

**К. С. Шоланов**, д-р техн. наук, проф., sholkor@jandex.kz, **К. А. Абжапаров**, Ph. D. студент, Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет им. К. И. Сатпаева, г. Алматы, 05040, ул. Сатпаева, 22, Республика Казахстан

## Обоснование возможности применения нового платформенного робота в качестве активной управляемой опоры

*Рассматривается возможность применения нового платформенного робота в качестве активной шестиосной управляемой опоры для защиты объектов, технических устройств, сооружений от нештатных механических воздействий. Показано, что такая возможность может быть реализована, если механическая часть платформенного робота представляет собой шестиподвижный параллельный манипулятор с новой топологией структуры.*

*Представлены результаты экспериментов, подтверждающие возможность использования платформенного робота в качестве активной управляемой опоры и позволяющие сформулировать рекомендации для применения нового платформенного робота в качестве активной опоры. Показан пример применения платформенного робота в активной системе сейсмозащиты здания.*

**Ключевые слова:** платформенный робот, функциональные возможности, двигательная реакция, гидропривод, активная управляемая опора

### Введение

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности применяются платформенные роботы с топологией структуры параллельного манипулятора, подобной платформам Гофа—Стюарта (Gough—Stewart) [1—3]. Для параллельных манипуляторов этих роботов не существует в явном виде решения прямой задачи кинематики [3—6]. В таких платформенных роботах возникают проблемы, связанные с топологией структуры, при управлении, а также при эксплуатации, например, отказ одного привода ведет к нарушению работоспособности всего робота.

В данной статье рассматривается использование платформенных роботов в системе защиты объектов, технических устройств и сооружений от нештатных механических воздействий. Под нештатным механическим воздействием подразумевается силовое или кинематическое воздействие, приводящее к нежелательным последствиям. К нештатным механическим воздействиям можно отнести колебания земной коры в различных плоскостях с большой амплитудой при землетрясениях, колебание водной поверхности, воздействующее на плавающие средства, удары при посадке летающих средств и др.

Данная статья представляет собой продолжение работы [7], в которой был проведен кинематический анализ параллельного манипулятора SHOLKOR, а также на действующей модели выявлены его особенности и преимущества, обусловленные особенностями топологии структуры.

В данной статье ставится задача исследования возможности использования нового платформенного робота на базе манипулятора SHOLKOR в качестве шестиосной активной управляемой опоры, устанавливаемой между защищаемыми объектами и источником нештатных механических воздействий. Используемый в качестве активной управляемой опоры платформенный робот должен своевременно реагировать на действия источника нештатных возмущений и защитить объект от нежелательных последствий. С учетом этого платформенный робот

должен обладать определенной совокупностью функциональных возможностей и иметь требуемую двигательную реакцию, причем под двигательной реакцией понимается [8] время наиболее быстрого ответа в виде простого и заранее известного движения на внезапно появляющийся, но известный сигнал.

### Функциональные особенности параллельного манипулятора

Механическая часть конструкции платформенного робота представляет собой шестиподвижный параллельный манипулятор SHOLKOR [9] с топологией структуры, представленной на рис. 1. Здесь показана нижняя платформа 1 и верхняя платформа 2, соединенные соединительными звеньями (СЗ) 3—8, имеющими возможность изменять свои длины. При этом соединительные звенья образуют с платформами в узлах  $A_1, A_2$  двухзвенные сферические соединения; в узлах  $B_1, B_2$  — трехзвенные сферические соединения; в узлах  $C_1, C_2$  — четырехзвенные сферические соединения. Именно особенности параллельного манипулятора SHOLKOR, описанные в статье [7], определяют важные функциональные возможности нового платформенного робота и являются основанием для выбора этого робота в качестве активной управляемой опоры. Отдельно отметим эти функциональные возможности.

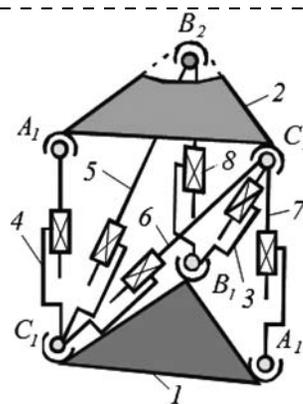


Рис. 1. Структурная схема параллельного манипулятора

Во-первых, с помощью управляемых приводов можно изменять длину любого из шести СЗ независимо от других. При этом в зависимости от длины СЗ подвижная платформа занимает строго определенное положение по отношению к неподвижной платформе.

