

УДК 519.876.5:62-231

Исследования механизмов различного уровня с помощью MATLAB

А.Д. Перечесова^{1,2}, И.И. Калапышина^{1,2}, К.А. Нуждин^{1,3}

¹ Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Кронверкский пр., д. 49.

² Санкт-Петербургский филиал ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Университетская наб., д. 5, лит. Б.

³ ООО ФАМ-роботикс, 199178, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Малый проспект (В.О.), д. 57, к. 3.

Analysis of various mechanisms using MATLAB

A.D. Perechesova^{1,2}, I.I. Kalapyshina^{1,2}, K.A. Nuzhdin^{1,3}

¹ Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky Prospect, 49, 197101, St. Petersburg, Russian Federation.

² Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, Universitetskaya emb., 5, lit. B, 199034, St. Petersburg, Russian Federation.

³ FAM – robotics, Maly ave. (Vasileostrovsky distrikt), 57, building 3, 199178, St. Petersburg, Russian Federation.



e-mail: perechesova@gmail.com, weir521@yandex.ru, nuzhdink@yandex.ru



На стадии инженерного проектирования при исследовании кинематики и динамики механизмов различного уровня сложности эффективно применять моделирование. Показаны возможности моделирования с помощью библиотеки SimMechanics пакета Simulink среды MATLAB пространственных движений твердотельных машин и механизмов. Приведены два способа решения задачи анализа кинематики двухпараметрической антенны: с помощью библиотеки SimMechanics и с помощью аналитических уравнений. Выполнено сравнение результатов и сделан вывод о состоятельности модели SimMechanics. Рассмотрены модели SimMechanics трибометрической системы и исполнительного механизма устройства для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов.

Ключевые слова: моделирование, SimMechanics, Simulink, MATLAB, двухпараметрическая антенна, трибометрическая система.



The kinematics and dynamics of complex mechanisms can efficiently be studied by modeling at the design stage. This paper demonstrates the application of the SimMechanics library to 3D solid modeling of machines and mechanisms in the MATLAB/Simulink computing environment. Two approaches to the analysis of the kinematics of a two-parameter antenna based on the application of analytical equations and the SimMechanics library are presented. The comparison of the results shows that the SimMechanics model is adequate. The paper also presents the SimMechanics models of a tribometric system and an actuator of the device for manufacturing torsion-bar suspensions of instruments.

Keywords: modeling, SimMechanics, Simulink, MATLAB, two-parameter antenna, tribometric system.

Для исследования кинематики и динамики механизмов различного уровня сложности эффективно применять моделирование с помощью библиотеки SimMechanics пакета Simulink среды MATLAB, предназначенной для модели-

рования пространственных движений твердотельных машин и механизмов на стадии инженерного проектирования. Дифференциальные уравнения записываются в виде структурной модели SimMechanics с использованием блоков,

т. е. механическая система представляется связанной блочной диаграммой. Блоки пакета являются моделями механических устройств, положение которых в пространстве и относительно друг друга может меняться в соответствии с законами механики. Модели SimMechanics изображают физическую структуру механизмов, геометрические и кинематические отношения их компонентов. SimMechanics автоматически преобразует эти структурные изображения во внутреннюю, эквивалентную математическую модель [1].

Библиотека SimMechanics оперирует не с сигналами, а с механическими усилиями. Входы блоков задают «посадочные места» соответствующих механизмов. В соответствии с третьим законом Ньютона, связи между «входами» и «выходами» нельзя рассматривать как односторонние. Эти связи служат для передачи силовых воздействий, которыми обмениваются части механизма или механизмы между собой. В связи с этим для обозначения входов и выходов в SimMechanics стрелки не используются.

Моделирование механических систем и устройств осуществляется на основе законов кинематики, физики и механики. Основной целью моделирования механических систем с помощью библиотеки SimMechanics является выявление характера движения различных частей механизмов и машин (как в плоскости, так и в пространстве) относительно друг друга в той или иной системе координат. При этом учитываются связи между отдельными объектами и различные их движения в соответствии с теми или иными ограничениями.

Библиотека SimMechanics поддерживает средства анимации для демонстрации работы механизмов в динамике. Анимация строится на основе средств Microsoft Audio Video Interleave® (AVI) и ее видеофайлы имеют расширение .avi. Поддерживаются и средства OpenGL, в частности при рендеринге трехмерных объектов и поверхностей. Виртуальные измерительные средства, такие как осциллограф и графопостроитель, поддерживаются в моделях (диаграммах) этого пакета.

Цель работы — исследование способов решения задачи анализа кинематики механических систем различного уровня с помощью библиотеки SimMechanics.

Библиотека SimMechanics предназначена для решения задач управляемого перемещения объектов. В данный момент времени и для данного положения системы нам известно положение и ориентация объекта, которые задаются

в неподвижной системе координат O_a координатами x_a , y_a , z_a и углами Эйлера ϕ_a , Θ_a , φ_a . Через эти параметры устанавливается матрица связи между неподвижной системой O_a и системой координат O_M , связанной с центром M рабочего тела механизма:

$$A_M = M_M(x_a, y_a, z_a, \phi_a, \Theta_a, \varphi_a). \quad (1)$$

Эту связь также можно установить через локальные системы координат механизма

$$\begin{aligned} A_M &= M_{ab}(q_1)M_{bc}(q_2) \dots M_{(n-1)n}(q_n)M_{nM} = \\ &= M_M(q_1, q_2, \dots, q_n). \end{aligned} \quad (2)$$

Приравняв матрицы (2), получим систему уравнений для определения функций положения механизма:

$$q_j = q_j(x_a, y_a, z_a, \phi_a, \Theta_a, \varphi_a), \quad j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

В итоге имеем девять уравнений, но независимых уравнений будет равно n (по количеству обобщенных координат).

Далее рассмотрены два способа решения задачи анализа кинематики двухпараметрической антенны — с помощью библиотеки SimMechanics и с помощью принципов матричных уравнений, приведено сравнение результатов.

Анализ кинематики двухпараметрической антенны. Описываемый электромеханический модуль двухпараметрической антенны [2] входит в состав бортовой радиолокационной станции, работающей в ультракоротковолновом диапазоне.

На кинематической схеме, приведенной на рис. 1, вращение отражателя относительно двух осей OY и OZ осуществляется через жесткую дугу. Дуга связана с отражателем через неподвижное кольцо, на котором установлены опоры скольжения, обеспечивающие подвижность отражателя вокруг оси OY . Для подвижности системы вокруг оси OZ дугу устанавливают в подшипниковый узел, состоящий из четырех пар опор качения.

Передача вращательных движений от двигателей к отражателю осуществляется через шатуны. Каждый шатун представляет собой систему рычагов, соединенных шарниром. Ведущий рычаг совмещен с двигателем и трансформатором в едином корпусе и на одном валу. Объединение этих элементов в единый многофункциональный модуль позволяет исключить из системы паразитные передачи, дополнительные валы. Ведомые рычаги соединены с отражателем при помощи двуосных карданов.

