

УДК 621.865.8

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМ СБОРОЧНЫМ РОБОТОМ С МОДЕЛЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

**Мишулин Ю.Е., Егоров И.Н., Буненков В.В.**

*ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир,*

*e-mail: oid@vlsu.ru, egorovmtf@mail.ru, mishulin59@mail.ru, vasyan1729gmail.com*

Рассмотрены вопросы построения системы адаптивного управления сборочным роботом, выполняющим операцию сборки изделий типа тел вращения. Система управления робота строится с использованием модели сборочного процесса. Приведенная модель сборочного процесса отражает геометрические связи и силовые взаимодействия, возникающие в результате сопряжения деталей. Показано, что вследствие геометрических связей и силовых взаимодействий в процессе сопряжения деталей возможно возникновение особых (сингулярных) состояний в виде заклинивания. Алгоритмы управления системой приводов робота разрабатываются на основе информации о состоянии объекта управления – технологического процесса сборки для каждой контактной ситуации. Для управления процессом сборки при непрерывном перемещении собираемых изделий с помощью системы технического зрения решается задача обнаружения сопрягаемой перемещающейся цилиндрической детали, определения ее координат и скорости перемещения исходя из допустимой величины помехи изображения. Сборка осуществляется в режиме позиционно-силового управления и нечеткого визуального слежения сборочным роботом за положением и координатами центра отверстия непрерывно перемещающейся детали. Разработанные математические модели технологического процесса сопряжения деталей типа «вал-втулка» с учетом связей, параметров силового взаимодействия и алгоритмы модельного управления обеспечивают решение задач идентификации ситуаций процесса сопряжения и адаптивного логико-динамического управления процессом сопряжения.

**Ключевые слова:** сборочный робот, математическая модель, сборочный процесс, силомоментный датчик

## THE CONTROL SYSTEM OF THE ADAPTIVE ASSEMBLY ROBOT WITH THE MODEL OF TECHNOLOGICAL PROCESS

**Mishulin Y.E., Egorov I.N., Bunenkov V.V.**

*Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs, Vladimir, e-mail: oid@vlsu.ru, egorovmtf@mail.ru, mishulin59@mail.ru, vasyan1729gmail.com*

Questions of creation of system of adaptive control of the assembly robot which is carrying out operation of assembly of products like rotation bodies are considered. The control system of the robot is under construction with use of model of assembly process. The given model of assembly process reflects the geometrical communications and power interactions resulting from interface of details. It is shown that owing to geometrical communications and power interactions in the course of interface of details possibly emergence of special (singular) states in the form of jamming. Algorithms of management of system of drives of the robot are developed on the basis of information on a condition of object of management – technological process of assembly for each contact situation. For management of process of assembly at continuous movement of the collected products by means of system of technical sight the problem of detection of the interfaced moving cylindrical detail, determination of its coordinates and speed of movement proceeding from the admissible size of a hindrance of the image is solved. Assembly is carried out in the mode of position-force management and indistinct visual tracking by the assembly robot behind situation and coordinates of the center of an opening of continuously moving detail. The developed mathematical models of technological process of interface of details like «shaft plug» taking into account communications, parameters of power interaction and algorithms of model management provide the solution of problems of identification of situations of process of interface and adaptive logical-dynamic management of interface process.

**Keywords:** assembly robot, mathematical model, build process, force-torque sensor

Создание переналаживаемых роботизированных сборочных комплексов основано на применении: промышленных роботов (ПР) с программным управлением, работающих в условиях упорядоченной среды; адаптивных ПР, взаимодействующих с неупорядоченной средой вследствие оснащения их системами очувствления и логико-динамического управления; интеллектуальных ПР, обеспечивающих высококачественное управление в условиях неопределенностей. В первом случае операцию сопряжения деталей осуществляет

специальное технологическое устройство, а ПР обеспечивает захват и базирование деталей и сьем собранного узла. Во втором и третьем случаях ПР является технологическим роботом, который непосредственно выполняет операцию сборки деталей [7].