Во-вторых, изменяя с помощью управляемых приводов заданным образом длины определенной совокупности СЗ одновременно или в произвольной последовательности, можно получить любое требуемое пространственное положение подвижной платформы. Следует отметить, что область возможных положений подвижной платформы ограничивается предельными (максимальными, минимальными) длинам СЗ или предельными углами поворотов звеньев в сферических соединениях.

В-третьих, топология структуры нового платформенного манипулятора, на базе которого создан платформенный робот, обеспечивает возможность пространственного движения любой платформы робота как ведущего звена. Из решения прямой задачи кинематики [7] следует, что можно получить пространственные движения верхней платформы относительно нижней двумя способами:

- (по Эйлеру) путем перемещения в пространстве заданной точки — узла  $C_2$  — путем изменения длин СЗ 3, 6, 7, затем, выполняя сферическое вращение относительно узла  $C_2$ , путем изменения длин СЗ 4, 5, 8. Так как каждому положению подвижной платформы соответствуют вполне определенные длины соединительных звеньев, то, обратно, представляется возможным перемещать платформу как ведущее звено, при этом в зависимости от положения подвижной платформы длины СЗ как ведомых звеньев будут однозначно изменяться;
- аналогично можно перемещать нижнюю платформу относительно верхней, при этом будет изменяться другая совокупность СЗ.

Перечисленными выше возможностями не обладает ни одна из известных платформ Гофа—Стюарта. Именно благодаря этим функциональным возможностям рассматриваемый платформенный робот может быть использован в качестве активной управляемой опоры, в которой нижняя платформа как ведущее звено под действием источника механических воздействий может совершать пространственные движения относительно верхней платформы, связанной с защищаемым объектом.

#### Описание конструкции нового платформенного робота и его функционирования в качестве активной управляемой опоры

Для анализа возможности использования платформенного робота в качестве шестиосной активной опоры создана действующая модель платформенного робота (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Для того чтобы использовать робот в качестве активной опоры и обеспечить большую грузоподъемность в платформенном роботе применяются автоматически управляемые гидравлические приводы (функционально подобные управляемым амортизаторам). Платформенный робот оснащен тремя тен-

зометрическими датчиками 1, шестью магнитострикционными датчиками перемещения 2, шестью датчиками давления 3. Исполнительными устройствами робота являются шесть сливных 4 и шесть нагнетательных 5 электромагнитных клапанов, которые управляют шестью гидроприводами поступательного движения, имеющими одинаковые схемы функционирования. Гидросистема робота питается от единого гидронасоса 6.

Функциональная схема одного из гидроприводов в составе робота, установленного между защищаемым объектом 1 и источником 2 механических воздействий, представлена на рис. 3, где показаны нижняя 3 и верхняя 4 платформы. Привод состоит из гидроцилиндра 5 одностороннего действия с поршнем 6 и штоком 7. Между нижней платформой 3 и источником 2 установлен тензометрический датчик 8, измеряющий усилие, действующее на нижнюю платформу. Перемещение штока измеряется с помощью датчика перемещения 9.

Гидравлическая система состоит из насосной станции 10, нормально открытого нагнетательного электромагнитного клапана 11 и нормально закрытого сливного электромагнитного клапана 12, резервуара 13. Давление в полости цилиндра определяется с помощью цифрового датчика давления 15, верхняя и нижняя платформы соединены с гидроцилиндром сферическими шарнирами 14.

Механизм гашения нештатных механических воздействий основан на том, что в любой момент времени, управляя давлениями в верхних полостях шести гидроцилиндров, можно добиться уравнивания сил, действующих на верхнюю платформу, т. е. неподвижности верхней платформы, в то время как нижняя платформа может совершать нежелательные движения совместно с источником, оказывающим нештатные механические воздействия. Необходимые давления в верхних полостях гидроцилиндров поддерживаются с помощью нагнетательных 11 и сливных 12 управляемых электромагнитных клапанов. В зависимости от внешней нагрузки, определяемой тензометрическим датчиком 8, и от положения верхней платформы, определяемой датчиком перемещения 9, вычисляется требуемое давление жидкости в надпоршневой полости гидроцилиндра, которое сравнивается с действительным давлением, определяемым датчиком 15. Сигналом для срабатывания системы является сигнал рассогласования данных, поступивших от датчика давления 15, и требуемого значения давления. С по-