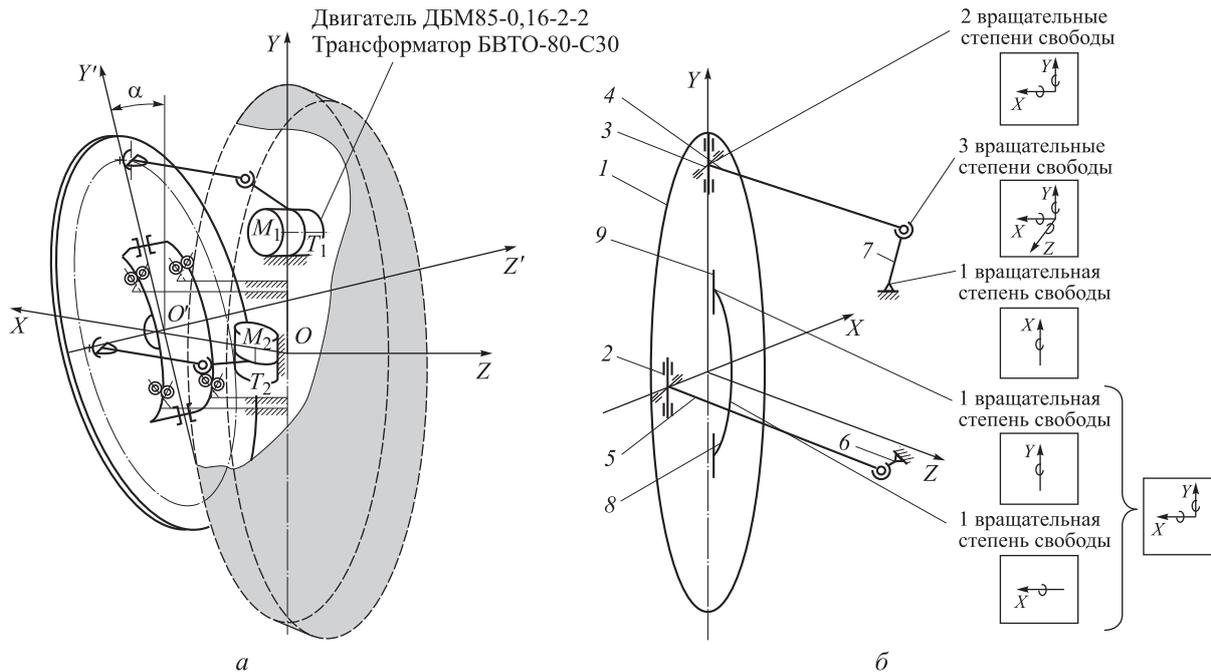


Рис. 1. Двухпараметрическая антенна:

a — функциональная схема; *б* — кинематическая схема; 1 — отражатель; 2, 3 — двусосные карданы; 4, 7 и 5, 6 — система рычагов, соединенных попарно сферическим шарниром (4, 5 — тяги); 8 — опорная дуга; 9 — ось

Движение ведомого звена отражателя 1 (рис. 1, б) включает два вращательных движения вокруг оси X (угломестная ось) и оси Y (азимутальная ось). Движение реализуется за счет двух двусосных карданов 2, 3, имеющих две вращательные степени свободы относительно осей Y и X . Управляющее воздействие от двигателя к отражателю 1 передается через систему рычагов 4, 7 и 5, 6, соединенных попарно сферическим шарниром, который имеет три степени свободы (вращение вокруг осей X , Y и Z). Карданы 3 и 4 обеспечивают степени свободы для движения тяг 4 и 5. Степени свободы для отражателя 1 обеспечиваются относительно оси Y осями 9, а относительно оси X — опорной дугой 8 (на рис. 1 изображена условно). При моделировании центральная развязка была преобразована в один блок с двумя соответствующими степенями свободы. Он был расположен в геометрическом центре отражателя 1.

Как объект механики рассматриваемый прибор представляет собой устройство с параллельной кинематикой, имеющее два однотипных (параллельных) рычажных привода. Устройство составлено из пяти звеньев: карданы (4-го класса), два сферических шарнира (3-го класса) и два плоских шарнира (5-го класса) (см. рис. 1, б), соединенных кинематическими парами, три из которых являются шарнирами. Такая структура механизма обеспечивает две независимые степени свободы. Возвратно-

вращательное движение подводится к вертикально и горизонтально расположенным кривошипам. Структурная модель SimMechanics двухпараметрической антенны показана на рис. 2. Группа блоков 1 задает гравитационные силы, приложенные к центру координат, в котором расположен центр отражателя, а также формируют геометрию отражателя; группа блоков 2 определяет положение тяги в координатной системе отражателя, их соединение с помощью двусосного кардана; группа блоков 3 определяет положение шатуна относительно начала координат и его способ соединения с тягой; группа блоков 4 определяет соединение шатуна с двигателем; группа блоков 5 имитирует работу двигателя.

Анимированная модель SimMechanics двухпараметрической антенны и кадр из видеофайла, демонстрирующий характер движения механической системы, представлены на рис. 3, *a*. Использование в модели (см. рис. 2) блоков Joint Sensor позволяет измерить различные характеристики относительного движения частей механизма (угловые положения его элементов, угловую и линейную скорости, угловое ускорения) и другие параметры.

Ниже приведено исследование движения двухпараметрической антенны аналитическим методом. Для связывания параметров отклонения отражателя Φ_{1x} и Φ_{1y} и соответствующих угловых положений кривошипов Φ_{3x} и Φ_{5y}

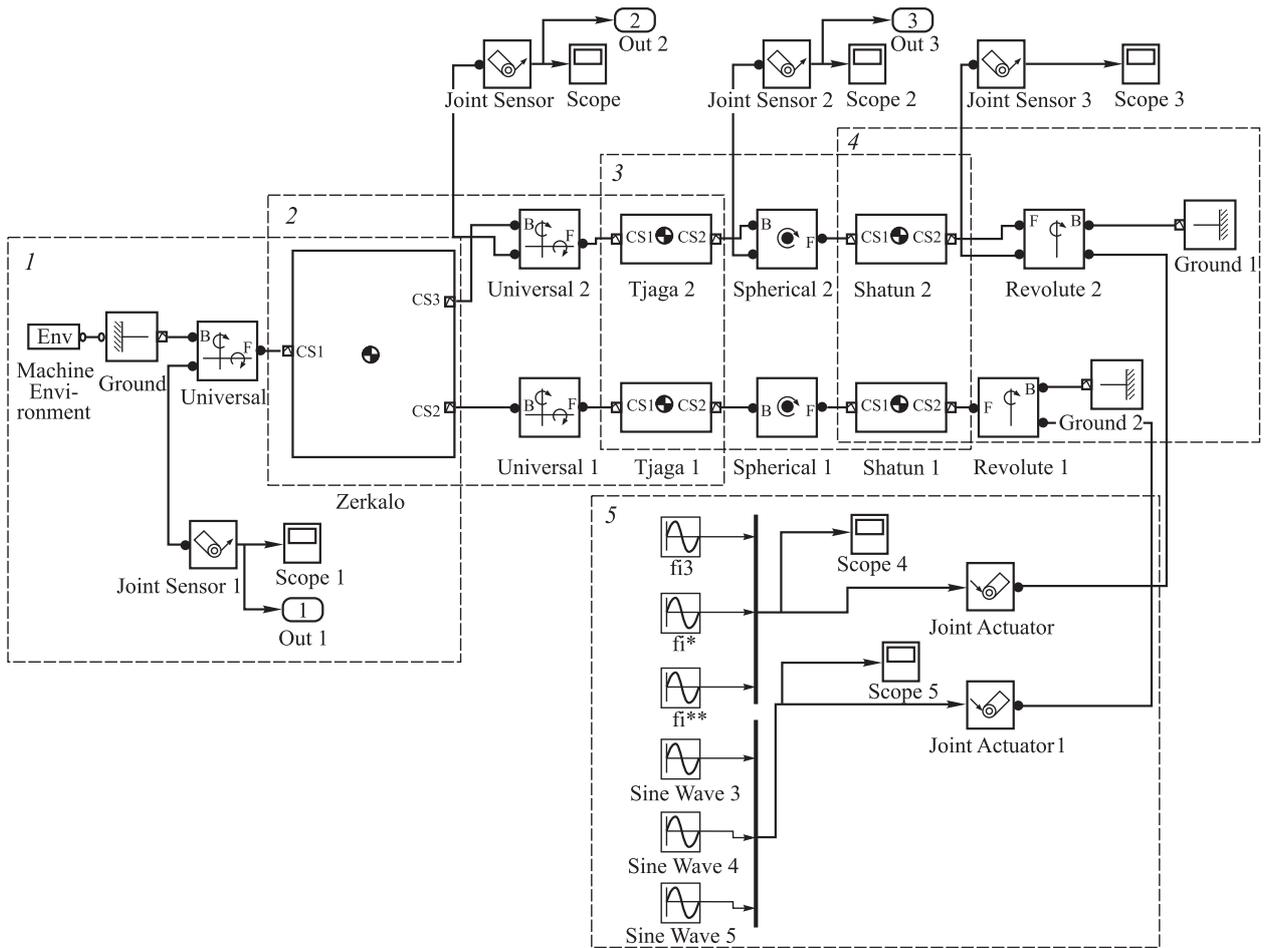


Рис. 2. Структурная модель SimMechanics двухпараметрической антенны:
 1 — группа блоков Machine Environment, Ground, Universal, Zerkalo; 2 — группа блоков Zerkalo, Universal2, Tjaga1;
 3 — группа блоков Tjaga1, Spherical, Shatun1; 4 — группа блоков Shatun1, Revolute, Ground1; 5 — группа блоков
 Joing Actuator, Sine Weve

