

V. A. Kartashev, Professor, Leading researcher, kart@list.ru,
A. A. Boguslavsky, Leading researcher, anbg74@mail.ru,
V. V. Kartashev, Junior researcher, vsevolod.kartashev@gmail.com,
V. S. Yaroshevsky, Leading researcher, yarosh@list.ru,
S. V. Michaesku, Postgraduate student, sawva.mikh@gmail.com,
Keldysh Institute for Applied Mathematics

Problems of Manipulator Motions Safety

The problems of manipulator motions safety are discussed. The first one is to exclude occasional incorrect motions. The source of such motions is malfunction of robot equipment. The methods of real time robot serviceability checking are proposed. They are based on analysis of continuity and nonlinearity of position sensors changing in all motions. The second source of equipment failure is collisions with technological equipments during robot training procedure. It takes place during adjustment of program points and trajectories. Geometrical modeling of manipulator and workspace allows to avoid such mistakes. The proposed method of limited accuracy of geometry presentation reduces computation complicity of verification. Technical vision is considered as subsystem of human operator safety in manipulator workspace. Ability of operator displacement tracking depends on control unit performance. The algorithm to detect outside object penetrating into the specified zone of workspace in real time is described.

Keywords: manipulator motions safety, real time checking of robot serviceability, geometrical presentation of workspace, technical vision system

References

1. Kartashev V. A. Upravlenie dvizheniem manipulyatora, sostavlenno iz odinakovykh moduley. *Izvestiya RAN. Seriya "Teoriya i sistemy upravleniya"*. 2006. N. 6. P. 168—174.

2. Wöhler C. 3D Computer Vision. 2nd ed. Springer, 2013. P. 385.
3. Martin T. Mikrokontrollery firmy STMicroelectronics na baze yadra Cortex-M3. Seriya STM32. M.: Tekhnosfera, 2009. P. 96.
4. Olsson T. Arduino Wearables. Apress, 2012. P. 336.

УДК 621.865.8

А. А. Богданов¹, рук. лаборатории, А. С. Горбанева¹, зам директора по научной работе,

И. М. Кутлубаев^{1, 2}, д. р. техн. наук, проф., науч. рук. проектов,

О. Р. Панфилова¹, канд. техн. наук, ст. преподаватель, ptmr74@mail.ru

¹ ОАО "НПО "Андроидная техника",

² ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г. И. Носова"

Основы расчета нагрузок на кулисные механизмы, используемые в антропоморфных роботах¹

Предложен подход к определению векторных инерционных нагрузок, действующих на звенья кулисных механизмов с внутренним входом, применяемых в антропоморфных роботах.

Ключевые слова: кулисный механизм с внутренним входом, антропоморфный робот, силы инерции, приведенная сила

Введение

Настоятельная необходимость замены человека, выполняющего действия в неблагоприятных условиях, механическими системами определило нарастающий интерес к созданию антропоморфных роботов [1]. Этому в значительной мере способствуют достижения в смежных областях — электронике, механике, гидравлике.

Схема построения антропоморфного робота основана на обеспечении кинематики, присущей человеку [2]. Подобие кинематической схемы робота

скелету человека определяет и необходимость реализации соответствующих углов поворота, скоростей и ускорений по аналогичным степеням свободы [3]. В частности, при реализации шагающего типа движения угловые скорости звеньев превышают 3 рад/с, а угловые ускорения достигают 50 рад/с². При этом возникают значительные инерционные нагрузки, которые следует учитывать при определении приведенных усилий.

Общая методика определения приведенных моментов достаточно хорошо разработана [4]. Применительно к механизмам с незамкнутыми кинематическими схемами вопросы проработаны, в частности, К. В. Фроловым и Е. И. Воробьевым [5]. В связи с этим расчет момента, приведенного к вращающемуся ведущему звену рычажного механизма, не вызывает принципиальных трудностей.

¹ Работа выполнена в рамках исследований, проводимых по договору с Фондом перспективных исследований № 5/011/2014—2016, от "23" мая 2014 г. "Разработка технологии создания комбинированной системы управления робототехническими комплексами".

