

УДК 621.757  
DOI: 10.12737/23192

С.В. Кузнецова

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ: АНАЛИЗ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Изложен подход к анализу способов и средств автоматизации технологического процесса сборки деталей на основе инструментов математического, имитационного моделирования динамических систем и метода фазового пространства. Описаны варианты представления процесса автоматизированной сборки деталей во временной области и на фазовой плоскости. Предложены критерии оценки эффективности сборочной системы в фазо-

вом пространстве. Рассмотрены этапы создания геометрического образа системы автоматизированной сборки деталей в фазовом пространстве.

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, координата адаптации положения детали, критерии оценки эффективности, математическое моделирование, переходный процесс, процесс функционирования, фазовый портрет, фазовое пространство.

S.V. Kuznetsova

## SYSTEM OF AUTOMATED ASSEMBLY OF PARTS: ANALYSIS IN PHASE SPACE

A process of the functioning of a system of automated parts assemblage can be presented in a phase space.

Any way of assemblage, irrespective of a structural scheme, physical nature of power impacts, a method of parts motion control is characterized by a motion of assembly components throughout a path of combination. Hence, the coordinates of position adaptation and their derivatives allow obtaining a common geometrical image of an assembly system.

A state of the relative position and orientation of parts connected in a phase space at any time period during an operation is shown by phase trajectories.

### Введение

При создании средств автоматизации сборочных операций необходимо иметь информацию о предшествующих разработках и результатах анализа существующих методов и средств автоматизированной сборки. Как правило, эта информация носит обзорный и описательный характер, не выходит за рамки потребностей отрасли или предприятия и не дает объективного представления о достигнутом уровне характеристик средств автоматизации.

Мы будем рассматривать средство автоматизации сборочной операции как технологическую систему, осуществляющую адаптацию положения сборочных компонентов [1] – совокупность преобразований, заключающихся в целенаправленном изменении взаимной ориентации

A value set of initial mismatch of parts conditions on a set of phase trajectories, that is, a phase portrait of an adaptation method under consideration. A graphical image of changes in the state of a common position of parts allows introducing quantitative criteria for the evaluation of the quality of this method and, therefore, for the comparative analysis of different methods.

**Key words:** automated assemblage, adaptation coordinate of part position, criteria of effectiveness evaluation, mathematical modeling, transition process, process of functioning, phase-plane portrait, phase space.

собираемых деталей для совмещения их сопрягаемых поверхностей. Таким образом, система автоматизированной сборки, по сути, представляет собой систему управления параметрами движения соединяемых деталей – их координатами, скоростями и ускорениями.

Одним из широкоизвестных инструментов исследования динамических систем является фазовое пространство [2]. В фазовом пространстве состояние взаимного положения и ориентации соединяемых деталей в любой момент времени в течение операции изображается фазовыми траекториями. Для координат адаптации фазовое пространство является плоскостью, а фазовыми координатами служат значения вектора перемещения детали в плоскости

адаптации и его производная по времени. Множество значений начального рассогласования деталей обуславливает множество фазовых траекторий, т.е. фазовый портрет рассматриваемого метода адаптации. Графическое изображение изменения взаимного положения деталей позволяет ввести количественные критерии для

оценки качества данного метода и, следовательно, для сравнительного анализа различных методов. Для построения фазовых портретов необходимо иметь дополнительную информацию о вариантах реализации метода адаптации, т. е. математическую модель, учитывающую динамику конструктивной схемы устройства.

**Модель системы автоматизированной сборки деталей**

Успешная разработка математической модели системы автоматизированной сборки невозможна без использования принципов и подходов системного анализа. Операцию сборки деталей следует рассматривать как процесс функциониру-

ния системы, целью которого является осуществление преобразований над её элементами – соединяемыми деталями [1]. Обобщенная модель функционирования системы автоматизированной сборки представлена на рис. 1 [3].