В общем виде технологический процесс роботизированной сборки состоит из следующих основных переходов: захват одной из деталей и перемещение её на позицию сборки; позиционирование и относительная ориентация собираемых деталей с точностью, обеспечивающей их собираемость;

сопряжение собираемых деталей; контроль качества сборки и съём собранного изделия (узла). Функциональные движения [7] технологического сборочного робота (СР), непосредственно выполняющего процесс сборки изделий (узлов) из деталей типа «вал-втулка», являются несвободными движениями. Это происходит вследствие действия как геометрических и кинематических связей (связей 1 и 2 видов) [8], так и силовых взаимодействий с возможностью возникновения особых (сингулярных) состояний (заклинивание) [9], вызванных резким увеличением силы трения с уменьшением угла между осями собираемых деталей [4].

Управление заключается в управлении процессом: перемещения вала на позицию сборки; перемещения торца вала по фаске втулки; совмещения сопрягаемых поверхностей, характеризующееся, в случае отклонения величин относительных смещений и перекосов осей сопрягаемых поверхностей деталей от расчетных значений, значительными силами на поверхностях сопряжения; перемещения вала вдоль оси отверстия втулки с преодолением сил трения и сопротивления, вследствие деформации сопрягаемых деталей при наличии натяга в соединении; съема собранного изделия (узла).

В качестве объекта управления в системе управления СР рассматривается технологический процесс сборки. Исходя из этого, очевидно, что управляющими воздействиями или входными величинами сборочного процесса, как объекта управления являются выходные координаты СР, а именно координаты положения  $\bar{q}$  и скорости  $\dot{\bar{q}}$  рабочего органа. Управляемой координатой или выходной величиной сборочного процесса является вектор сил и моментов  $\bar{F}$ , возникающий в результате действия геометрических связей собираемых компонент при сопряжении деталей [3].

Кроме того, входными величинами сборочного процесса являются координаты  $\bar{q}_6$  положения базовой детали. Величина  $\bar{q}_6$  является постоянной величиной, если базовая деталь находится на неподвижном основании, и переменной, если базовая деталь в процессе сборки перемещается. Изменение скоростей движения рабочего органа робота и сборочного стола приводит к непостоянству коэффициента трения  $f_{тр}$  между собираемыми деталями.

Таким образом, выходная координата  $\bar{F}$  сборочного процесса является сложной функцией, зависящей от многих параметров, возникающих в результате действия

геометрических связей и силового взаимодействия:

$$\bar{F} = \bar{F}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}, \bar{q}_6, \dot{\bar{q}}_6, f_{тр}).$$

Основной математической модели сборочного процесса являются уравнения геометрических связей и силовых взаимодействий собираемых деталей (рис. 1).

Геометрические связи при сопряжении деталей определяются их взаимным расположением. При этом расстояние  $D$  между собираемыми деталями определяется выражением вида

$$D = X_p \cos \alpha + Z_p \sin \alpha - R,$$

где  $X_p, Y_p$  – координаты точки контакта  $P$ .

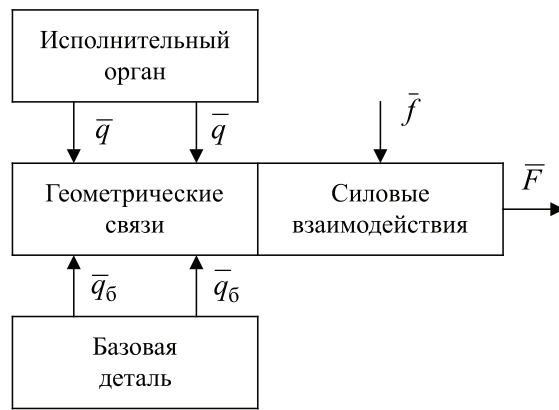


Рис. 1. Структурная схема модели сборочного процесса

При достижении  $D \geq 0$  собираемые детали соприкасаются и возникает сила реакции  $N$ , пропорциональная величине деформации, т.е.  $N = -CD$ , где  $C$  – коэффициент жесткости. На основании этих положений определены геометрические условия, при которых возникают силовые взаимодействия собираемых деталей [3].

Величина нормальной силы  $N_i$ , возникающей при точечном контакте, для различных ситуаций взаимодействия собираемых деталей определяется в виде  $N_i = -CD_i$ , при  $i = 1 \dots 8$ , где  $C$  – жесткость собираемых деталей.