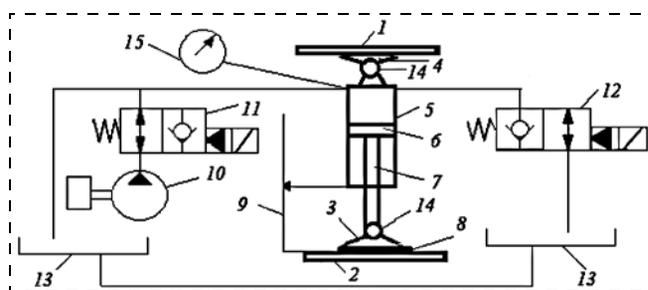


Рис. 3. Схема гидравлического привода в составе робота

## Анализ двигательной реакции гидроприводов

Платформенный робот, используемый в качестве активной управляемой опоры, должен быстро реагировать на действие источника нештатных воздействий и не допускать, чтобы вредные возмущения оказывали действия на защищаемый объект. При этом эффективность функционирования активной опоры в значительной мере определяется двигательной реакцией платформенного робота. Вместе с тем, двигательная реакция робота зависит от двигательной реакции управляемых гидроприводов. В связи с этим ниже проводится экспериментальное исследование двигательной реакции управляемых приводов с применением действующей модели робота (см. рис. 2 на второй стороне обложки).

В управляемом гидроприводе присутствуют различные по физической природе и по выполняемым функциям элементы, например, программные и аппаратные средства автоматизированного управления; электромагнитный клапан; магистраль, по которой перемещается рабочая жидкость (РЖ); гидродвигатель в виде гидроцилиндра одностороннего действия со штоком и возвратной пружиной. Указанные элементы в совокупности оказывают влияние на двигательную реакцию гидропривода. При этом ввиду значительного быстродействия современной микропроцессорной техники и, как следствие, малости времени реакции (запаздывания) аппаратных и программных средств управления основное внимание уделено исследованию двигательной реакции гидропривода. Следует отметить, что при проектировании приводов платформенного робота оценивать двигательную реакцию гидропривода можно на основе компьютерного моделирования динамических звеньев, а именно: электромагнитного клапана, магистрали, по которой перемещается РЖ, гидродвигателя в виде гидроцилиндра одностороннего действия со штоком и возвратной пружиной. В этом случае двигательная реакция управляемого гидропривода равна некоторой сумме двигательных реакций составляющих элементов, которые могут быть оценены по их динамическим характеристикам, например по некоторой доле от постоянной времени. Двигательная реакция — это время, намного меньшее, чем постоянная времени, так как характеризует время, при котором выходная величина достигает минимально заметного значения. Поэтому в первом приближении можно считать, что двигательная реакция равна  $1/3$  постоянной времени. Двигательная реакция, полученная на основе моделирования, может использоваться в качестве сравнительной характеристики при выборе и проектировании приводов. Так как методы анализа динамических звеньев тривиальны, то ниже основное внимание уделяется экспериментальному исследованию двигательных реакций гидроприводов двух разновидностей.

Для анализа двигательной реакции реальных приводов проведено экспериментальное исследование зависимостей от времени давления РЖ в напорной магистрали и перемещения штоков гидропривода. Для проведения экспериментов на верхнюю

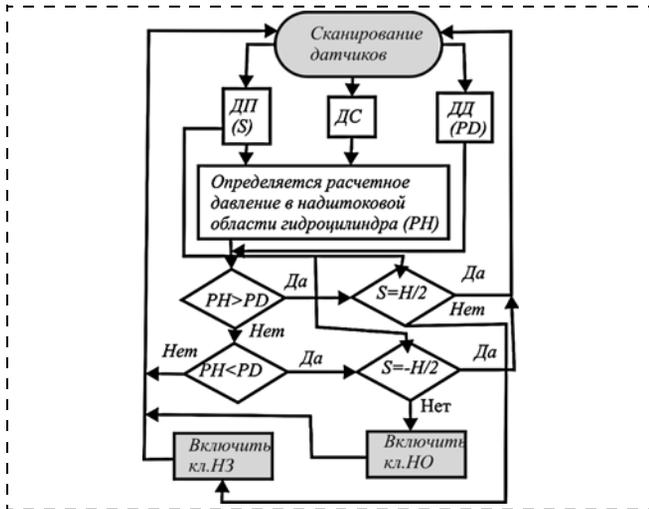


Рис. 4. Блок-схема алгоритма функционирования привода в режиме активной опоры

мощью нагнетательного 11 и сливного 12 клапанов устанавливается требуемое давление в полости гидроцилиндра.