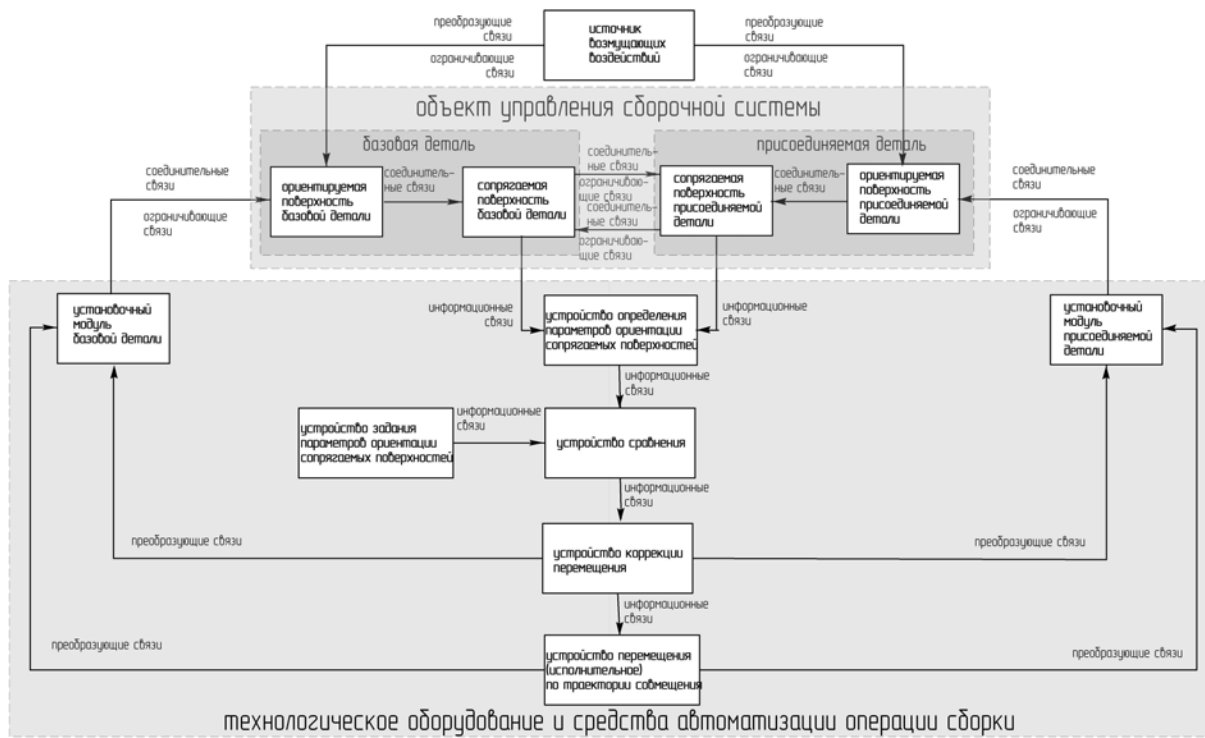


Рис. 1. Обобщенная модель функционирования системы автоматизированной сборки

Математические модели, представляющие систему сборки, могут быть весьма разнообразны: уравнения кинематики, дифференциальные уравнения, структурные схемы, оперирующие с обобщенными параметрами и характеристиками элементов средства адаптации (приведенные инерционные параметры, коэффициенты жесткости, статические характеристики элементов и т.п.).

Основными этапами функционирования системы автоматизированной сборки

являются: транспортирование сборочных компонентов на позицию совмещения по программным траекториям; относительная адаптация взаимного положения сопрягаемых элементов сборочных компонентов; угловая адаптация взаимной ориентации сопрягаемых элементов в сочетании с движением по координате совмещения. Общим для всех этапов автоматизированной сборки следует считать автоматическое управление движением (поступательным или угловым) соединяемых деталей,

целью которого, в зависимости от выполняемого этапа, может быть поиск согласованного положения, позиционирование детали, стабилизация положения и ориентации сопрягаемых элементов деталей при движении по программной траектории совмещения.

Однако в конечном счете, независимо от метода автоматизированной сборки,

его конструктивного исполнения, уровня сложности, степени детализации, после сопряжения моделей всех уровней и элементов системы сборки и их согласования с процессом функционирования системы в целом на выходе должны быть получены параметры движения соединяемых деталей – их координаты, скорости и ускорения в процессе сборки.

### Изображение процесса автоматизированной сборки деталей на фазовой плоскости

Целью является получение наглядной геометрической иллюстрации поведения сборочных компонентов в процессе автоматизированной сборки.