В этом выражении необходимо учитывать знак  $D_i$ :

$$N_i = -\text{sgn}(i) CD_i,$$

где  $\text{sgn}(i) = [10001011]^T$  для  $D_i > 0$ ;  $\text{sgn}(i) = [01110100]^T$  для  $D_i < 0$ .

Определив значение нормальной силы  $N_i$  на основании геометрических связей, возникающих при сборке деталей, необходимо решить задачу разложения силы реакции  $N_i$  по координатным осям с учетом сил трения для каждой сборочной ситуации.

Кроме сил, действующих по координатным осям, необходимо определить также значение моментов  $M_{об}$  и  $M_{оп}$ , действующих вокруг центра  $O_6$  базовой детали и вокруг центра  $O_n$  перемещаемой детали.

Уравнения сил и моментов в матричной форме имеют вид

$$\overline{F}_i = \sum_{j=1}^4 \overline{B}_i N_j,$$

где  $\overline{F}_i$  – вектор столбец,  $\overline{F}_i = \{F_{xi}, F_{zi}, M_{оби}, M_{они}\}^T$ ;  $i$  определяет номер сборочной ситуации;  $N_j$  – нормальная сила реакции;  $j$  – номер контактной ситуации;  $B_i$  – матрицы коэффициентов, учитывающие геометрию и взаимное расположение собираемых деталей.

Рассмотрим построение системы управления сборочным роботом, выполняющим операцию сборки деталей типа тел вращения. Решение задачи управления приводами робота, выполняющего сборочные операции, имеет определенные трудности вследствие возникновения силовых взаимовлияний через объект сборки.

Использование модели сборочного процесса позволяет повысить производительность сборочной системы. Достигается это использованием оптимальных алгоритмов управления, контроля правильности протекания сборочного процесса и осуществления коррекции программного движения по результатам измерения силомоментной информации.

Структурная схема системы управления сборочного робота с использованием модели сборочного процесса представлена на рис. 2. Блок программного управления формирует задание по положению на систему приводов сборочного робота. Информация с силомоментного датчика поступает на блок математической модели сборочного процесса, который может быть реализован

программным способом. В результате сравнения действующих сил и моментов с эталонными осуществляется распознавание сборочной ситуации и в случае несоответствия реальных значений с эталонными осуществляется коррекция алгоритмов программного управления и сигнальная коррекция программного движения.

Одним из методов повышения надежности работы сборочного робота является проверка достоверности протекания сборочного процесса и, в случае отклонения от заданной траектории движения, внесение корректирующих управляющих воздействий. Функциональная схема системы управления сборочного робота представлена на рис. 3.

Устройство управления формирует законы позиционно-силового управления [1, 2, 3] приводами исполнительного устройства СР. Выходными сигналами  $Y$  сборочного процесса являются силы и моменты, возникающие в результате взаимодействия собираемых деталей. Они измеряются измерительной системой. Выходные сигналы с исполнительного механизма поступают также на математическую модель сборочного процесса, которая формирует усилия и моменты:

$$\overline{F}_i = \sum_{j=1}^4 \overline{B}_i \cdot N_j;$$

$$\overline{F}_i = \{\overline{F}_m, \overline{M}_m\}^T = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}^T.$$

Сигналы с измерительной системы  $\overline{F}_d$ ,  $\overline{M}_d$  и модели  $\overline{F}_m$ ,  $\overline{M}_m$  поступают на наблюдатель, который формирует функцию  $\Phi_k$  оценки правильности протекания сборочного процесса. Функция оценки может иметь вид

$$\Phi_1 = \Phi\left(\left(\overline{F}_m - \overline{F}_d\right), \left(\overline{M}_m - \overline{M}_d\right)\right) \leq \varepsilon,$$