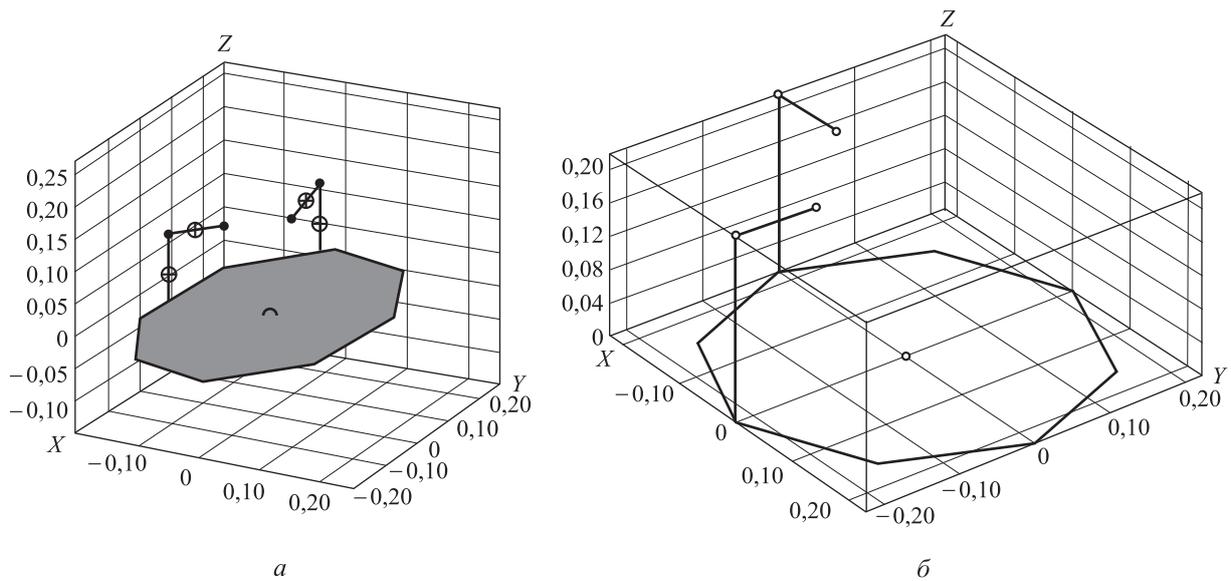


Рис. 3. Результаты работы:
 а — анимированная модель SimMechanics; б — аналитическое решение

(см. рис. 1, б, поз. 7 и 6) необходимо составить непрерывные кинематические связи-зависимости по линиям двух рычажных приводов. Для этой цели используется математический аппарат пошагового матричного координатного перехода от системы, связанной с отражателем, к системам, связанным с кривошипами. Начало неподвижной (глобальной) координатной системы расположено в центре отражателя. Шарниры карданов, соединяющие отражатель с приводными рычагами, расположены на оси Y и X , поэтому в данном случае можно не поворачивать координаты относительно оси Z на указанные шарниры. Всего для связывания координат необходимо произвести по 10 одношаговых переходов по каждой из двух линий привода. При этом каждая линия дает пять переменных величин (все угловые) и пять конструктивно известных (т. е. const) величин, четыре из которых — это поступательные смещения вдоль рычагов и один — угол настройки плоскости монтажа шарнира кардана.

Y -рычаг вызывает вращение вокруг оси X — угломестное положение отражателя:

$$A_x(\varphi_x) A_y(x_5) A_{dy}(-l_3) A_x(x_4) A_y(x_3) A_{dz}(l_2) \times \\ \times A_y(x_2) A_x(x_1) A_z(\varphi_{z4}) A_{dx}(-l_1) r - r_g = 0, \quad (4)$$

где

$$r = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

— радиус-вектор центра отражателя в его системе координат.

X -рычаг вызывает вращение вокруг оси Y — угломестное положение отражателя:

$$A_y(\varphi_y) A_x(x_{11}) A_{dx}(l_5) A_z(x_{10}) A_y(x_9) A_{dz}(l_4) \times \\ \times A_x(x_8) A_y(x_7) A_z(\varphi_{z4}) A_{dx}(-l_1) r - r_g = 0. \quad (6)$$

С помощью уравнений (4), (5) можно найти не более шести неизвестных, следовательно, систему необходимо дополнить уравнениями, связанными с углами поворота отражателя φ_{1x} и φ_{1y} . Для этого используют выражения (4) и (6), дополненные двумя одношаговыми матрицами поворота отражателя $A_x(\varphi_{1x})$ и $A_y(\varphi_{1y})$.

Шесть уравнений проекций радиус-вектора, четыре уравнения связи орта оси Z отражателя и два уравнения для орта оси X (или Y) представляют собой 12 уравнений, обеспечивающих нахождение 12 неизвестных.

Запишем указанные матричные уравнения для орта оси Z :

$$\left[A_x(-x_6) A_y(-x_{12}) A_x(\varphi_x) A_y(x_5) A_x(x_4) \times \right. \\ \left. \times A_y(x_3) A_y(x_2) A_x(x_1) A_z(\varphi_{z2}) - I \right] e_z = 0; \quad (7)$$

$$\left[A_x(-x_6) A_y(-x_{12}) A_y(\varphi_y) A_x(x_{11}) A_z(x_{10}) \times \right. \\ \left. \times A_y(x_9) A_x(x_8) A_y(x_7) A_z(\varphi_{z4}) - I \right] e_z = 0, \quad (8)$$

где I — единичная матрица 4×4 ;

$$e_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

— орт оси Z в системе координат отражателя.

Два матричных уравнения для орта оси X и Y отличаются от (7) и (8) только ортом e_x (вместо e_z).

В уравнениях (4)–(9) заданными являются угловые положения приводных кривошипов φ_{x3} и φ_{y5} , а искомыми x_6 и x_{12} — угловые положения тарелки. Буквы « x », « y », « z » в индексе матриц означают ось поворота системы координат; а буква « d » — поступательное смещение координат; l_n — длина n -го рычажного звена; r_v , r_g — радиус-вектор центра отражателя в системе вертикального и горизонтального кривошипа.

Решение системы из 12 уравнений определит положение каждого элемента двухпараметрической антенны. Нулевое положение механической системы показано на рис. 3, б.

Далее приведено сравнение математической и структурной модели SimMechanics. Основными параметрами для сравнения работы моделей было принято положение отражателя относительно осей X и Y и входной угол отклонения шатунов. Угловые положения задаются равными для каждого шатуна от 0 до 40° .

На малых углах отклонения шатунов при наличии двух степеней свободы происходит совмещение кривых, характеризующих отклонения отражателя по осям X и Y (рис. 4, а). В структурной модели SimMechanics расхождение углов отклонения отражателя интенсивно нарастает после 17° . Тот же результат дает математическая модель (рис. 4, б). Максимальное расхождение между средними значениями данных с двух моделей (рис. 4, в) $\Delta_{\max} \approx 31'$. Расхождение данных двух моделей появляется и монотонно возрастает при отклонении шатунов более чем на 25° .