Состояние (фаза) сборочной системы характеризуется положением  $q$  (координата), скоростью (координата  $\frac{dq}{dt}$ ) и ускорением (координата  $\frac{d^2q}{dt^2}$ ) сборочных компонентов (соединяемых деталей). Точка с координатами  $(q, \frac{dq}{dt}, \frac{d^2q}{dt^2})$  является гео-

метрическим образом состояния. След движения точки в пространстве представляет собой фазовую траекторию. На практике широко пользуются данным методом при построении траекторий движения точки для двух координат  $(q, \frac{dq}{dt})$ . Тогда задача сводится к рассмотрению плоской кривой на фазовой плоскости (фазового портрета). На рис. 2 представлено отображение процесса сборки деталей на фазовую плоскость.

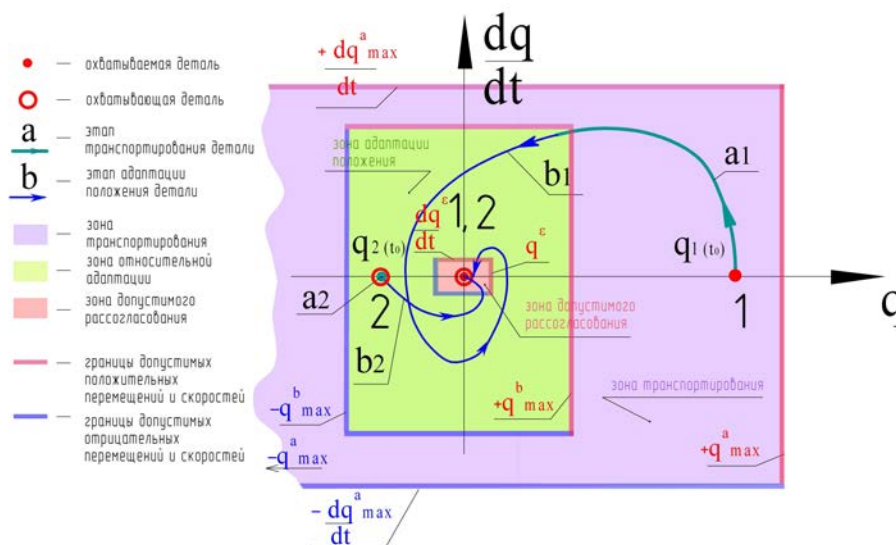


Рис. 2. Изображение процесса автоматизированной сборки деталей на фазовой плоскости

На рис. 2 введены следующие обозначения: точки 1 и 2 – исходное положение 1-й и 2-й соединяемых деталей соответственно;  $q$  – обобщенная координата относительного совмещения;  $\frac{dq}{dt}$  – первая производная обобщенной координаты  $q$ ;

$a_1, a_2$  – траектории транспортного этапа для 1-й и 2-й деталей соответственно;  $b_1, b_2$  – траектории на этапе относительной адаптации для 1-й и 2-й деталей соответственно. Введены границы областей: границы перемещений  $q^a_{max}$  и допустимых ско-

ростей  $\frac{dq^a_{\max}}{dt}$  на этапе транспортирования детали – формируют зону транспортного этапа; границы перемещений  $q^b_{\max}$  и допустимых скоростей  $\frac{dq^b_{\max}}{dt}$  на этапе адаптации положения детали – формируют зону адаптации; границы допустимого рассогласования  $q^e_{\max}$  и допустимых скоро-

стей  $\frac{dq^e_{\max}}{dt}$  на этапе совмещения – формируют зону допустимого рассогласования. Отображение на фазовую плоскость процесса изменения относительных координат деталей в процессе сборки в дальнейшем будем называть *фазовым портретом относительного совмещения* сборочных компонентов. По аналогии может быть построен *фазовый портрет углового совмещения* сборочных компонентов [1; 4].

### Представление процесса автоматизированной сборки деталей во временной области

Обобщенное представление о процессе изменения рассогласования деталей во времени при автоматизированной сборке предложено на рис. 3. Перемещение 1-й

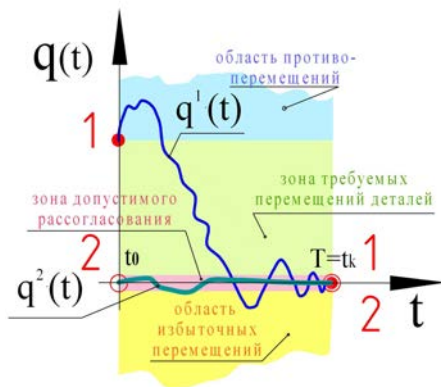


Рис. 3. Обобщенное представление о процессе изменения рассогласования деталей во времени при автоматизированной сборке:  $q^1(t)$ ,  $q^2(t)$  – координаты 1-й и 2-й соединяемых деталей соответственно;  $t$  – время