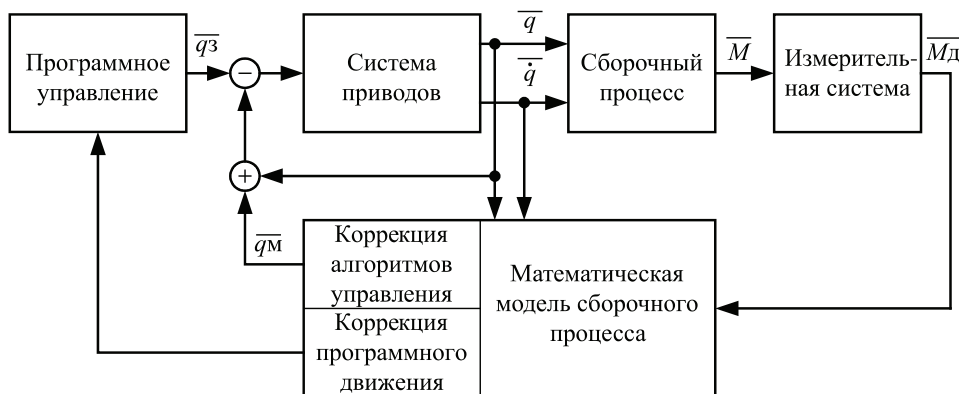


Рис. 2. Структурная схема системы управления сборочного робота

где  $\varepsilon$  – величина, стремящаяся к нулю, и определяется точностью измерения  $M_d$  и  $F_d$  и полнотой и точностью математической модели. Смыслом функции  $\Phi_1$  является соответствие или равенство усилий и моментов на выходе объекта управления и на выходе его модели.

1. Управление сборочной системой осуществляется по одному из алгоритмов, соответствующему какой-либо сборочной ситуации [3]. В случае неравенства нулю функции оценки  $\Phi_k$  анализатор определяет, в какой сборочной ситуации находятся собираемые детали. Если определена

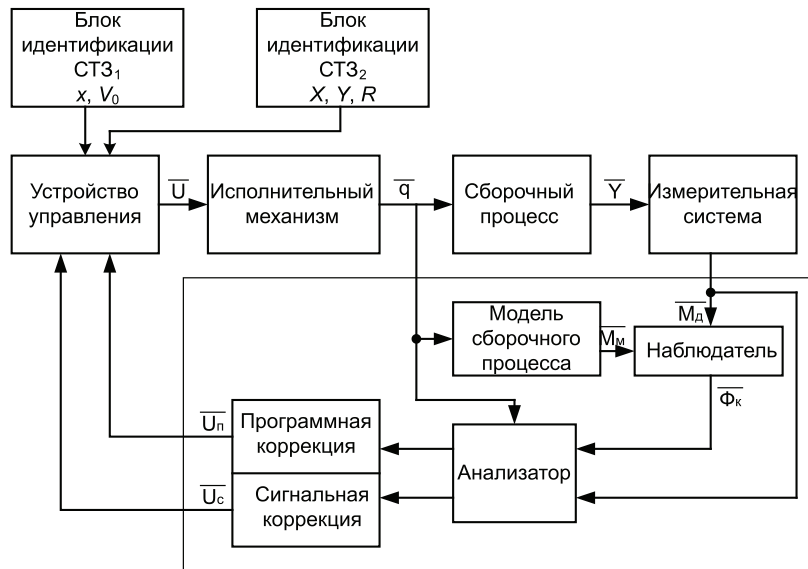


Рис. 3. Функциональная схема системы управления сборочного робота

Еще одна задача, возлагаемая на наблюдатель, это обеспечение минимальных силовых взаимодействий, т.е. обеспечение функции вида:

$$\Phi_2 = \Phi(\overline{F}_d \leq \varepsilon_F, \overline{M}_d \leq \varepsilon_M).$$

При нормальной работе сборочного комплекса функции  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  выполняются. В случае нарушения хода сборочного процесса на выходе наблюдателя появляется не нулевой сигнал функции  $\Phi_k$ . Целью управления является не только определение самого факта несобираемости, но и определение причины несобираемости и формирования корректирующего управления для завершения сборочного процесса.

Для определения причины несобираемости служит анализатор, на вход которого поступает сигнал  $\Phi_k$  с выхода наблюдателя, и функция оценки  $\Phi_k$  принимает следующие значения:

$$\Phi_k = \begin{cases} 0, \forall F_\Sigma = 0; \\ 1, \forall F_\Sigma \neq 0. \end{cases}$$

Анализатор работает по алгоритму распознавания сборочной ситуации.