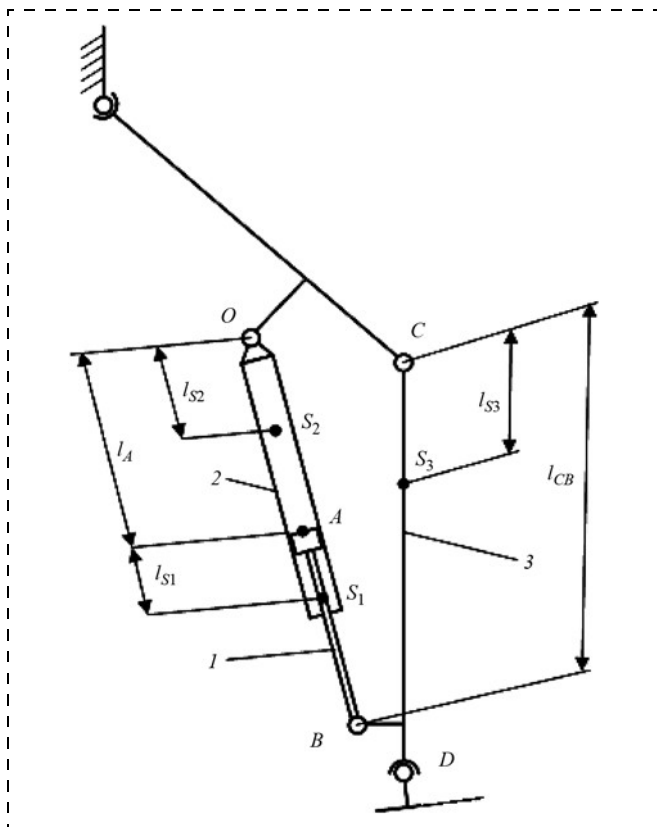


Рис. 1. Кинематическая схема привода аналога коленного сустава антропоморфного робота

Сложнее обстоит ситуация при поступательном движении ведущего звена, что является характерным при использовании гидравлического (пневматического) цилиндра или электропривода с поступательным движением ведущего звена (рис. 1).

На кинематической схеме (рис. 1) представлен кулисный механизм. Отличительной особенностью таких механизмов, для идентификации которых используется термин "механизм с внутренним входом" [6], является тот факт, что ведущее звено связано не со стойкой, а с подвижным звеном. Ведущим звеном является ползун 1, связанный с подвижной направляющей 2 и движущийся относительно нее с известной скоростью V_1 .

Определение модулей скоростей и ускорений точек механизма может быть выполнено аналитическим методом [4]. Для определения силы, приведенной к ползуну, следует знать векторы скоростей и ускорений. Кулисные механизмы с внутренним входом активно используются в строительных и дорожных машинах. Однако до сих пор отсутствует методика расчета векторов скоростей и ускорений характерных точек таких механизмов [7]. Следует отметить, что инерционные нагрузки в строительных машинах меньше технологических. Поэтому отсутствие учета их влияния на приведенную силу не вызывает значительных погрешностей.

В антропоморфных механизмах, экзоскелетах инерционные нагрузки являются преобладающими. В связи с этим для обоснованного расчета нагрузок,

действующих на кулисные механизмы, необходимо иметь методику расчета векторов сил и главных моментов инерции звеньев.

Терминология

Полагаем необходимым продолжить ранее начатую тему единого понимания часто используемых понятий [2].

Следует определиться с применением терминов: число степеней подвижности, число степеней свободы. Разночтения в толковании этих понятий вносят такие источники, как "Теория механизмов и машин. Терминология. Буквенные обозначения. Сборники рекомендуемых терминов. Выпуск 99" и ГОСТ 25686—85 "Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы".

В соответствии с первым из них "число степеней свободы механизма — число независимых вариаций обобщенных координат". Восприятие данного определения применительно к механизмам с замкнутыми кинематическими схемами не вызывает затруднений, так как для них это число определено меньше шести. В действующем ГОСТ 25686—85 (актуализирован 27.10.2010) применительно к манипулятору (автооператору, промышленному роботу) предлагается использовать понятие "число степеней подвижности манипулятора (автооператора, промышленного робота)". Один и тот же параметр имеет два толкования, что не является корректным.

Соблюдая общий подход, предлагаем использовать термин "число степеней свободы" для характеристики кинематических пар, а применительно к механизмам использовать понятие "число степеней подвижности". Следует отметить, что именно так определял это и И. И. Артоболевский [4].

В этом случае не возникает диссонанса при восприятии представления числа независимых обобщенных координат, определяющих пространственное положение антропоморфного манипулятора как семь степеней подвижности, но не семь степеней свободы.

