

УДК 687.053

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА ПУАНСОНА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ШВЕЙНОЙ МАШИНЫ****Кузнецов К.Ю., Марковец А.В., Мазин Л.С., Лескова О.К.***Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, e-mail: mash@sutd.ru*

Статья посвящена исследованию динамики механизмов привода пуансона машин ультразвуковой сварки материалов. Задача рассматривается на примере машины с последовательным прерывистым выполнением шва. Привод пуансона включает шестизвенный рычажный механизм, выходное звено которого совершает поступательные движения относительно пуансонодержателя и имеет выстой в крайнем нижнем положении. Для исследования колебаний пуансона относительно свариваемых материалов предложена динамическая и соответствующая ей математическая модель. В динамической модели пуансон вместе с пуансонодержателем рассматривается как абсолютно твердое тело, перемещающееся по вертикали в результате кинематического внешнего воздействия, передаваемого от шестизвенного рычажного привода. Учитываются упруго-диссипативные характеристики двух замыкающих пружин, одна из которых установлена между пуансонодержателем и корпусом машины, а другая – между пуансонодержателем и выходным звеном рычажного механизма. Свариваемые материалы в динамической модели представлены в виде упруго-диссипативного элемента и элемента типа «односторонняя неустойчивая связь». Математическая модель представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, которое является существенно нелинейным из-за неустойчивого характера связи пуансона с материалами. Для численного решения математической модели разработана программа, которая позволяет анализировать влияние конструктивных параметров привода на усилие прижима пуансоном материалов в процессе сварки. Разработанная динамическая и математическая модель привода пуансона может быть использована для определения рациональных режимов работы и совершенствования оборудования ультразвуковой сварки материалов в швейной промышленности.

**Ключевые слова:** ультразвуковая швейная машина, шестизвенный рычажный механизм, привод пуансона, функция перемещения

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PUNCHEON DRIVE MECHANISM OF AN ULTRASONIC SEWING MACHINE****Kuznetsov K.Yu., Markovets A.V., Mazin L.S., Leskova O.K.***Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, e-mail: mash@sutd.ru*

The article is dedicated to the study of the dynamics of the puncheon drive mechanisms of ultrasonic welding machines. The task is considered on the example of a machine with sequential intermittent execution of a seam. The puncheon drive includes a six-bar linkage the output link of which makes translational movements relative to the puncheon holder and has a dwell in the lowest position. Dynamic and the corresponding mathematical model are suggested to study the oscillation of the puncheon relative to the welded materials. In the dynamic model the puncheon together with the puncheon holder are considered as a perfectly rigid body moving vertically as a result of a kinematic external influence transmitted from a six-bar linkage drive. The elastic-dissipative characteristics of the two closing springs are taken into account, one of them is installed between the puncheon holder and the machine body and the other one is situated between the puncheon holder and the output link of the linkage mechanism. Weldable materials in the dynamic model are presented in the form of an elastic-dissipative element and an element of the type «unilateral constraint». The mathematical model is an ordinary differential equation of the second order which is significantly nonlinear due to the unilateral constraint nature of the connection between the puncheon and the materials. A program has been designed for the root-finding algorithm of a mathematical model and allows analyzing the influence of the drive design parameters on the pressing force of the puncheon on the materials during welding. The designed dynamic and mathematical model of the puncheon drive can be used to determine the rational modes of operation and improve the equipment for ultrasonic welding of materials in the clothing industry.

**Keywords:** ultrasonic sewing machine, six-link leverage mechanism, puncheon drive, displacement function

В настоящее время в швейной промышленности широкое применение находят технологии безниточного соединения деталей кроя [1–3]. К указанным технологиям относятся, например, такие способы соединения деталей, как термоклеевая сварка, сварка током высокой частоты, сварка горячим воздухом, термоконтактная сварка. Среди безниточных способов соединения материалов большое распространение получает ультразвуковая сварка, что вызвано увеличением

использования в швейном производстве синтетических полимерных материалов [4]. Следует отметить, что ультразвуковая сварка также находит широкое применение в технологиях получения бесшовных изделий при изготовлении функционального белья [5] и изделий из волокнистых нетканых материалов [6]. Ультразвуковая сварка позволяет выполнять соединение деталей без использования вспомогательных материалов, обладает высокой производительностью