На основании полученных результатов можно сделать вывод о соответствии аналитического решения и имитационной модели, созданной при помощи библиотеки SimMechanics. Максимальное расхождение результатов составило



Рис. 4. Результаты сравнения работы структурной и математической модели:

а — структурная модель; б — аналитическая модель; в — средние значения положений структурной и математической моделей; 1 — положение отражателя по оси X; 2 — положение отражателя по оси Y; 3 — средние значения положений отражателя структурной модели; 4 — средние значения положений отражателя аналитической модели

$\Delta_{\max} \approx 31'$ в диапазоне положений шатунов $0..40^\circ$ при интенсивно нарастающем расхождении после 25° на шатунах. Следует отметить, что положение шатуна, равное 15° , является предельным для двухпараметрической антенны по техническому заданию.

Моделирование трибометрической системы с помощью библиотеки SimMechanics. Кинематическая схема трибометрической системы, аналогичной трибометрической установке «Трибал-2», созданной на кафедре «Мехатроника» НИУ ИТМО представлена на рис. 5. Установка предназначена для исследования и идентификации процессов трения, происходящих при возвратно-поступательном движении испытываемых образцов относительно друг друга.

Трибометрическая система состоит из основания 1, двух платформ: нижней 5 и верхней 7, способных совершать возвратно-поступательное движение вдоль направляющих 2 и 6 соот-

ветственно. С помощью направляющей 9 верхняя платформа может двигаться в вертикальном направлении. На платформу действуют усилия со стороны пружин 8, закрепленных на направляющей 2, а также вертикальное усилие (P). Нижняя платформа приводится в движение с помощью двигателя 3 через кривошипно-шатунный механизм 4 и передает движение верхней платформе за счет силы трения. Под воздействием силы упругости пружин верхняя платформа стремится вернуться в первоначальное положение и таким образом совершает колебательные движения. Положения платформ определяются с помощью датчиков линейных перемещений.

Структурная модель описанной трибометрической системы, построенная с помощью блоков библиотеки SimMechanics, приведена на рис. 6. Группа блоков 1 представляет собой механическую часть устройства: платформы, пружина, соединенные с помощью кинематических пар. Нижняя платформа управляется двигателем с заданными параметрами (третья группа). Внешнее усилие в модели принимается постоянной величиной, задается массой верхней платформы. Блок пружины и демфера моделирует упруго-диссипативные силы в зависимости от заданных коэффициентов упругости и демпфирования.

Группа блоков 2 моделирует трибологическое воздействие между платформами. Сила трения, зависящая от скорости относительного движения платформ, задается блоком Joint Stiction Actuator (привод звена с эффектом «слипания»). Группа блоков 3 имитирует идеальный двигатель. Результаты движения платформ снимает система группы блоков 4. Более подробно данная модель трения рассмотрена в [3].

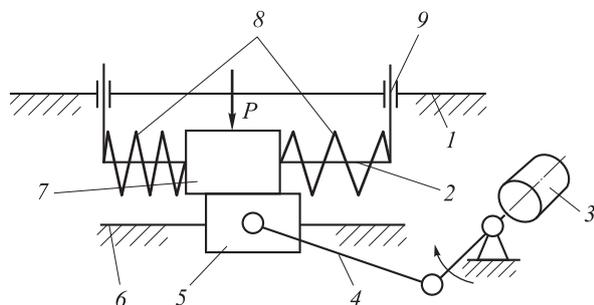


Рис. 5. Кинематическая схема трибометрической системы:

1 — основание; 2 — направляющая верхней платформы; 3 — двигатель; 4 — кривошипно-шатунный механизм; 5, 7 — нижняя и верхняя платформы соответственно; 6 — направляющая нижней платформы; 8 — пружины; 9 — вертикальная направляющая

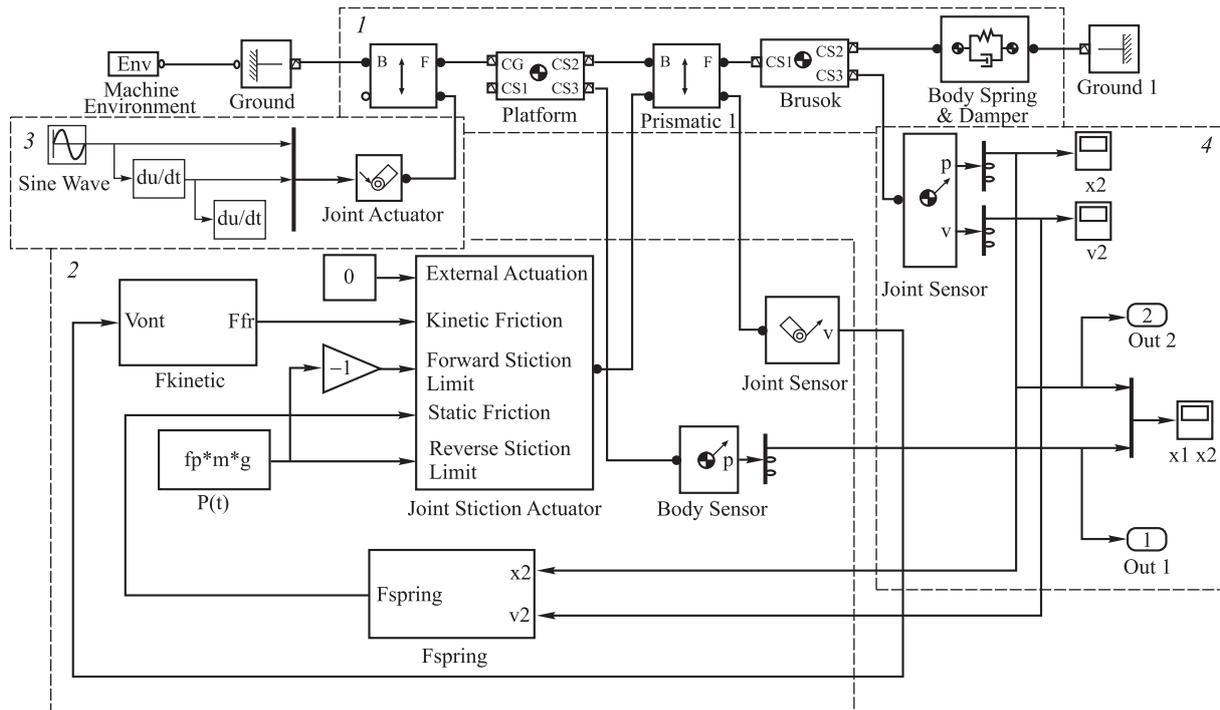


Рис. 6. Структурная модель SimMechanics трибометрической системы:
1–4 — группы блоков

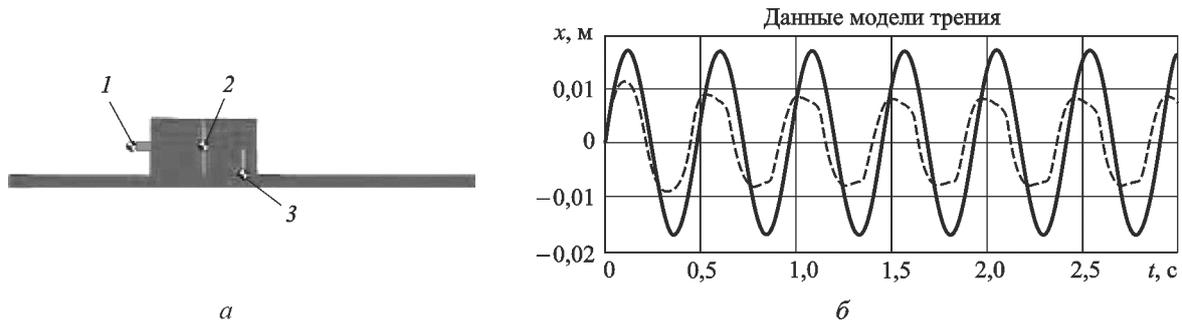


Рис. 7. Результаты моделирования:

a — анимированная модель SimMechanics (1 — точка закрепления пружины; 2 — центр образца на верхней платформе; 3 — точка нижней платформы); *b* — кривая движения платформ (— — нижняя платформа; --- — верхняя платформа)

Для построения модели использовались зависимости релаксационных фрикционных автоколебаний, приведенные в [4]. При моделировании системы применялись стандартные блоки пакета Simulink/SimMechanics и учитывались такие факторы, как различие коэффициентов трения для покоя и скольжения, зависимость коэффициента трения от скорости относительного движения, коэффициенты упругости и демпфирования для упругой системы. Результаты расчетов моделирования приведены на рис. 7.