Кинематический анализ кулисного механизма с внутренним входом

Общая методика графического исследования является универсальным инструментом кинематического исследования рычажных механизмов [4]. Не являются исключением и механизмы с внутренним входом, в частности, и кулисный механизм. Для применения этой методики к данному типу механизмов следует ее адаптировать и разработать соответствующий ей алгоритм реализации.

В основе графического метода исследования лежит представление движения любой точки механизма в виде векторной суммы переносного и относительного движений. Последующее определение скоростей и ускорений основывается на соответствующих разложениях движения.

Движение звена 1 (рис. 1) является плоскопараллельным и представляет собой сумму поступательного движения с заданной скоростью $\vec{V}_1$ и вращательного со скоростью $\vec{\omega}_2$ — неизвестной по модулю, но известной по направлению.

Абсолютное движение точки B следует представить в виде векторной суммы:

- переносного движения точки O и движения точки B относительно точки O ;
- переносного движения точки C и движения точки B относительно точки C .

В этом случае абсолютная скорость точки B $\vec{V}_B$ представляет собой суммы:

- скорости переносного движения точки O $\vec{V}_O$ и скорости относительного движения $\vec{V}_{BO}$;
- скорости переносного движения точки C $\vec{V}_C$ и скорости относительного движения $\vec{V}_{BC}$.

$$\begin{cases} \vec{V}_B = \vec{V}_O + \vec{V}_{BO}; \\ \vec{V}_B = \vec{V}_C + \vec{V}_{BC}^{\text{вр}}. \end{cases}$$

В свою очередь, движение точки B относительно точки O есть сумма движений: поступательного со скоростью $\vec{V}_{BO}^{\text{п}} = \vec{V}_1$ и вращательного (совместно со звеном 2) со скоростью $\vec{V}_{BO}^{\text{вр}}$:

$$\begin{cases} \vec{V}_B = \vec{V}_O + \vec{V}_{BO}^{\text{вр}} + \vec{V}_{BO}^{\text{п}}; \\ \vec{V}_B = \vec{V}_C + \vec{V}_{BC}^{\text{вр}}. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) содержит четыре неизвестных: модуль и направление абсолютной скорости точки B , модуль скорости $V_{BO}^{\text{вр}}$ и модуль скорости $V_{BC}^{\text{вр}}$. Два векторных уравнения (1) с четырьмя неизвестными разрешимо в явном виде. Для их решения следует использовать метод плана скоростей.

При построении плана скоростей будем использовать общепринятое правило: концы векторов абсолютных скоростей точек будем обозначать строчными буквами, соответствующими заглавным буквам (точкам) на плане механизма (рис. 1).

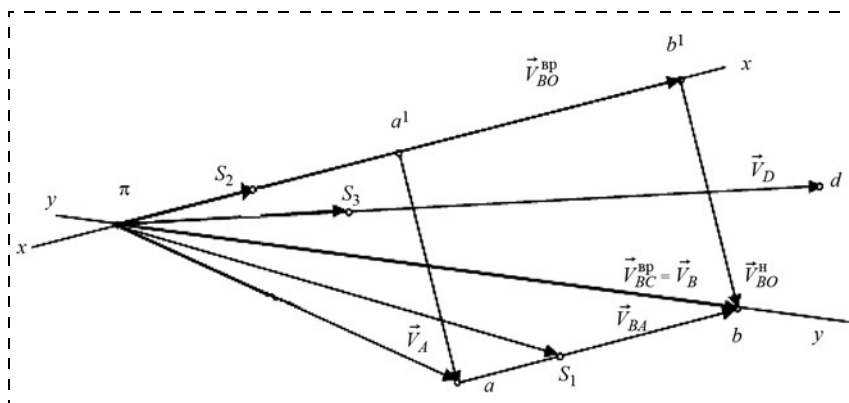


Рис. 2. План скоростей кулисного механизма с внутренним входом

В соответствии с разработанным подходом решение векторных уравнений (1) необходимо вести в иной последовательности.

Построение следует начинать из точки b^1 — конца слагаемого вектора $V_{BO}^{\text{вр}}$. Положение этой точки на плане выбирается произвольно (рис. 2). Из точки b^1 откладывается в выбранном масштабном коэффициенте третий слагаемый вектор первого уравнения $V_{BO}^{\text{п}}$. При построении плана скоростей принято, что $V_{BO}^{\text{п}} = 0,6$ м/с. Точка b , конец вектора $V_{BO}^{\text{вр}}$, есть аналог точки B на плане скоростей.