стью и экологической чистотой технологических процессов. По способу выполнения сварного шва можно выделить три группы машин ультразвуковой сварки: последовательного прерывистого выполнения швов; последовательного непрерывного выполнения швов; параллельного выполнения швов (прессы). Машины для выполнения прерывистого шва являются наиболее универсальными, чаще всего [1] строятся на базе швейных машин и могут применяться в качестве их непосредственной замены. Особенностью машин ультразвуковой сварки прерывистого действия является наличие механизма привода пуансона, который периодически воздействует на свариваемые материалы и должен обеспечивать [1] необходимое усилие прижима материалов в зоне сварки, требуемую длительность выстоя пуансона во время сварки, заданную величину подъема пуансона над материалами, достаточную для транспортирования материалов.

Рассмотрим схему механизма привода пуансона [1, 7], представленную на рис. 1. В состав привода входит шестизвенный рычажный механизм, который преобразует вращение кривошипа 1 в возвратно-поступательное движение ползуна 5. Ползун 5 имеет возможность поступательного движения относительно пуансонодержателя 8, перемещающегося относительно неподвижной направляющей 7 и жестко соединенного с пуансоном 12. На пуансонодержателе 8 закреплен упор 9, положение которого может изменяться с помощью регулировочного винта 10. Между ползуном 5 и упором 9 установлена замыкающая пружина 11.

При движении ползуна 5 из крайнего верхнего положения вниз, пуансон 12, вместе с пуансонодержателем 8, также перемещается вниз под действием пружины 6 до тех пор, пока пуансон не опустится на материалы 13. После этого пуансон вместе с пуансонодержателем останавливается, ползун 5 продолжает перемещение относительно пуансонодержателя 8. В зону сварки подается ультразвук, при этом пуансон 12 должен оставаться неподвижным. Подъем пуансона 12 вместе с пуансонодержателем 8 осуществляется при движении ползуна 5 вверх после его контакта через пружину 11 с упором 9. В рассматриваемом механизме предусмотрена возможность регулирования величины усилия, создаваемого пуансоном при фиксации материалов в процессе сварки, с помощью изменения усилия предварительного поджатия пружины 6. Установкой упора 9, фиксируемого при помощи регулировочного винта 10 относительно пуансонодержателя 8, можно регулировать длительность выстоя пуансона при сварке.

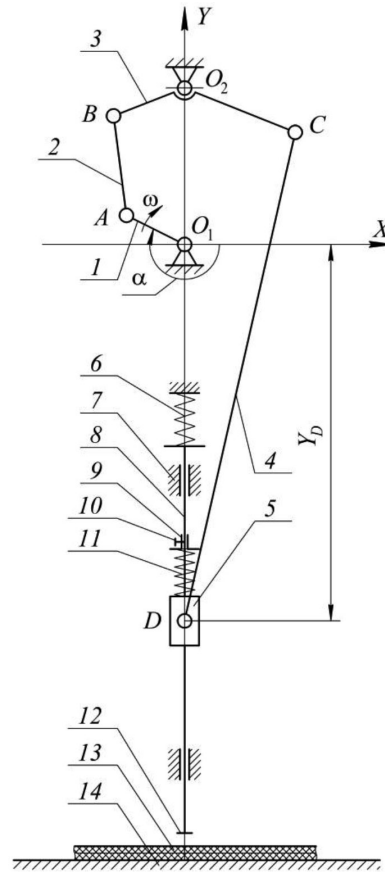


Рис. 1. Схема механизма

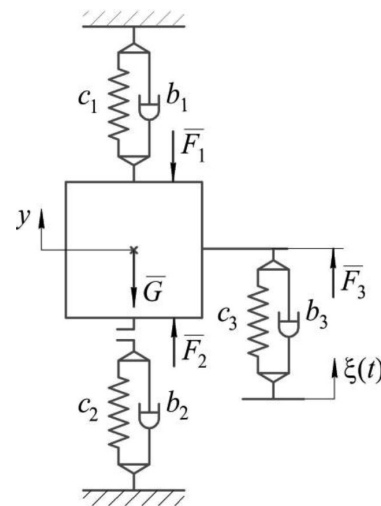


Рис. 2. Динамическая модель

Связь пуансона 12 с материалами 13 является неудерживающей. При этом требуется чтобы в момент сварки усилие между пуансонодержателем и материалами было постоянным. Наличие неудерживающей связи может приводить к возникновению нежелательных колебаний пуансона относительно материалов в период сварки, что