Автоматизированное функционирование каждого из приводов робота, когда робот используется в качестве активной опоры, выполняется по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 4, на котором приняты следующие обозначения: ДП — датчик перемещения; ДС — тензометрический датчик силы; ДД — датчик давления; НО — нагнетательный клапан (нормально открытый); НЗ — нормально закрытый сливной клапан. В начальном положении штоки гидроприводов перемещены на  $1/2 H$  ( $H$  — ход). В соответствии с алгоритмом система управления сканирует датчики верхней платформы ДС, а также ДП, ДД в каждом приводе и определяет фактическое значение перемещения  $S$ , усилия и давления  $PD$  в надштоковой области гидроцилиндра. При известном положении робота (по датчикам положения) и усилиях, возникающих между нижней платформой в соединительных узлах, путем кинестатического расчета робота определяется расчетное значение  $RH$  давления в надпоршневой области в каждом приводе. Расчетные значения  $RH$  давления в полостях гидроцилиндров сравниваются с действительными значениями давления  $PD$ , и подается бинарный сигнал на один из клапанов. Если  $RH > PD$ , то открывается нагнетательный клапан  $НО$ , а сливной закрывается; если наоборот, то открывается сливной клапан  $НЗ$ , а нагнетательный закрывается. В случае когда давления равны, то состояние клапанов не изменяется. В случае когда шток находится в крайнем верхнем или в крайнем нижнем положении, состояние клапанов может изменяться только определенным образом или не меняется совсем. Например, шток достиг нижнего крайнего положения  $S = -1/2 H$  при  $RH > PD$ , наливной клапан включать бессмысленно, следовательно, состояние этого клапана не должно меняться. Наоборот, при  $RH < PD$  и  $S = 1/2 H$  нет необходимости включать сливной клапан, что следует из блок-схемы.

платформу робота помещали груз заданной массы 15 кг. Датчики перемещения устанавливали в среднее положение штоков, когда они выдвинуты на половину рабочего хода. С помощью тензометрических датчиков и датчиков давления определяли значения усилий, действующих на шток, и давлений в надпоршневых полостях гидроцилиндров. Эти значения обрабатывались в контроллере и использовались программой, управляющей роботом. Затем, в соответствии с заданной последовательностью, блок управления осуществлял управление движением платформы робота. Данные, полученные от информационно-измерительной системы, обрабатывались контроллером по заданной программе, и на экран монитора в системе SCADA выводились графики зависимости перемещения штока и давления в гидроцилиндре. На рис. 5 (см. вторую сторону обложки) приведены графики экспериментальных исследований, полученные для двух приводов платформенного робота, а именно для гидроприводов 6 (рис. 5, а) и 7 (рис. 5, б), показанных на рис. 1. На графиках, полученных в SCADA, показаны зависимости перемещения (красной линией) и давления (синей линией) от времени за период времени 2 мин. При этом показаны соответствующие фазы открытия нагнетательного клапана.

Следует отметить, что в гидроприводе 6 диаметр поршня гидроцилиндра  $d_1 = 16$  мм, а в гидроприводе 7 диаметр поршня  $d_2 = 20$  мм, причем оба гидропривода являются односторонними с возвратной пружиной. В гидроприводе 7 поршень имеет дросселирующие отверстия, а в гидроприводе 6 дросселирование не предусмотрено.

Для масштабирования времени на графиках, полученных в реальном масштабе времени, ось разбита на 620 равноудаленных отрезков. Таким образом, введена шкала с ценой деления 0,19 с. В результате из данных графиков на рис. 5, а следует, что перемещение штока в гидроприводе 6 начинается через 0,76 с после появления давления РЖ в полости гидроцилиндра. При проведении экспериментов с гидроприводом 7 дополнительно наблюдалось состояние нагнетательного клапана. На рис. 5, б показано время открытия нагнетательного клапана, которое соответствует окончанию жирной красной полосы. Из графиков следует, что через 4,5 с после открытия клапана наблюдается изменение давления в полости гидроцилиндров. Очевидно, это запаздывание объясняется сопротивлением магистрали РЖ. Сравнение графиков давления и перемещения показывает, что перемещение штока начинается через 4,56 с после того, как появляется давление в полости гидроцилиндра. Полученные временные показатели, характеризующие двигательные реакции элементов, входящих в состав гидроприводов, позволяют сделать следующие заключения: наибольшим временем двигательной реакции обладает магистраль РЖ; время двигательной реакции гидропривода с дросселирующими отверстиями в поршне в 6 раз больше, чем в гидроприводе без дросселирования.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для улучшения двигательной реак-