Полученные кривые показывают работу трибометрической системы. Под действием силы трения верхняя платформа, лежащая на нижней, вовлекается в совместное движение.

Пружина, прикрепленная к верхней платформе, при превышении силы упругости над силой трения покоя смещает верхнюю платформу относительно нижней. Следует отметить, что результаты работы модели трения при наличии фрикционных автоколебаний совпадают с аналитическим решением, приведенным в [5]. Рассмотренная модель трения может быть использована при исследовании динамики различных механических систем, где важно учитывать влияние трения. Исследования динамических процессов таких систем позволяют вносить корректировку в их работу и выбирать наиболее эффективные параметры, что улучшает эффективность их использования.

Анализ кинематики и динамики исполнительного механизма устройства для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов. В настоящее время при изготовлении приборов используются современные материалы. Так, в Санкт-Петербургском филиале ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии

наук (СПбФ ИЗМИРАН) упругий торсионный подвес магниточувствительного элемента магнитостатического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1, изготавливают из арамидных нитей [6]. Торсион (рис. 8, а) — спирально-анизотропный стержень, выполненный в виде косы, сплетенной из арамидных волокон. Плотность плетения 7 узлов/мм. Огибающая поперечного сечения

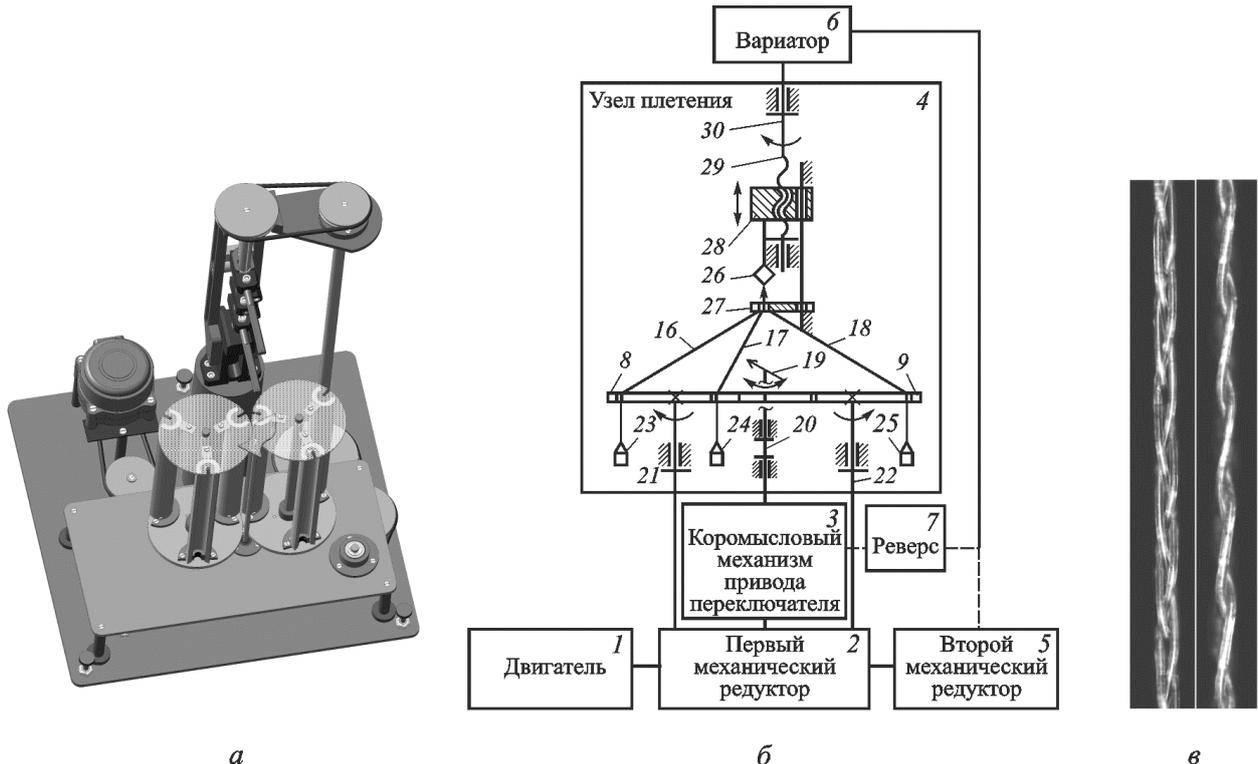


Рис. 8. 3D-модель устройства УИСАТ (а), функциональная схема устройства УИСАТ (б) и фотографии плетеных торсионных подвесов, изготовленных при помощи устройства УИСАТ (в). Снимки получены с помощью микроскопа Meiji Techno IM7200, объектив $\times 20$, увеличение 160

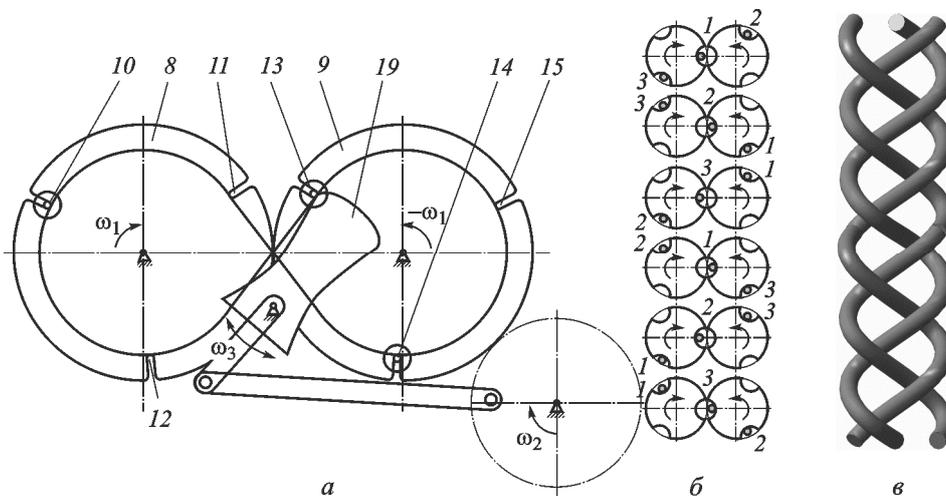


Рис. 9. Исполнительный механизм устройства УИСАТ (а), схема одного цикла работы (б) и модель торсиона, получаемого при помощи исполнительного механизма устройства УИСАТ (в)

упругого торсионного подвеса представляет собой эллипс с большой осью, равной 0,046 мм, и малой осью 0,033 мм; общая длина подвеса 100 мм.

Торсионный подвес изготавливается с помощью устройства для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов (ЧЭ) приборов (УИСАТ) из трех прядей. В качестве материала для плетения используется особый современный материал — филаменты синтетических высокомодульных нитей (относятся к классу параарамидных волокон) с диаметром 0,016 мм и длиной 400 мм [7, 8].

3D-модель и упрощенная схема УИСАТ приведена на рис. 8.

Схема исполнительного механизма, схема одного цикла работы устройства и внешний вид получаемого торсионного подвеса, представлена на рис. 9.