в свою очередь, может сказываться на качестве шва. В настоящей статье рассматривается задача разработки динамической и математической модели механизма привода пуансона с целью исследования характера воздействия пуансона на свариваемые материалы и совершенствования механизма привода пуансона.

**Материалы и методы исследования**

Представим рассматриваемую механическую систему (рис. 1) в виде динамической модели на рис. 2. Будем считать пуансон 12, пуансонодержатель 8 и упор 10 (рис. 1) абсолютно твердым телом – «пуансон», имеющим возможность перемещаться вдоль направляющих по вертикали на величину  $y$  (рис. 2). Замыкающую пружину 6, свариваемые материалы 13, пружину 11 (рис. 1) представим на динамической модели (рис. 2) в виде упруго-диссипативных элементов с приведенными коэффициентами жесткости  $c_i$  и сопротивления  $b_i$ ,  $i = 1, 3$  соответственно. Неудерживающая связь «пуансона» с материалами на динамической модели представлена элементом «односторонняя неудерживающая связь». Обозначим  $\xi(t)$  – перемещение ползуна 5.

На «пуансон» действуют силы (рис. 2):  $F_1$  – сила со стороны пружины 6 (рис. 1);  $F_2$  – равнодействующая распределенных сил, в направлении оси  $O_1Y$  (рис. 1) со стороны свариваемых материалов из-за их деформации под «пуансоном» на величину  $y$  (при  $y < 0$  «пуансон» внедряется в материалы, при  $y \geq 0$  «пуансон» перемещается над материалами);  $F_3$  – сила со стороны пружины 11 из-за ее деформации на величину  $\Delta = \xi(t) - y$  из-за относительного движения ползуна 5 и пуансонодержателя 8 (рис. 1);  $G$  – сила тяжести «пуансона» ( $G = mg$ ,  $m$  – масса «пуансона»,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ). Силу трения в поступательной кинематической паре между ползуном 5 и пуансонодержателем 8 будем считать малой и ниже не учитываем.

Математическая модель, соответствующая представленной на рис. 2 динамической модели «пуансона», с учетом принятых обозначений может быть представлена в виде

$$m\ddot{y} = -F_1 + F_2 + F_3 - G. \quad (1)$$

Обобщенная координата  $y$  связана с перемещением  $\xi(t)$  ползуна 5 (рис. 1) и деформацией  $\Delta$  пружины 11 следующим равенством

$$y = \xi(t) - \Delta. \quad (2)$$

Запишем аналитические выражения входящих в (1) сил. Учитывая малость  $y$ , силу  $F_1$  можно записать в виде

$$F_1 \approx F_{10} + c_1 y + b_1 \dot{y}, \quad (3)$$

где  $F_{10}$  – сила, соответствующая начальному поджатию пружины 6 в установочном положении.

Силу  $F_2$ , с учетом неудерживающей связи, приближенно [8, 9] запишем в виде

$$F_2 = \begin{cases} F_2^* & \text{при } y < 0 \text{ и } F_2^* > 0, \\ 0 & \text{при } y \geq 0 \text{ или } F_2^* \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$F_2^* \approx -(c_2 y + b_2 \dot{y}). \quad (5)$$

Аналитическое выражение для силы  $F_3$  с учетом малости деформации  $\Delta$  можно приближенно представить в виде

$$F_3 = F_{30} + c_3 \Delta + b_3 \dot{\Delta}, \quad (6)$$

где  $F_{30}$  – сила, соответствующая начальному поджатию пружины 11 в установочном положении,  $\Delta = \xi(t) - y$ .