ции привода необходимо совместное исполнение в гидроприводе исполнительных устройств и гидравлической аппаратуры управления, т. е. необходимо применение мехатронных гидравлических приводов исключения влияния магистрали РЖ. Вместе с тем, эксперименты показали, что неэффективно применение дросселирующих элементов в гидроприводах платформенных роботов, используемых в качестве активных управляемых опор.

### Пример применения платформенного робота в системе активной сейсмозащиты

В настоящее время рекомендуется применение активной системы сейсмозащиты зданий и сооружений, использующей активные управляемые опоры. Таким образом, платформенный робот, рассмотренный в данной работе, может быть применен в системе активной сейсмозащиты. В качестве примера использования платформенного робота на рис. 6 представлена комбинированная система сейсмозащиты [10], состоящая из пассивных и активных систем сейсмозащиты. В этой системе между наземной частью здания 1 и фундаментом 2 с нижней части основания 3 устанавливаются пассивные сейсмоизолирующие устройства, например кинематический фундамент 4 (могут быть использованы шары). Кроме того, с боковых сторон нижней части здания для погашения горизонтальных сил действия земной коры (в основном приводящих к разрушениям) применяется система активной сейсмозащиты. Эта система образуется платформенными роботами 5, число которых устанавливают расчетным путем. В данной системе часть платформ роботов связана с фундаментом 2, при землетрясении эти платформы совершают пространственные движения вследствие движения земной коры. Другая часть платформ роботов связана со зданием. Благо-

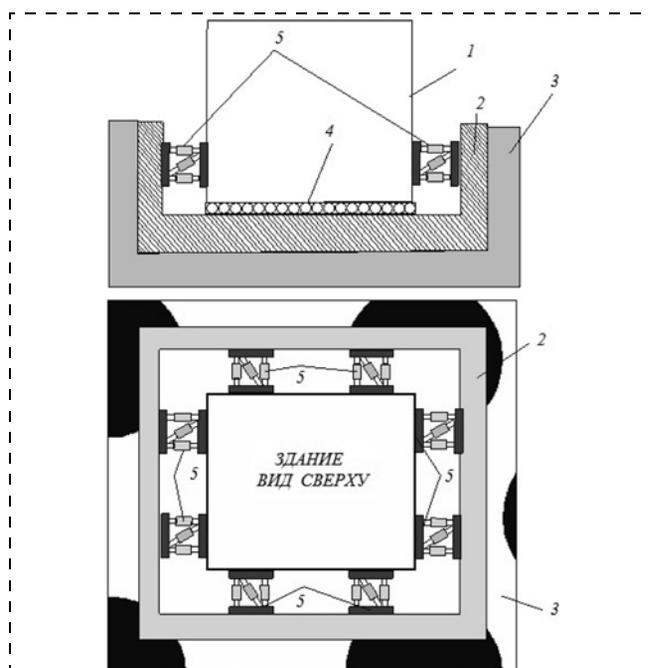


Рис. 6. Схема комбинированной системы сейсмозащиты

даря действиям автоматической системы управления роботов в качестве активной опоры, описанной выше, эти платформы остаются неподвижными, тем самым движение земной коры при землетрясении не передается на здание.

### Заключение

Платформенный робот, механическая часть которого представляет параллельный манипулятор с новой топологией структуры, имеет функциональные возможности, позволяющие использовать робот в качестве активной управляемой опоры для защиты технических объектов, зданий, сооружений от нештатных механических воздействий.

Для обоснования возможности применения платформенного робота в качестве активной опоры создана действующая модель робота. Этот робот оснащен шестью гидроприводами с одинаковыми составными элементами. Создан алгоритм управления приводами в режиме активной опоры. Функциональная возможность платформенного робота своевременно реагировать на действие источника нештатных воздействий определяется его двигательной реакцией, которая зависит от двигательных реакций управляемых приводов. Из результатов экспериментального исследования значения двигательных реакций гидроприводов следует, что для улучшения двигательной реакции привода необходимо

применение мехатронных гидравлических приводов без дросселирующих элементов. Значение двигательной реакции, равное 0,76 с, полученное для гидропривода без дросселирующих отверстий, свидетельствует о том, что платформенный робот можно использовать в качестве активной управляемой опоры.