Принцип действия устройства состоит в следующем: осуществляют регулировку (настройку) в соответствии с заданными характеристиками торсионного подвеса. Далее захватом 26 фиксируют начала прядей 16, 17 и 18, затем пряди пропускают через отверстие направляющей 27 (см. рис. 8, б). Три сплетаемые

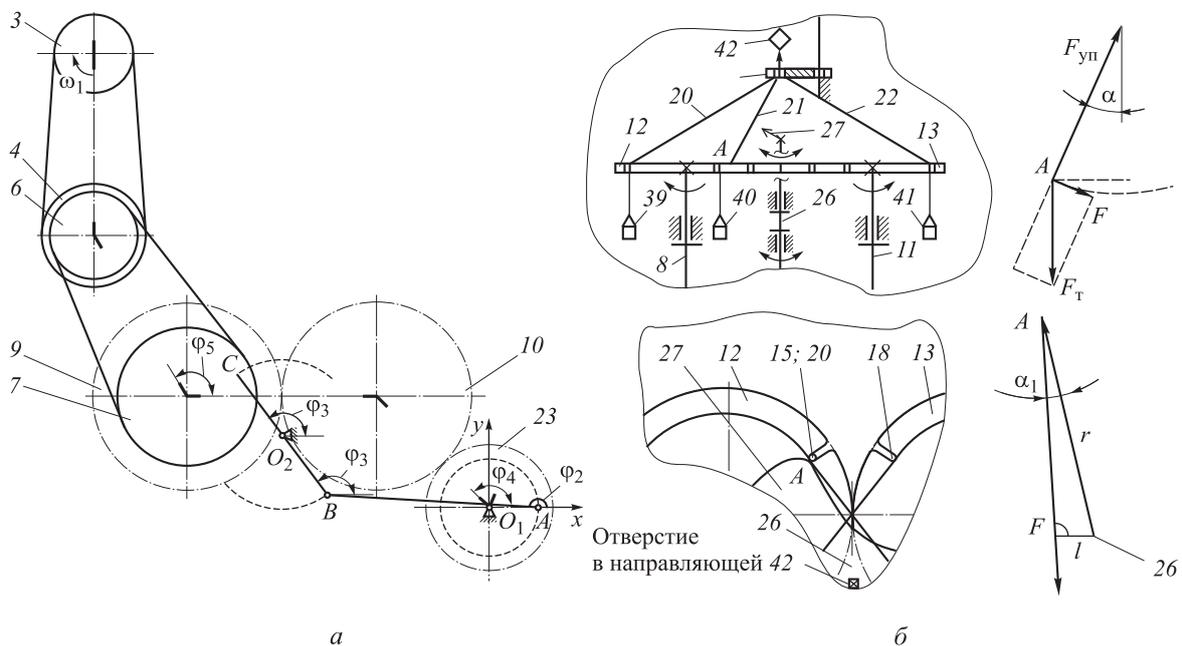


Рис. 10. Схема исполнительного механизма плетения (вид сверху) (а); расчет нагрузки, приложенной к переключателю (б):

3, 4, 6, 7 — шкивы; 9, 10, 23 — зубчатые колеса; O_1A — кривошип; AB — шатун 24; BO_2 — коромысло 25; O_2C — переключатель 27; φ_1 – φ_5 — углы поворота звеньев (для расчета углов поворота звеньев начало координат выбрано в точке O_1)

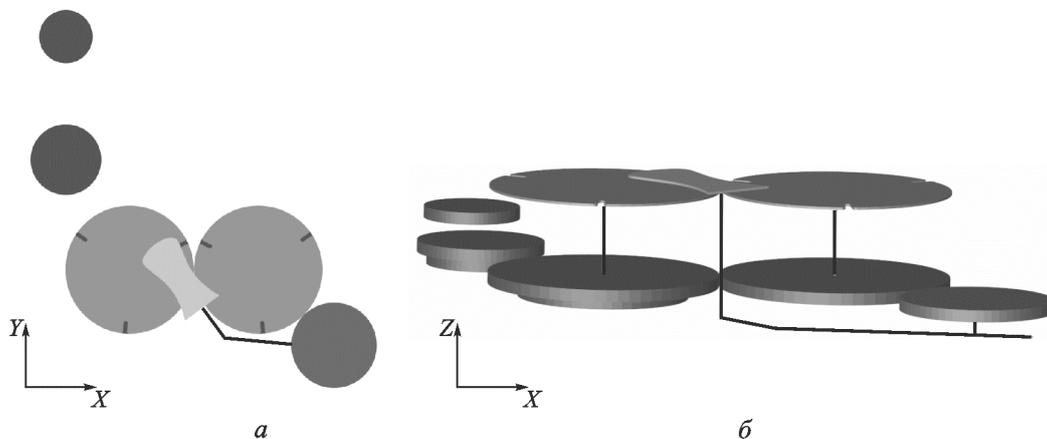


Рис 11. Анимированная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения вид сверху (плоскость XY) (а) и ее вид (б)

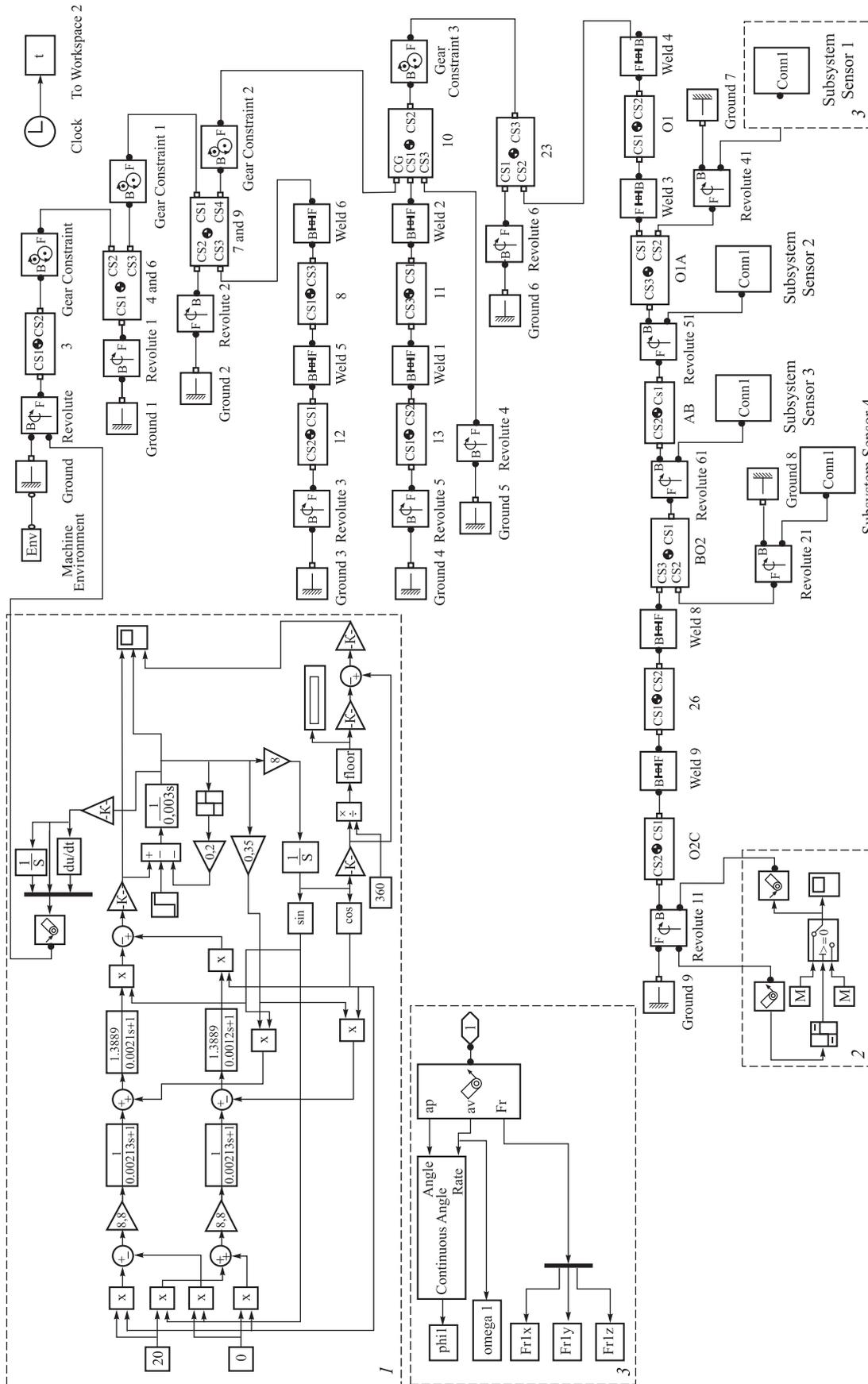


Рис. 12. Структурная модель SimMechanics исполнительного механизма полетения с синхронным двигателем:

1 — синхронный двигатель; 2 — нагрузка, приложенная к переключателю O2C; 3 — подсистема Sensor 1 (датчик 1); блоки подсистем Sensor 1–4 аналогичны блокам подсистемы Sensor 1 (датчик 1)

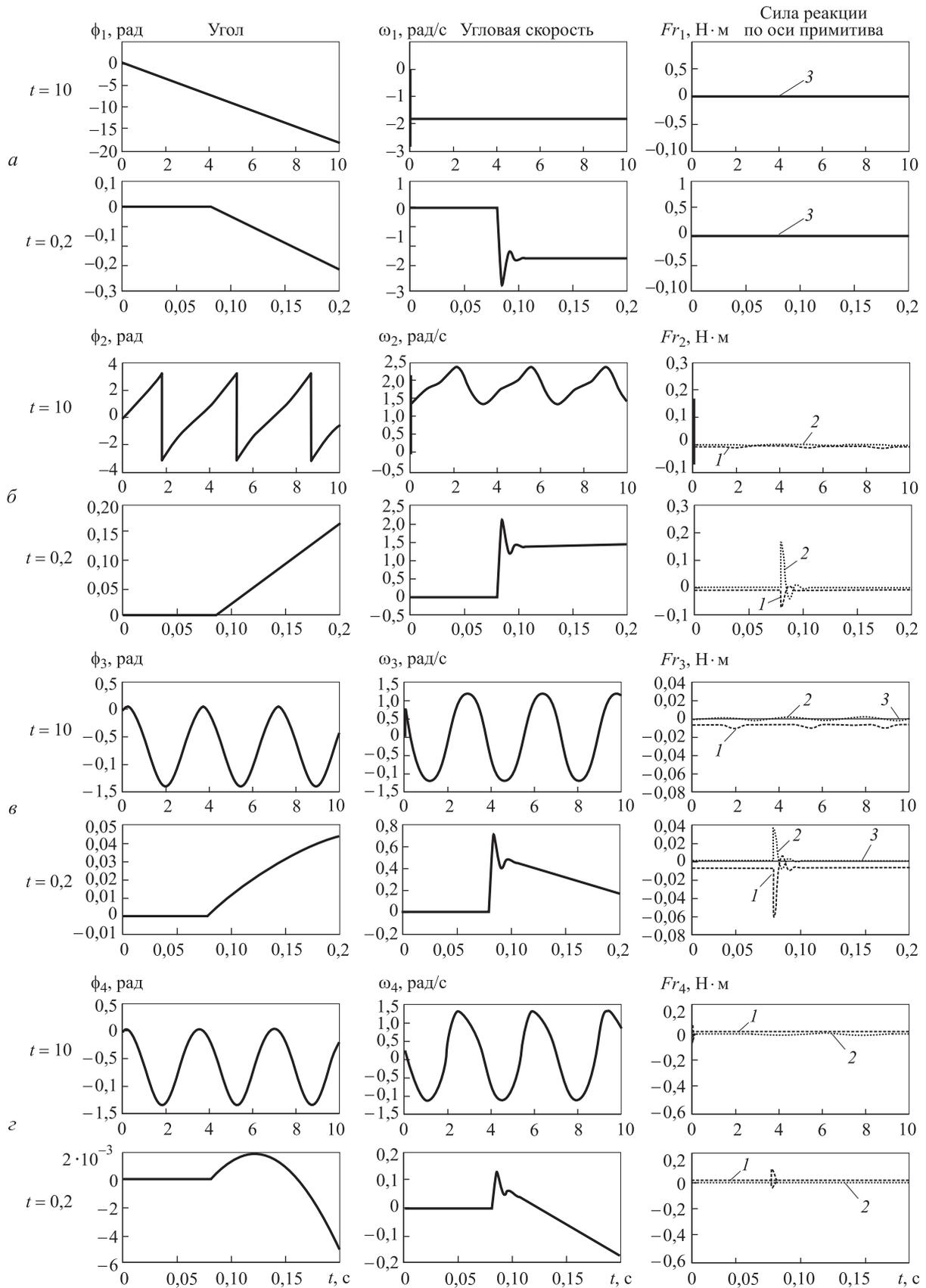


Рис. 13. Результаты моделирования:

a — датчик 1 (кривошип O_1A); *б* — датчик 2 (шатун AB) исполнительного механизма; *в* — датчик 3 (коромысло BO_2); *г* — датчик 4 (переключатель O_2C) исполнительного механизма; 1 — Fr_{1x} ; 2 — Fr_{1y} ; 3 — Fr_{1z}

пряжи 16, 17 и 18 распределяют в пазах двух горизонтальных дисков 8 и 9 (две пряжи в пазах одного диска, одна — в пазе другого). Обязательное условие размещения прядей состоит в том, что один из парных пазов должен быть свободен. Под парными пазами подразумеваются пазы, работающие одновременно во время перемещения пряди из паза одного диска в паз противоположного диска. Далее, осуществляя механизм подачи, концы прядей 16, 17 и 18 фиксируют грузами 23, 24 и 25. Осуществляют включение. Привод 1 при помощи элементов первого механического редуктора 2 через валы 21 и 22 придает дискам 8 и 9 встречное вращение. Пряди 16, 17 и 18 перемещаются в свободные пазы противоположного диска при помощи переключателя 19, совершающего возвратно-вращательные движения относительно оси 20 согласованно с дисками 8 и 9, благодаря коромысловому механизму привода переключателя 3. Например, в данном случае прядь 17 из паза 13 диска 9 перемещается в паз 11 диска 8, прядь 16 из паза 10 диска 8 перемещается в паз 15 диска 9, прядь 18 из паза 14 диска 9 перемещается в паз 12 диска 8. И этот процесс продолжают до верхнего (конечного) положения гайки 28.

После завершения плетения готовое изделие извлекают из устройства путем размыкания захвата и включают реверс 7 для возвращения механизма сбора в исходное положение (начальное). В данном режиме устройство работает вхолостую, осуществляя возврат механизма сбора в исходное положение.

Механизм позволяет задавать требуемые характеристики упругого торсионного подвеса (плотности плетения, модуля кручения, прочности и др.).

Схема исполнительного механизма плетения и расчет нагрузки, приложенной к переключателю, представлены на рис. 10 [9, 10].

Для задания в SimMechanics первоначально положения звеньев механизма были рассчитаны углы φ_1 и φ_2 . Начало координат выбрано в точке O_1 . Расчет нагрузки, приложенной к переключателю (момент силы), поясняет рис. 10, б. Данный расчет был произведен при условии, что нить нерастяжима;

$$|\mathbf{F}| = mg \sin \alpha; \quad \mathbf{M} = \mathbf{F} \times \mathbf{r}; \\ M = Fl = mg \sin \alpha \cdot r \sin \alpha_1.$$

Для описания электромагнитных процессов в вентильном двигателе на основе синхронной машины с неявнополюсным ротором была использована математическая модель.

В механической части модели O_1 — звено для демонстрации кривошипа O_1A ; длины звеньев 8 и 11, ось 26 выбраны для демонстрации; длина звеньев равна расстоянию между двумя шарнирами. Масса звеньев рассчитана с помощью модели детали в программе SolidWorks (анализ массовых характеристик). Для возможности моделирования в SimMechanics шкивы заменяются эквивалентными зубчатыми колесами (под эквивалентным понимается зубчатое колесо, обеспечивающее необходимую угловую скорость на валу).

