
3. Белотелов В.Н., Мартыненко Ю.Г. Управление пространственным движением перевернутого маятника, установленного на колесной паре // Известия РАН. Механика твердого тела. 2006. № 6. С. 10-28.
4. Aoustin Y., Formal'sky A., Martynenko Y. Stabilization of unstable equilibrium postures of a two-link pendulum using a flywheel // Известия РАН. Теория и системы управления. 2006. № 2. С. 43-50.
5. Васильев Е.М., Прокофьева Д.М. Нечеткое управление структурно неустойчивыми объектами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 10.1. С. 8-12.
6. Нефедов Г.А., Ткачев С.Б. Приведение модели движения двухколесного робота с дифференциальным приводом к квазиканоническому виду // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 1895-1904.
7. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: URSS, 2018. 416 с.
8. Васильев Е.М., Скобов Э.А. Математическое описание двухколесной самобалансирующейся платформы, управляемой положением центра массы водителя // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТТ '2018: материалы I междунар. науч.-практ. конф., 12-13 декабря 2018 г. В 2 т. Т. 1. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2018. С. 189-194.
9. Васильев Е.М., Скобов Э.А. Управление подвижной платформой с гироскопической стабилизацией // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. № 6 (42). С. 49-52.
10. Баландин Д.В., Скучилин М.Ю. Управляемые движения сферического робота с маятниковым приводом // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2166-2171.
11. Боровин Г.К., Лапшин В.В. Оптимальное управление ориентацией двух шарнирно соединенных тел // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 1734-1744.
12. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативные системы интеллектуального управления: принципы построения и пути реализации // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 996-1007.
13. Podvalny S L, Vasiljev E.M., Varabanov V. F. Models of multi-alternative control and decision-making in complex systems // Automation and Remote Control. 2014. Vol. 75, No. 10. P. 1886-1890.
14. Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота // Автоматика и программная инженерия. 2015. № 2 (12). С. 16-34.
15. Бобырь М.В., Титов В.С. О некоторых свойствах управления мягкими мехатронными системами на основе нечеткой логики // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 3741-3749.
16. Корнилков А.Н., Липатников Н.Г., Хижняков Ю.Н. Разработка системы управления «сегвей» на базе адаптивного нечеткого регулятора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2016. № 19. С. 69-79.