(присоединяемой) детали по программной траектории происходит за временной промежуток  $[t_0; t_k]$ , 2-я (базовая) деталь остается неподвижной в зоне позиционирова-

ния. Выделены следующие области: область требуемых перемещений; области противоперемещений и избыточных перемещений деталей.

В качестве критериев оценки эффективности системы во временной области следует рассматривать:

- длительность процесса позиционирования (промежуток времени  $[t_0; t_k]$ );
- точность позиционирования (параметр  $q^e$ );
- величину перерегулирования и длительность пребывания в области избыточных перемещений;
- величину и длительность противоперемещения.

Эффективной будет та сборочная система, для которой за промежуток времени  $[t_0; t_k]$  координата  $q^1(t)$  не будет покидать зону требуемых перемещений (рис. 3). Движение сборочной системы за пределами данной зоны можно отнести к неэффективному.

### Оценка эффективности сборочной системы с помощью фазовой плоскости

Проведем анализ эффективности сборочной системы с помощью фазовой плоскости. По результатам анализа динамики различных систем автоматизированной сборки были получены переходные процессы изменения координат собираемых деталей во времени и геометрические

образы на фазовой плоскости для координат, скоростей и ускорений. Результаты представлены в таблице.

Результаты анализа полученных фазовых траекторий могут быть сведены к следующим интерпретациям. На фазовых плоскостях «координата – скорость» (рис.

4) и «скорость – ускорение» (рис. 5) выделено несколько областей: область уменьшения относительного рассогласования деталей, область увеличения относительного рассогласования деталей и область желаемых фазовых траекторий. Следует отметить, что на фазовой плоскости «координата – скорость» ( $q; \frac{dq}{dt}$ ) область уменьшения рассогласования занимает I и III квадранты; область увеличения рассогласования занимает II и IV квадранты (рис. 4). Для плоскости «скорость - ускорение» ( $\frac{dq}{dt}; \frac{d^2q}{dt^2}$ ): область уменьшения рассогласования – I и IV квадранты; область увеличения рассогласования - II и III квадранты (рис. 5).

Наибольший интерес представляет область желаемых фазовых траекторий. Она располагается внутри I квадранта (рис. 4) и ограничена величиной начального рассогласования деталей в момент времени  $t_0$ .

Если фазовая траектория процесса перемещения присоединяемой детали не выходит за пределы желаемой области (рис. 4), то работа, совершаемая сборочной системой, затрачивается только на уменьшение относительного рассогласования собираемых деталей в пределах начального рассогласования (расстояние между точками 1 и 2 по координате  $\Delta q_{1-2}$  в момент времени  $t_0$ ). На рис. 4 это траектории под номерами 5 и 6. Подобные сборочные системы можно отнести к эффективным. Прочие системы, имеющие фазовые траектории под номерами 1, 2, 3, 4, можно охарактеризовать как неэффективные, поскольку работа, выполняемая ими, кроме полезного перемещения идет также на увеличение рассогласования в сторону либо избыточного (кривые 1,2,3), либо противоположного перемещения (кривая 4) (по аналогии с рис. 3).

Однако применение фазовых портретов совмещения сборочных компонентов не ограничивается анализом динамики и геометрическим отображением процессов изменения координат и скоростей. Предлагается с помощью фазовых портретов прово-

дить качественную оценку существующих средств автоматизированной сборки [5].

Для этого требуется ввести оценочные критерии:

1. Начальное рассогласование деталей (расстояние между 1-й и 2-й деталями в начальный момент времени  $t = 0$ ):

$\Delta q_{1-2}(t_0) = |q_1(t_0) - q_2(t_0)|$  – относительное начальное рассогласование.

2. Допустимое рассогласование по координате (точность совмещения), гарантирующее сопряжение сборочных компонентов по окончании этапов адаптации: характеризуется  $+q^\varepsilon, -q^\varepsilon$  – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по координате  $q$ .