Зависимость  $\xi(t)$ , представляющая собой кинематическое внешнее воздействие, может быть определена в результате кинематического анализа рычажного шестизвенного механизма [6], приводящего в движение ползун 5. Пусть  $Y_D(\alpha)$  – функция положения ползуна 5 (шарнира  $D$ , рис. 1), где  $\alpha = \alpha_0 - \varphi$  – угол поворота кривошипа  $O_1A$ ,  $\alpha_0 = \text{const}$ ,  $\varphi = \omega t$ ,  $\omega$  – угловая скорость вращения главного вала  $O_1$ . Начальное значение угла  $\alpha = \alpha_0$  при  $t = 0$  выберем так, чтобы оно соответствовало крайнему верхнему положению шарнира  $D$ . Введем функцию перемещения  $\psi(\varphi)$  ползуна 5, которую представим в виде

$$\psi(\varphi) = Y_D(\alpha_0) - Y_D(\alpha_0 - \varphi).$$

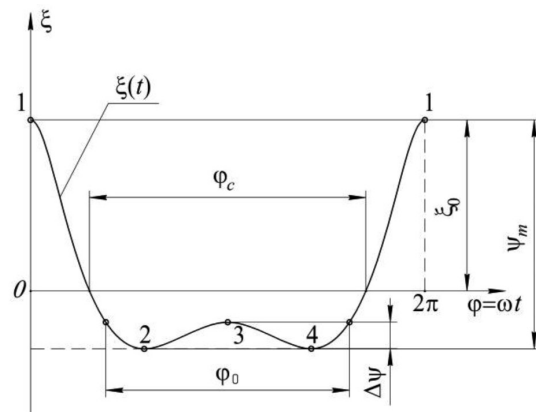


Рис. 3. Зависимость  $\xi(\varphi)$

Функция перемещения  $\psi(\varphi)$  характеризует отклонение ползуна 5 от его крайнего верхнего положения. С учетом введенных обозначений зависимость  $\xi(t)$  может быть представлена в виде (рис. 3)

$$\xi(\varphi) = \xi_0 - \psi(\varphi), \quad (7)$$

где  $\xi_0$  – максимальная величина подъема «пуансона» над материалами.

Следует отметить, что функция перемещения  $\psi(\varphi)$  может быть задана в виде требуемой функции перемещения [7] ползуна 5, с учетом задаваемых конструктором значений:  $\psi_m$  – максимального перемещения ползуна 5;  $\varphi_0$  – длительности выстоя,  $\Delta\psi$  – точности воспроизведения выстоя. Изменением величин  $\varphi_0$  и  $\psi_m$  можно устанавливать длительность сварки материалов  $\varphi_c$ .

Будем считать, что при  $t = 0$  «пуансон» находится в крайнем верхнем положении, при этом  $\Delta = 0$  (установочное положение). Имея в виду, что в крайнем верхнем положении «пуансона»  $\xi(0) = \xi_0$ , получим

$$\text{при } t = 0: y(0) = \xi_0, L_{O_1A} = 6,0 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение (1) при учете (8), (2)–(7) представляет собой математическую модель «пуансона».

### Результаты исследования и их обсуждение

Для численного решения дифференциального уравнения (1) удобно воспользоваться функцией `ode45()` входящей в состав среды MATLAB [10]. С использованием разработанной в среде MATLAB программы было выполнено математическое моделирование колебаний «пуансона». В процессе моделирования использовались следующие исходные данные:  $L_{O,A} = 6,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_{AB} = 39,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_{O,B} = 10,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_{O,C} = 7,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $L_{CD} = 65,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $\angle BO_2C = 110^\circ$ ,  $Y_{O_2} = 40,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $\xi_0 = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $m = 0,063$  кг,

$F_{10} = 20$  Н,  $c_1 = 2000$  Н/м,  $b_1 = 0,71$  Н/(м/с),  $c_2 = 5,0 \cdot 10^4$  Н/м,  $b_2 = 97,64$  Н/(м/с),  $c_3 = 1,0 \cdot 10^5$  Н/м,  $b_3 = 7,10$  Н/(м/с),  $F_{30} = 0$  Н.