Для оценки моделирования работы исполнительного механизма плетения используется рассчитанное классическим методом значение угловой скорости на выходном валу первого механического редуктора $2\omega(V) = 1,803$ рад/с.

Для демонстрации модели SimMechanics используются упрощенные 3D-модели некоторых звеньев (шкивы 3, 4, 6, 7; зубчатые колеса 9, 10, 23; диски 12 и 13; переключатель 27). Модели импортированы из SolidWorks в формате *.stl.

Анимированная модель SimMechanics исполнительного механизма плетения представлена на рис. 11.

Структурная модель SimMechanics (Simulink / MatLab) приведены на рис. 12.

С помощью модели получены основные законы изменения во времени угла, угловой скорости, силы реакции относительно примитива (по осям X , Y , Z). Результаты моделирования исполнительного механизма плетения с синхронным двигателем представлены на рис. 13. Значение угловой скорости, поступившей с датчика 1 (кривошип O_1A) модели равно 1,803 рад/с, что соответствует рассчитанному значению угловой скорости на валу 18 (кривошип O_1A), следовательно, моделирование выполнено верно. В течении короткого промежутка времени (0,11 с) наблюдается переходной процесс. В пределах прикладываемых нагрузок механическая система работает стабильно.

Выводы

1. Представлены два способа решения задачи анализа кинематики двухпараметрической антенны: с помощью библиотеки SimMechanics (MATLAB) и аналитических уравнений. Из анализа полученных результатов следует, что модель SimMechanics механизма отвечает предъявляемым требованиям к качеству построения имитационной модели.

2. Приведены модели SimMechanics трибометрической системы и исполнительного меха-

низма устройства для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов.

3. Моделирование в среде MATLAB может успешно применяться при проектировании механических систем.

Литература

- [1] Мусалимов В.М., Заморуев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. *Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics)*. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2013. 114 с.
- [2] Заморуев Г.Б., Калапышина И.И. Кинематическое управление двухпараметрической сканирующей антенной. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2012, № 2(78), с. 78–83.
- [3] Нуждин К.А. Моделирование релаксационных фрикционных колебаний в среде SIMMECHANICS. *ИПМаш РАН. Одиннадцатая сессия междунар. науч. шк. Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов*. Санкт-Петербург, Art-Xpress, 2013, с. 323–330.
- [4] Чичинадзе А.В., ред. *Трение, износ и смазка*. Москва, Машиностроение, 2003. 576 с.
- [5] Нуждин К.А. Разработка трибометрической системы с обратной связью. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2011, № 4(2), с. 253–254.
- [6] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 621–624, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.621.
- [7] Kopytenko, Y.A., Sergushin, P.A., Petrishchev, M.S., Levanenko, V.A., Perechesova, A.D. Device for Manufacturing Torsion Bars with Helical Anisotropy UISAT-1. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 625–628, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.625.
- [8] Копытенко Ю.А., Петрищев М.С., Сергушин П.А., Леваненко В.А., Перечесова А.Д. *Устройство для изготовления торсионных подвесов чувствительных элементов приборов*. Пат. РФ № 2519888, МПК D07B3/00, 2012.
- [9] Перечесова А.Д. *Анализ и синтез механизма для плетения торсионных подвесов приборов*. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 125 с.
- [10] Perechesova A. Calculation of Elastic Constants of the Torsion Bars with Helical Anisotropy using the methods of Optimization theory. *Proceedings of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. Beijing (China), 2012. SM04–050.

References

- [1] Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I., Perechesova A.D., Nuzhdin K.A. *Modelirovanie mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink/SimMechanics)* [Modeling of mechatronic systems in the environment of MATLAB (Simulink / SimMechanics)]. Sankt-Peterburg, NIU ITMO publ., 2013. 114 p.
- [2] Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I. Kinematicheskoe upravlenie dvukhparametricheskoi skaniruiushchei antennoi [Kinematic control of two-parametrical scanning aerial]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2012, no. 2(78), pp. 78–83.
- [3] Nuzhdin K.A. Modelirovanie relaksatsionnykh friktsionnykh kolebanii v srede SIMMECHANICS [Simulation of relaxation oscillations in a medium friction SIMMECHANICS]. *IPMash RAN. Odnadtsataia sessiia mezhdunarodnoi nauchnoi shkoly «Fundamental'nye i prikladnye problemy nadezhnosti i diagnostiki mashin i mekhanizmov»* [IPMash RAS. The eleventh session of the International Scientific School «Fundamental and applied problems of reliability and diagnostics of machines and mechanisms»]. Sankt-Peterburg, Art-Xpress publ., 2013, pp. 323–330.
- [4] *Trenie, iznos i smazka* [Friction, wear and lubrication]. Ed. Chichinadze A.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 576 p.

- [5] Nuzhdin K.A. Razrabotka tribometricheskoi sistemy s obratnoi svyaz'iu [Development of the tribometric system with feedback] *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod]. 2011, no. 4(2), pp. 253–254.
- [6] Kopytenko Y.A., Sergushin P.A., Petrishchev M.S., Levanenko V.A., Zaytsev D.B. Torsion magnetic variometer with kevlar-hanger-based sensor. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 621–624. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.621.
- [7] Kopytenko, Y.A., Sergushin, P.A., Petrishchev, M.S., Levanenko, V.A., Perechesova, A.D. Device for Manufacturing Torsion Bars with Helical Anisotropy UISAT-1. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 625–628. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.625.
- [8] Kopytenko Iu.A., Petrishchev M.S., Sergushin P.A., Levanenko V.A., Perechesova A.D. *Ustroistvo dlia izgotovleniia torsionnykh podvesov chuvstvitel'nykh elementov priborov* [The apparatus for manufacturing the torsion suspensions feelers devices]. Patent RF no. 2519888, МПК D07B3/00, 2012.
- [9] Perechesova A.D. *Analiz i sintez mekhanizma dlia pleteniia torsionnykh podvesov priborov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of mechanism for weaving torsion suspensions devices. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, ITMO University publ., 2012. 125 p.
- [10] Perechesova A. Calculation of Elastic Constants of the Torsion Bars with Helical Anisotropy using the methods of Optimization theory. *Proceedings of the 23rd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Beijing, China, 2012, SM04–050.

Статья поступила в редакцию 18.09.2014

Информация об авторах

ПЕРЕЧЕСОВА Анна Дмитриевна (Санкт-Петербург) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроники». Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Университетская наб., д. 5, литера Б, e-mail: perechesova@gmail.com).

КАЛАПЫШИНА Ирина Ивановна (Санкт-Петербург) — аспирант кафедры «Мехатроники». Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; ведущий инженер Санкт-Петербургского филиала ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Университетская наб., д. 5, литера Б, e-mail: weir521@yandex.ru).

НУЗДИН Константин Андреевич (Санкт-Петербург) — аспирант кафедры «Мехатроники». Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; начальник конструкторского отдела ООО ФАМ-роботикс (199178, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Малый проспект (В.О.), д. 57, корп. 3. e-mail: nuzhdink@yandex.ru).

Information about the authors

PERECHESOVA Anna Dmitrievna (St. Petersburg) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Mechatronics» Department. Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Researcher of Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial (Universitetskaya emb., 5, lit. B, 199034, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: perechesova@gmail.com).

KALAPYSHINA Irina Ivanovna (St. Petersburg) — Post-Graduate of «Mechatronics» Department. Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Leading Engineer of Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial (Universitetskaya emb., 5, lit. B, 199034, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: weir521@yandex.ru).

NUZHDIN Konstantin Andreevich (St. Petersburg) — Post-Graduate of «Mechatronics» Department. Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Head of Development Department of FAM-robotics (Maly ave. (Vasileostrovsky distrikt), 57, building 3, 199178, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: nuzhdink@yandex.ru).