3. Допустимое рассогласование по скорости (условие совмещения), гарантирующее сопряжение сборочных компонентов по окончании этапов адаптации: характеризуется  $\dot{q}^\varepsilon, -\dot{q}^\varepsilon$  – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по скорости.

4. Метод управления движением сборочных компонентов: управление перемещением одной или обеих деталей.

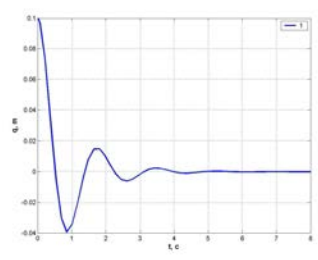
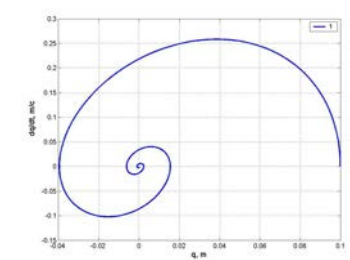
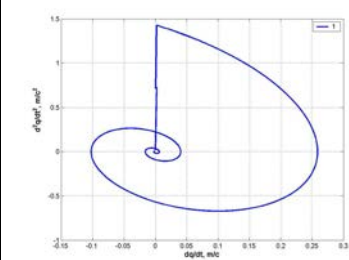
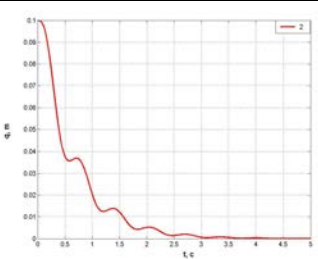
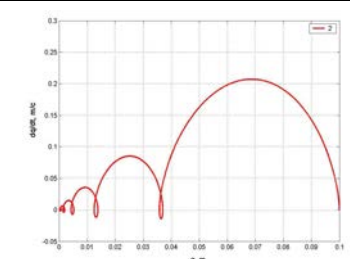
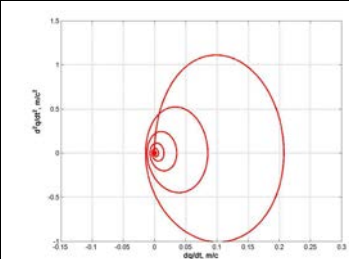
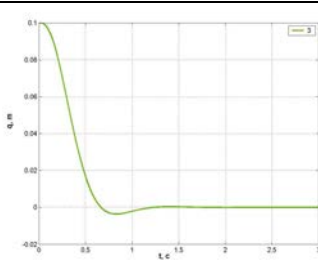
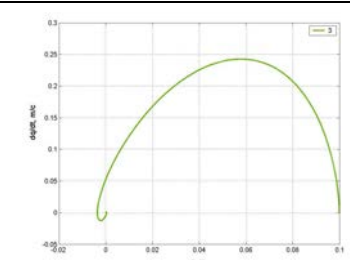
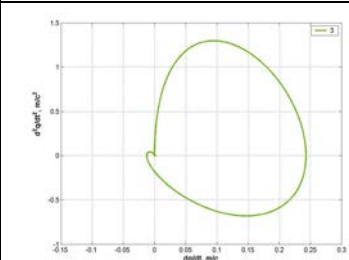
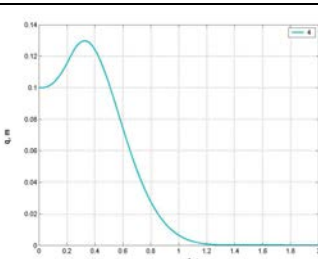
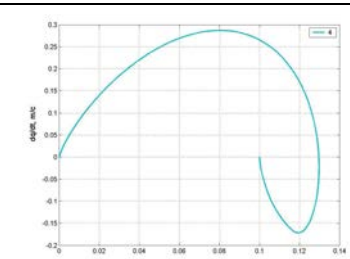
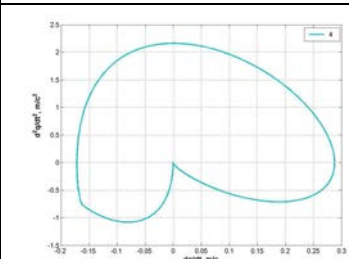
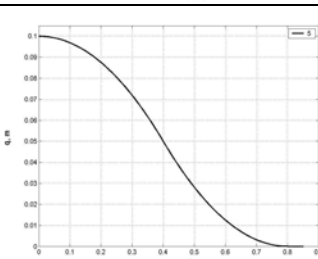
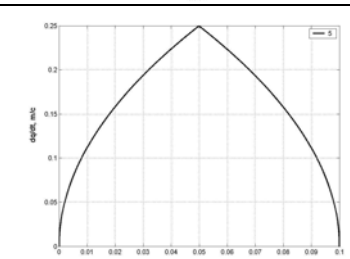
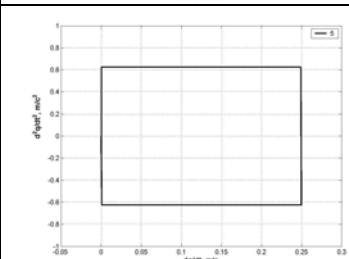
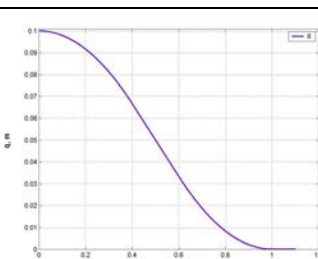
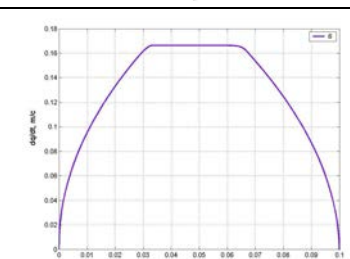
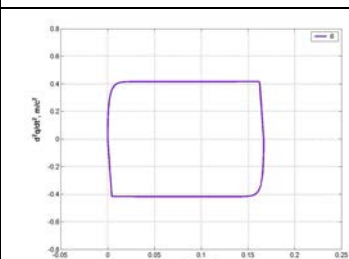
5. Коэффициент полезного действия сборочной системы в фазовой плоскости:

$$K_S = \frac{S_+ - S_-}{S_+},$$

где  $K_S$  – коэффициент полезного действия сборочной системы;  $S_+$  – площадь под фазовой траекторией в областях уменьшения относительного рассогласования ( $S_+ = \sum S_n$ ,  $n$  – число квадрантов плоскости, которые обходит фазовая кривая при уменьшении рассогласования);  $S_-$  – площадь под фазовой траекторией в областях увеличения относительного рассогласования между деталями в процессе сборки ( $S_- = \sum S_m$ ,  $m$  – число квадрантов плоскости, которые обходит фазовая кривая при увеличении рассогласования). Эффективной будет работа той сборочной системы, для которой  $K_S$  близок или равен единице ( $K_S \cong 1$ ).

Таблица

Процессы изменения рассогласования деталей во времени (для позиционирования) при автоматизированной сборке и соответствующие им фазовые траектории относительного со-  
вмещения в фазовой плоскости (координата – скорость; скорость – ускорение)

Система сборки	Процесс изменения рассогласования $q$ деталей во времени	Фазовая траектория системы по координатам $q$ и $\frac{dq}{dt}$	Фазовая траектория системы по координатам $\frac{dq}{dt}$ и $\frac{d^2q}{dt^2}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

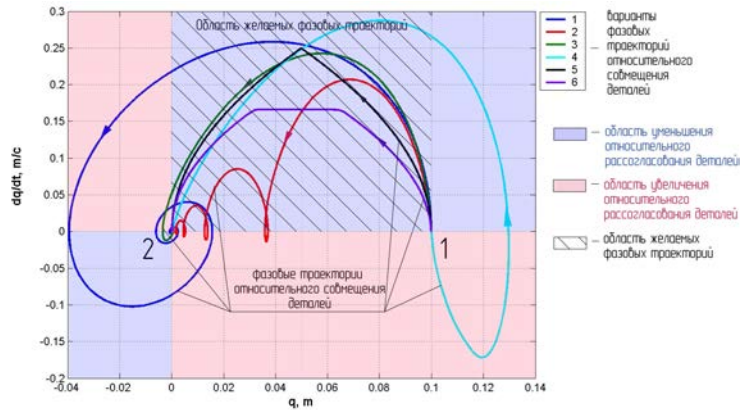


Рис. 4. Фазовый портрет (координата – скорость) процесса автоматизированной сборки деталей на фазовой плоскости