В результате вычислений разработанная программа выводит графики зависимостей  $y(t)$ ,  $\dot{y}(t)$ ,  $\ddot{y}(t)$ ,  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$  и  $F_3(t)$ . В качестве примера на рис. 4 представлены графики зависимостей  $y(\varphi)$  и  $F_2(\varphi)$ ,  $\varphi = \omega t$ , полученные при изменении угловой скорости  $\omega$ , а также  $F_{30}$  и  $c_3$ . Так как начальные условия (8) записаны для установочного положения (при  $t = 0$   $\Delta = 0$ ), то для получения установившегося движения анализировалось  $N = 10$  последовательных циклов изменения угловой координаты  $\varphi \in [0, 2\pi N]$ . На графиках (рис. 4) показаны зависимости, соответствующие последнему циклу.

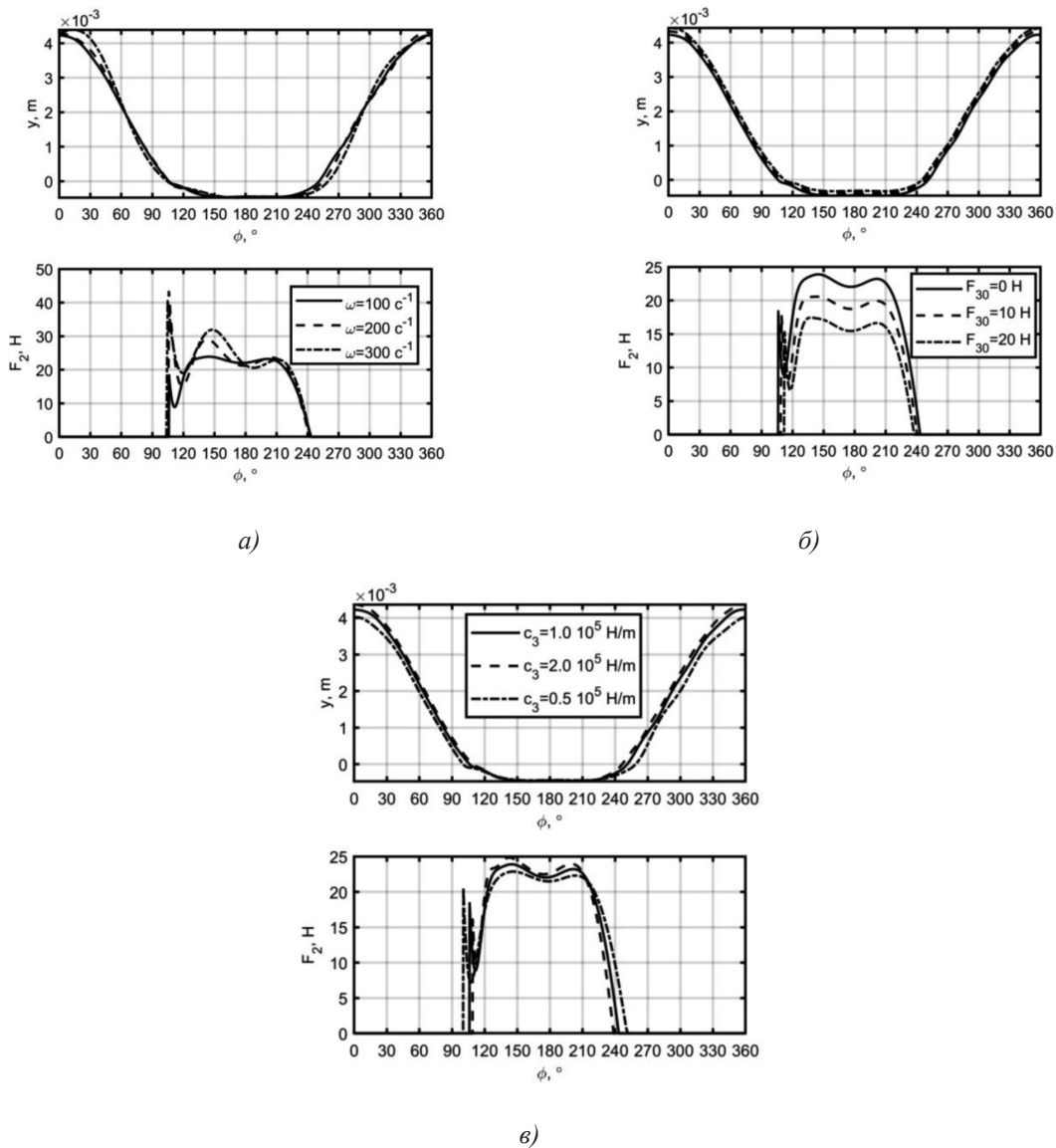


Рис. 4. Зависимости  $y(\varphi)$ ,  $F_2(\varphi)$



Как видно из представленных графиков в период сварки при  $y < 0$  сила  $F_2 > 0$ , причем в начальный момент при внедрении «пуансона» в материалы наблюдается скачок силы  $F_2$ , что связано с ударом «пуансона» о материалы. При малых  $\omega$  ( $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ , рис. 4, а) усилие прижима «пуансоном» материалов в период сваривания остается практически постоянным,  $F_2 \approx 22 \text{ Н}$ . С ростом  $\omega$  увеличиваются как пиковые значения силы  $F_2$ , так и амплитуды ее колебаний. Увеличение усилия предварительного поджатия пружины  $II$  (рис. 1) приводит (рис. 4, б) к снижению силы  $F_2$  в период сварки, причем длительность контакта «пуансона» с материалами также уменьшается. Изменение коэффициента  $c_3$  (рис. 4, в) оказывает влияние на длительность контакта «пуансона» с материалами.

### Заключение

В результате проведенного исследования разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для исследования динамики механизма привода пуансона машин ультразвуковой сварки с последовательным прерывистым выполнением шва. Полученные результаты позволяют анализировать колебания пуансона в процессе сварки при учете заданного кинематического внешнего воздействия со стороны исполнительного механизма, неустойчивающего характера связи пуансона с материалами и других конструктивных параметров привода. Полученная математическая модель и разработанное программное обеспечение могут быть использованы для определения рациональных режимов работы и совершенствования оборудо-