Второе слагаемое $\vec{V}_{BO}^{\text{вр}}$ первого уравнения системы (1) известно по линии действия — перпендикулярно текущему положению гидроцилиндра. В соответствии с правилом сложения векторов проводим линию действия из точки b^1 (прямая $x - x$).

Точка b отображает собой еще и конец вектора абсолютной скорости точки B . А следовательно в ней и располагается конец второго слагаемого вектора второго уравнения — $\vec{V}_{BC}^{\text{вр}}$. Из точки b проводим линию действия вектора $\vec{V}_{BC}$ (прямая $y - y$).

Поскольку векторные уравнения (1) решаются совместно, то точка пересечения линий $x - x$ и $y - y$ определяет положение полюса π , из которого строятся векторы $\vec{V}_{BO}^{\text{вр}}$ — второй слагаемый вектор первого уравнения и $\vec{V}_{BC}^{\text{вр}}$ — второй слагаемый вектор второго уравнения.

Первые слагаемые векторных уравнений равны нулю. Направления абсолютной скорости B и угловой скорости звеньев 1 и 2 соответствуют действительности.

Скорости центра масс S_3 , звена 3 и точки D определяются из теоремы подобия по известному положению абсолютных скоростей точек B и C .

Для определения скоростей точек S_2 и S_1 необходимо выполнить дополнительные построения, целью которых является определение абсолютных скоростей точки A_1 первого звена и точки A_2 , принадлежащей второму звену.

Скорость точки A_1 может быть определена как сумма линейных скоростей: обусловленного вращением звена 2 с угловой скоростью $\vec{\omega}_2 - \vec{V}_{AO}^{\text{вр}}$ и поступательного движения звена 1 со скоростью $\vec{V}_1$.

$$\vec{V}_{A_1} = \vec{V}_{AO}^{\text{вр}} + \vec{V}_1. \quad (2)$$

Модуль $\vec{\omega}_2$ определяется по соотношению $\vec{\omega}_2 = \vec{V}_{BO}^{\text{вр}} / l_{OB}$.

Соответственно, скорость точки A_2

$$\vec{V}_{AO}^{BP} = \vec{\omega}_2 l_{OA}$$

Из полюса строится первое слагаемое $\vec{V}_{AO}^{BP}$. Из конца первого слагаемого вектора $\vec{V}_{AO}^{BP}$ — точки a_2 — откладываем второе слагаемое V_1 . Получаем точку a — аналог точки A_1 . Аналог точки S_1 , точка s_1 , лежит на прямой ab .

Скорость точки A_2 звена 2 совпадает с линейной скоростью $\vec{V}_{AO}^{BP}$. По подобию определяется положение точки S_2 .

Определение ускорений точек выполняется в соответствии с изложенным ранее представлением движения точки B :

$$\begin{cases} \vec{a}_B = \vec{a}_O + \vec{a}_{BO}^K + \vec{a}_{BO}^n + (\vec{a}_{BO}^n + \vec{a}_{BO}^t); \\ \vec{a}_B = \vec{a}_C + (\vec{a}_{BC}^n + \vec{a}_{BC}^t), \end{cases} \quad (3)$$

где $\vec{a}_{BO}^t$ — тангенсальное ускорение движения точки B вокруг точки O ; $\vec{a}_{BO}^n$ — нормальное ускорение движения точки B вокруг точки O ; $\vec{a}_{BO}^K$ — кориолисово ускорение движения точки B вокруг точки O ; $\vec{a}_{BC}^n$ — нормальное ускорение движения точки B вокруг точки C ; $\vec{a}_{BO}^n$ — ускорение поступательного движения точки B относительно O ; $\vec{a}_{BC}^t$ — тангенсальное ускорение движения точки B вокруг точки C .

Графическое решение системы уравнений (3) не отличается от традиционной последовательности исследования кулисных механизмов и не вызывает затруднений (рис. 3) [4]. Ускорение точек D и S_3 определяется по теореме подобия.

При построении плана ускорений принято, что ускорение $\vec{a}_{BO}^n$ равно 20 м/с^2 . Значения ускорений $\vec{a}_{BO}^n$, $\vec{a}_{BC}^n$, $\vec{a}_{BO}^K$ вычисляются по определенным ранее значениям скоростей.