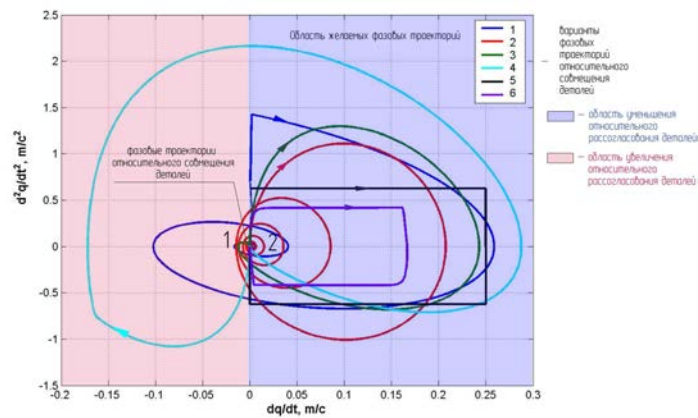


Рис. 5. Фазовый портрет (скорость – ускорение) процесса автоматизированной сборки деталей на фазовой плоскости

**Фазовое пространство как инструмент анализа систем автоматизированной сборки**

Для большей наглядности и удобства были рассчитаны фазовые траектории процесса автоматизированной сборки в трехмерном фазовом пространстве -  $q$ ;  $\frac{dq}{dt}$ ;  $\frac{d^2q}{dt^2}$  (координата – скорость – ускорение) (рис. 6) - и построена область желаемых фазовых траекторий.

Как видно из рис. 6, область имеет простую конфигурацию. Это параллелепипед, ограниченный по фазовой координате  $q$  начальным рассогласованием между деталями, по координате  $\frac{dq}{dt}$  – положительными скоростями, по координате  $\frac{d^2q}{dt^2}$  – максимально допустимыми положительным (при разгоне) и отрицательным (при торможении) ускорениями. Поворачивая с помощью современных средств моделиро-

вания трехмерное фазовое пространство, легко обнаружить фазовые траектории систем сборки, которые выходят за пределы желаемой области (на рис. 6 область закрашена в серый цвет), т.е. их работа является неэффективной.

Фазовое пространство очень удобно при анализе систем автоматизированной сборки, так как позволяет одновременно учитывать основные параметры процесса: координаты, скорости и ускорения собираемых деталей. Фазовое пространство «перемещение ( $q$ ) - скорость ( $\frac{dq}{dt}$ ) - ускорение ( $\frac{d^2q}{dt^2}$ )» в сочетании с вводимыми ограничениями по соответствующим координатам может послужить инструментом для синтеза средств автоматизации операции сборки. Варьируя структуру и

значения параметров элементов сборочной системы и отображая результаты моделирования процесса функционирования системы в фазовом пространстве, можно выявить желаемое решение, соответствующее

рациональной структуре и/или оптимальным величинам параметров отдельных элементов, что, по существу, является синтезом.

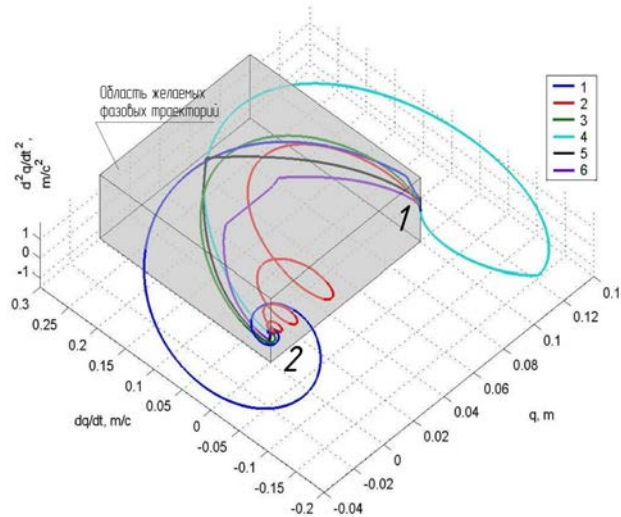


Рис. 6. Фазовые траектории процесса автоматизированной сборки в трехмерном фазовом пространстве:  $q; \frac{dq}{dt}; \frac{d^2q}{dt^2}$  (координата – скорость - ускорение)

### Этапы создания геометрического образа системы автоматизированной сборки деталей в фазовом пространстве

1. Разработка обобщенной модели функционирования системы автоматизированной сборки, включающей: подсистему технологического оборудования и технических средств автоматизации операции сборки; подсистему объекта управления системы сборки, состоящую из базовой и присоединяемой деталей. Анализируются этапы сборочной операции, т.е. взаимодействие структурных компонентов системы и связи между ними.