вания ультразвуковой сварки материалов в швейной промышленности.

### Список литературы

1. Ультразвуковая сварка при изготовлении одежды: монография / Под ред. В.П. Полухина. М.: Легкая индустрия, 1979. 336 с.
2. Франц В.Я. Оборудование швейного производства: учеб. для студ. сред. проф. образования. 4-е изд., испр. М.: Издательский центра «Академия», 2010. 448 с.
3. Latest Sewing Technology from Lockstitch to Welding // Apparel Resources [Electronic resource]. URL: <https://apparelresources.com/technology-news/production-technology/latest-sewing-technology-lockstitch-welding> (date of access: 15.04.2019).
4. Хисамиева Л.Г., Гатина Г.Г., Барсукова Р.С., Хисамиев А.И. Применение ультразвукового способа сварки для соединения текстильных полимерных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 15. С. 74–76.
5. Миннебаева Р.Г., Хисамиева Л.Г. Технология изготовления функционального белья с использованием ультразвуковой сварки // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 19. С. 108–109.
6. Волков С.С., Дерябин А.А., Шестель Л.А. Технология изготовления волокнистых нетканых материалов с помощью ультразвуковой сварки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 6 (675). С. 82–89.
7. Кузнецов К.Ю., Марковец А.В., Луганцева Т.А., Мазин Л.С. Исследование функции перемещения пуансона ультразвуковой швейной машины // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2017. № 4. С. 155–159.
8. Марковец А.В., Мазин Л.С. Динамический анализ механизмов транспортирования материалов швейных машин: монография. СПб.: СПГУТД, 2010. 237 с.
9. Марковец А.В., Мазин Л.С. Кинематический анализ механизмов транспортирования материалов швейных машин: монография. СПб.: СПГУТД, 2006. 312 с.
10. Brian R. Hunt, Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg. Guide to MATLAB: for beginners and experienced users: updated for MATLAB 8 and Simulink 8. 3rd ed. College Park: Cambridge University Press, 2014. 330 p.