Определению ускорения точки S_1 предшествует нахождение ускорения точки A_1 :

$$\vec{a}_{A_1} = \vec{a}_{A_1O}^K + \vec{a}_{A_1O}^n + \vec{a}_{A_1O}^n + \vec{a}_{A_1O}^t. \quad (4)$$

На основании графического решения уравнения (4) определяется ускорение точки A_1 . Далее по теореме подобия находится ускорение точки S_1 (рис. 3).

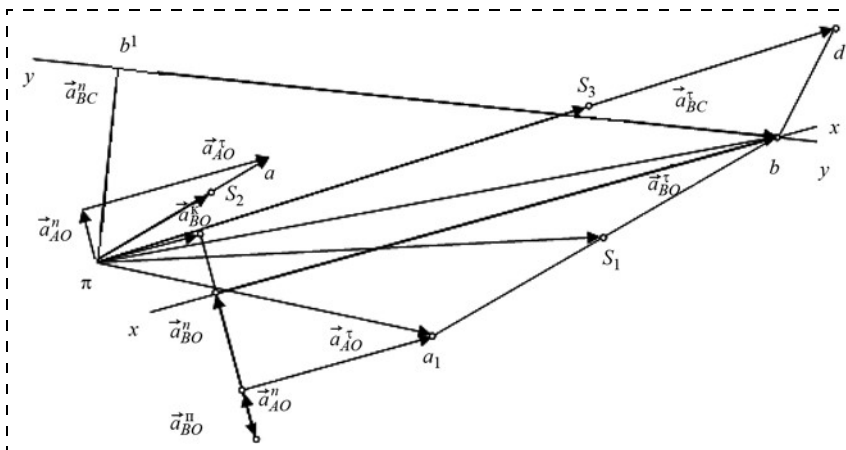


Рис. 3. План ускорений кулисного механизма с внутренним входом

На основании определенных направлений и численных значений абсолютных ускорений определяются силы $\vec{F}_i^{ин}$ и главные моменты инерции звеньев $\vec{M}_i^{ин}$. Расчетная схема нагружения кулисного механизма с внутренним входом представлена на рис. 4. Дальнейшее определение численного значения приведенной к ведущему звену 1 силы $\vec{F}_{пр}$ выполняется по традиционной методике.

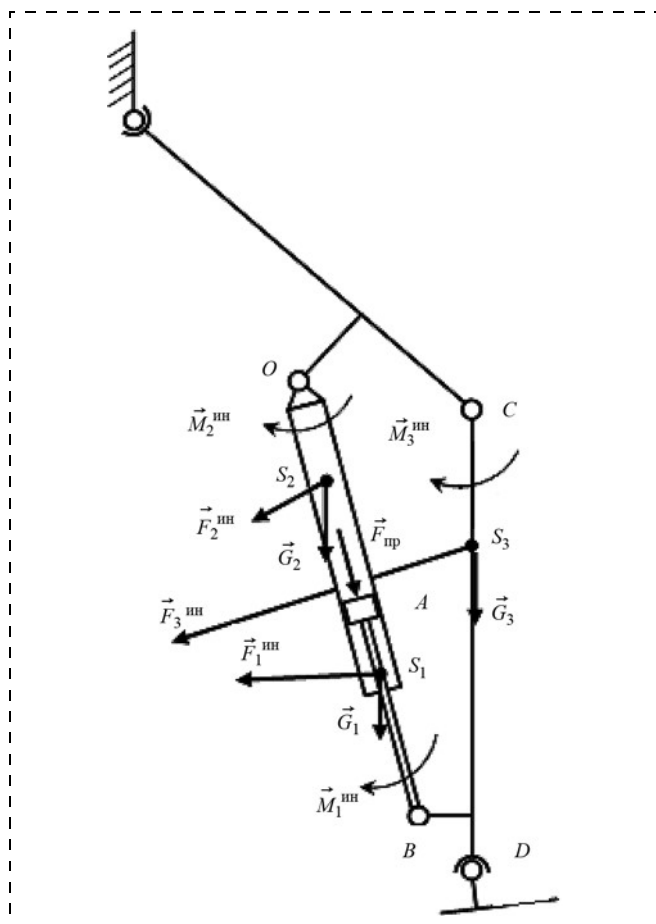


Рис. 4. Схема нагружения кулисного механизма с внутренним входом

Заключение

Изложенный подход к кинематическому анализу кулисного механизма с внутренним входом базируется на классическом представлении движения точек звеньев кинематических пар рычажного механизма. Предложенная последовательность проведения кинематического анализа позволяет отразить особенность кулисного механизма с внутренним входом и определять скорости и ускорения характерных точек. Это является основой определения векторов инерционных нагрузок и проведения силового анализа с привлечением хорошо отработанных типовых методик.