В случае нарушения работоспособности сборочной системы необходимо выполнить одно из следующих действий:

сборочная ситуация, не соответствующая алгоритму управления, то выдается сигнал на блок программной коррекции и устройство управления изменяет алгоритм работы на соответствующий алгоритм для определенной сборочной ситуации.

2. Если сборочная ситуация соответствует алгоритму управления, а функция  $\Phi_k$  не равна нулю, то необходимо сформировать сигналы на коррекцию программного движения с помощью блока сигнальной коррекции (адаптации) [2, 3].

Для определения величины коррекции  $U_c$  воспользуемся следующими положениями. Возникающие в процессе сборки силы  $F$  и моменты  $M$  являются результатом силового взаимодействия собираемых деталей. Будем считать, что силомоментный датчик позволяет измерить все составляющие главного вектора сил и моментов по координатным осям. Причем компоненты момента  $M_x, M_y, M_z$  выражаются через компоненты силы  $F_x, F_y, F_z$  и координаты  $X_k, Y_k, Z_k$  точки  $K$  приложения вектора сил и моментов:

$$M_x = F_y Z_k - F_z Y_k;$$

$$M_y = F_z X_k - F_x Z_k;$$

$$M_z = F_x Y_k - F_y X_k.$$

Эти уравнения линейно зависимы, поскольку  $F_x M_x + F_y M_y + F_z M_z = 0$  и образуют систему второго порядка. Таким образом, можно определить лишь две координаты, что часто бывает достаточно, так как одна координата, например высота вала  $Z_k = H$ , известна. Следовательно, по измеренным силам и моментам можно определить координаты точки приложения силы  $F$  или точки контакта собираемых деталей:

$$X_k = \frac{F_k Z_0 - M_y}{F_z};$$

$$Y_k = \frac{F_y Z_0 + M_x}{F_x};$$

$$Z_k = H.$$

Эти выражения положены в основу работы блока формирования параметров сигнальной коррекции.

Из представленных положений вытекает, что блок сигнальной коррекции представляет собой обратную математическую модель сборочного процесса, иными словами, предстоит решить обратную задачу – по измеренным силам и моментам определить координаты положения собираемых деталей.

Алгоритмы управления разрабатываются на основе информации о состоянии объекта управления – технологического процесса сборки. Эта информация поступает с измерительной системы. Формируемое управление подается на приводы по соответствующим координатам. Алгоритм управления разрабатывается для каждой контактной ситуации [2, 3]. В исходном состоянии базовая деталь расположена на сборочном столе. Вторая деталь находится в схвате робота. Робот выводит деталь на позицию сборки и привод по координате вертикального перемещения  $Z$ , задается управление по усилию с уставкой  $F_{Z_{зад}}$ . Деталь перемещается вниз до контакта со второй деталью. При достижении  $F_Z = F_{Z_{зад}}$  привод останавливается.

В работах [1, 2] рассматривается РТК с многономенклатурным однопоточным сборочным процессом при непрерывном перемещении собираемых изделий. На первом этапе управления подобным сборочным РТК с помощью видеокамеры СТЗ<sub>1</sub> (рис. 3) решается задача обнаружения перемещающейся цилиндрической детали, определения ее

координат и скорости перемещения исходя из допустимой величины помехи изображения. Полученная информация передается технологическому СР с визуальным и силомоментным ощущением. Сборка осуществляется в режиме позиционно-силового управления и визуального сервоуправления СР за положением и координатами центра отверстия непрерывно перемещающейся детали, реализуемого с помощью видеокамеры СТЗ<sub>2</sub>, расположенной на запястье робота, системы нечеткого моделирования и управления.

Разработанные математические модели технологического процесса сопряжения деталей типа «вал-втулка» с учетом связей, параметров силового взаимодействия и алгоритмы модельного управления обеспечивают решение задач идентификации ситуаций процесса сопряжения и адаптивного логико-динамического управления процессом сопряжения.

С целью повышения эффективности существующих методов автоматической сборки необходимо найти решение проблемы управления СР в особых (сингулярных) состояниях заклинивания. Создание эффективных систем управления подобными сложными динамическими объектами в условиях существенной неопределенности требует применения специальных методов адаптации и интеллектуального управления [5].