Приведенная схема комбинированной системы сейсмозащиты демонстрирует применение в перспективе платформенных роботов в качестве управляемых активных опор.

### Список литературы

1. Gough V. E. Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance // Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng. 1956. P. 392–394.
2. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. London. 1965. Vol. 180, N. 15. P. 371–385.
3. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review // Mechanism and Machine Theory. 2000. P. 15–40.
4. Merlet J. P. Parallel Robots, Springer, Dordrecht, 2006.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms (Second Ed.). Springer, 2002. 520 p.
6. Nanua P., Waldron K. J., Murthy V. Direct Kinematic Solution of a Stewart platform // IEEE Trans. On Robotics and Automation. 1990. Vol. 6. P. 438–444.
7. Шоланов К. С. Синтез схемы строения и решение задачи позиционирования параллельного манипулятора платформенного типа // Мехатроника, автоматизация и управление. 2014. № 11. С. 44–50.
8. Малинецкий Г. Г. Робототехника, прогноз, программирование. М.: Изд. ЛКИ, 2008.
9. Sholanov K. S. Platform robot manipulator WO/2015/016692 05.02.2015.
10. Sholanov K. S. Combined earthquake protection system (variants). WO2015/099519A1, 02.07.2015

## Feasibility Study of Application of the New Robot Platform as an Active Controllable Support

K. S. Sholanov, sholkor@jandex.kz✉, K. A. Abzhaparov,

Kazakh National Science Technical University, Almaty, 05040, Republic of Kazakhstan

Corresponding author: Sholanov Korganbai S., D. Sc., Professor, Kazakh National Science Technical University, Almaty, 05040, Republic of Kazakhstan, e-mail: sholkor@jandex.kz

Received on December 09, 2015

Accepted on December 15, 2015

*The article presents results of the feasibility study of a new robotic platform as an active six-axis-driven support for protection of the facilities, technical equipment and structures from the extraordinary mechanical influences. It was demonstrated that such a system can be realized, if the mechanical part of the platform of the robot is a six-movable parallel arm with a new topology structure. In order to substantiate the use of a platform robot as an actively controllable support, a working model was created of the robot platform with the hydraulic drives, which ensured functioning of the robot platform as a controllable support. In order to evaluate the reaction of the robot to the changing external perturbations, the indicator of the motor reaction was used. For analysis of the motor reactions of the real-sided spring return actuator with throttling holes in the piston and without throttling apertures, an experimental study was done on the current model of the robot platform. The experimental results confirmed the possibility of using the robot as a platform for an actively controllable support and allowed to formulate recommendations for application of the new platform as an active support. An example is presented of the use of the robot platform system in an active seismological protection system for buildings.*

**Keywords:** robot platform, functionality, motor response, hydraulic, active controllable support

For citation:

Sholanov K. S., Abzhaparov K. A. Feasibility Study of Application of the New Robot Platform as an Active Controllable Support, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 17, no. 5, pp. 320–324.

DOI: 10.17587/mau/17.320-324

### References

1. Gough V. E. Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance, *Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng.*, 1956, pp. 392–394.
2. Stewart D. A platform with six degrees of freedom, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, London, 1965, vol.180, no. 15, pp. 371–385.
3. Dasgupta B., Mruthyunjaya T. S. The Stewart platform manipulator: a review, *Mechanism and Machine Theory*, 2000, pp. 15–40.

4. Merlet J. P. Parallel Robots, Springer, Dordrecht, 2006.
5. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms (Second Ed.), Springer, 2002, 520 p.
6. Nanua P., Waldron K. J., Murthy V. Direct Kinematic Solution of a Stewart platform, *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 1990, vol. 6, pp. 438–444.
7. Sholanov K. S. Synthesis of the Schematic Structure and Solving the Task of Positioning of a Parallel Platform Manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 11, pp. 44–50 (in Russian).
8. Malinetsky G. G. Robotechnics, Prediction, Programming / under the editorship of, Moscow, LKI Publishing House, 2008.
9. Sholanov K. S. Platform robot manipulator WO/2015/016692 05.02.2015.
10. Sholanov K. S. Combined earthquake protection system (variants). WO2015/099519A1, 02.07.2015.