Список литературы

1. Голубев А. Е. Развитие антропоморфной робототехники как драйвер инновационного развития отечественной экономики // Теоретическая экономика. 2014. № 3. URL: <http://www.theoreticaleconomy.info>.

2. Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5. С. 41–47.

3. Чигарев А. В., Борисов А. В. Моделирование управляемого движения двуногого антропоморфного механизма // Российский журнал биомеханики. 2010. Т. 15, № 1 (51). С. 74–88.

4. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин М.: Наука, 1975. 638 с.

5. Воробьев Е. И., Попов С. А., Шевелева Г. И. Кинематика и динамика. Учеб. пособие для вузов: В 3 кн. / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 1. М.: Высш. шк., 1988. 304 с.

6. Семенов Ю. А. Применение машин и механизмов с внутренними входами // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 1. С. 30–49.

7. Ащеулов А. В. Простые для ТММ механизмы с внутренними входами оказываются сложными при проектировании // Теория механизмов и машин. 2003. Т. 1. № 2. С. 76–78.

A. A. Bogdanov, Chief of OJSC "SPA "Android technics" laboratory,
A. S. Gorbaneva, Deputy executive director of OJSC "SPA "Android technics" research,
I. M. Kutlubaev, Research supervisor of OJSC "SPA "Android technics" projects,
professor of Mining machinery and complexes department
of Nosov Magnitogorsk State Technical University, ptmr74@mail.ru,
O. R. Panfilova, Senior teacher of Mining machinery and complexes department
of Nosov Magnitogorsk State Technical University

The Basis of Load Analysis on Coulissee Mechanism, Applied for Anthropomorphic Robots

Anthropomorphic robots development is a rapidly growing technical direction. Modern constructions include advanced achievements in different sciences. At the same time actuators are based on the use of classical motors and movements gearing systems. One of the variant of hydraulic drill usage is a coulissee mechanism with mobile input link.

Analysis of any type of motors is based on reduction of external loading to driving unit. The main kind of loading for anthropomorphic robots is inertial loading which is described by size and direction. In spite of wide usage of coulissee mechanisms with mobile input in architectural and highroad engineering there is no printed information regarding calculation procedures of vector value of inertial loading. If the speedups are low then their values can be neglected as it is insignificant in comparison with technological loading. However it is inadmissible if speedup values are prevail.

In spite of translation of motion specificity in coulissee mechanism with internal input its structural arrangement corresponds to a classic variant and hence it can be researched with classic methods.

The article includes an approach to kinematic research of given type of mechanism using an approved method of plans, speeds and speedups.

Besides, the authors consider it necessary to continue discussion of issues considering the use commonly used robotic terms.

Keywords: coulissee mechanism with inside input, anthropomorphic robot, inertia forces, reduced force

References

1. Golubev A. E. Razvitie antropomorfnoy robototekhniki kak drayver innovatsionnogo razvitiya otechestvennoy ekonomiki. *Teoreticheskaya ekonomika*. 2014. N. 3. URL: <http://www.theoreticaleconomy.info>.

2. Zhidenko I. G., Kutlubaev I. M. Metodika opredeleniya signalov upravleniya antropomorfnyim manipulyatorom. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 5. P. 41–47.

3. Chigarev A. V., Borisov A. V. Modelirovanie upravlyаемого dvizheniya dvunogogo antropomorfного mekhanizma. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*. 2010. Iss. 15, N. 1 (51). P. 74–88.

4. Artobolevskiy I. I. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. M.: Nauka, 1975. 638 p.

5. Vorob'ev E. I., Popov S. A., Sheveleva G. I. *Kinematika i dinamika. Ucheb. posobie dlya vtuzov: V 3 kn. / Pod red. K. V. Frolova, E. I. Vorob'eva*. Kn. 1. M.: Vyssh. shk., 1988. 304 p.

6. Semenov Yu. A. *Primenenie mashin i mekhanizmov s vnutrennimi vkhodami. Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2003. Iss. 1. N. 1. P. 30–49.

7. Ashcheulov A. V. *Prostye dlya TMM mekhanizmy s vnutrennimi vkhodami okazyvayutsya slozhnymi pri proektirovani. Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2003. Iss. 1. N. 2. P. 76–78.