В качестве примеров решения данной проблемы следует, в частности, отнести разработку: метода автоматической сборки цилиндрических подвижных соединений изменением центра тяжести подвижной детали и метода наложения колебаний вдоль оси сборочного комплекта, обобщенных сетевой морфологической матрицей вариантов [4]; системы нечеткого управления поиском согласованного положения деталей для роботизированных сборочных устройств на основе желаемого закона движения совмещаемой детали относительно базовой [6]; алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальной сборки соединений с гарантированным зазором на основе нейронных сетей с силомоментной адаптацией и использованием в качестве исполнительного устройства робота IRB-140, оснащенного силомоментным датчиком фирмы «Schunk».

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).*

## Список литературы

1. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография / Владим. гос.ун-т. – Владимир: Изд-во Владим.гос.ун-та, 2010. – 192 с.
2. Егоров И.Н., Матлуб М.М. Управление роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов // Известия ТГУ. Технические науки. – Вып. 1. – 2010. – С. 158–165.
3. Егоров И.Н. Управление мехатронными и робототехническими системами с силомоментным очувствлением: учеб. пособие. И.Н. Егоров, А.А. Кобзев, Ю.Е. Мишулин, В.А. Немонтов / под ред. проф. И.Н. Егорова / Владим. гос.ун-т. – Владимир, 2004. – 270 с.
4. Жарков Г.Е. Метод сборки изменением положения центра тяжести // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М., 2014. – № 11. – С. 5–12.
5. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 336 с.
6. Кузнецов М.В., Симаков А.И. Применение методов нечеткого управления в роботизированных сборочных операциях // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5.
7. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
8. Полетаев В.А., Турчин Д.Е. Анализ связей при автоматической сборке с помощью метода пространственных конфигураций // Вестник Кузбасского ГТУ. – 2005. – № 4, 2. – С. 76–79.
9. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей: монография. – Самара: Сам.гос. ун-т, 2011. – 75 с.

## References

1. Egorov I.N. Pozicionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mehatronny-mi ustrojstvami: monografiya / Vladim. gos.un-t.-Vladimir: Izd-vo Vladim.gos.un-ta, 2010. 192 p.
2. Egorov I.N., Matlub M.M. Upravlenie robotami na osnove pozicionno-silovyh i nechetkih vizualnyh algoritmov // Izvestija TGU. Tehnicheskie nauki. Vyp.1, 2010. pp. 158–165.
3. Egorov I.N. Upravlenie mehatronnymi i robototekhnicheskimi sistemami s silo-momentnym ochuvstvleniem: Ucheb. posobie. I.N. Egorov, A.A. Kobzev, Ju.E. Mishulin, V.A. Nemontov // Pod red.prof. I.N.Egorova / Vladim. gos. un-t, Vladimir, 2004. 270 p.
4. Zharkov G.E. Metod sborki izmeneniem polozhenija centra tjazhesti//Sborka v ma-shinostroenii, priborostroenii. Moskva. 2014, no. 11. pp. 5–12.
5. Iskusstvennyj intellekt i intellektualnye sistemy upravlenija .I.M. Ma-karov, V.M. Lohin, S.V. Manko, M.P. Romanov. M.: Nauka, 2006. 336 p.
6. Kuznecov M.V., Simakov A.II. Primenenie metodov nechetkogo upravlenija v robo-tizirovannyh sborochnyh operacijah // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. 2004. no. 5.
7. Poduraev Ju.V. Mehatronika: osnovy, metody, primenie: ucheb. posobie. M.: Mashinostroenie, 2006. 256 p.
8. Poletaev V.A., Turchin D.E. Analiz svjazej pri avtomaticheskoy sborke s pomoshh'ju metoda prostranstvennyh konfiguracij / Vestnik Kuzbasskogo GTU. 2005, no. 4,2. pp. 76–79.
9. Chernjahovskaja L.B. Kinematicheskij i dinamiccheskij analizi avtomaticheskoy sborki cilindricheskikh detalej: Mono-grafija. Samara: Sam.gos. un-t, 2011. 75 p.