2. Проработка подсистемы математических моделей элементов технологического оборудования, средств автоматизации с учетом динамики конструктивной схемы устройства сборки.

3. Проработка подсистемы объекта управления системы сборки: анализ геометрических и физических параметров базовой и присоединяемой деталей.

4. Сопряжение (согласование) математических моделей всех уровней в единую систему.

5. Анализ, корректировка входных, внутренних и выходных параметров системы автоматизированной сборки.

6. Имитационное моделирование процесса сборки деталей: построение переходных процессов изменения координат адаптации положения деталей.

7. Выведение на фазовую плоскость (пространство) результатов моделирования процессов изменения координат адаптации положения соединяемых деталей и их производных.

8. Формирование областей, соответствующих этапам сборочной операции: транспортной зоны, зоны адаптации, зоны допустимого рассогласования деталей.

9. Анализ полученных геометрических образов – фазовых портретов системы сборки с применением критериев оценки эффективности системы автоматизированной сборки.



**Заключение**

Применение фазового пространства для отображения систем автоматизированной сборки в совокупности с критериями оценки эффективности позволяет провести анализ нескольких возможных вариантов осуществления сборочной операции с целью выбора наилучшего решения; оценить возможные режимы работы для одного устройства, предоставляя возможность наглядного обоснования неэффективности одних и целесообразности использования

других при соответствующих параметрах элементов сборочной системы. Кроме того, создание целостной базы геометрических образов существующих систем сборки посредством фазовых портретов позволит переосмыслить применяемые в настоящее время классификации, что, в свою очередь, позволит с совершенно новой позиции оценить направления развития средств автоматизированной сборки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кузнецова, С.В. Методы и средства автоматизированной сборки: представление в фазовом пространстве: монография/ С.В.Кузнецова, А.Л.Симаков. - Ковров: КГТА им. В.А.Дегтярева, 2013. - 176 с.
2. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления/ В.А.Бесекерский, Е.П.Попов. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.: Профессия, 2006. - 752 с.
3. Кузнецова, С.В. Обобщенная модель функционирования автоматизированной сборочной системы/ С.В.Кузнецова, Е.П.Тетерин// Наука и современность - 2011: сб. материалов XIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч./ под общ. ред.

1. Kuznetsova, S.V. *Methods and Means for Automated Assembly: Presentation in Phase Space*: monograph / S.V. Kuznetsova, A.L. Simakov. - Kovrov: Degtyaryov STA, 2013. - pp. 176.
2. Besekersky, V.A. *Theory of Automatic Control Systems*/ V.A. Besekersky, E.P. Popov. - Ed. 4-th, revised and supplemented - SPb.: Profession, 2006. - pp. 752.
3. Kuznetsova, S.V. Generalized model of automated assembly system functioning/ S.V. Kuznetsova, E.P.Teterin// Science and the Present - 2011: *Proceedings of the XIII-th Inter. Scientific-Pract. Conf.*: in 2 Vol./ under the general editorship of S.S. Cher-

nov. - Novosibirsk: Izd-vo NSTU, 2011. - Ч. 2. - С. 206-210.

4. Кузнецова, С.В. Фазовые портреты относительного и углового совмещения деталей при автоматизированной сборке/ С.В.Кузнецова, А.Л.Симаков// Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2013. - №2. - С. 12-20.
5. Кузнецова, С.В. Оценка эффективности системы автоматизированной сборки методом фазового пространства/ С.В.Кузнецова// Материалы IV международного научно-технического семинара «Современные технологии сборки» (г. Москва, 22-23 окт. 2015 г./ Университет машиностроения; под ред. И.Н. Зининой. - М.: МГИУ, 2015. - С. 135-145.

nov. - Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2011. - Part 2. - pp. 206-210.

4. Kuznetsova, S.V. Phase portraits of parts relative and angular matching at automated assemblage/ S.V. Kuznetsova, A.L. Simakov// *Assembly in Mechanical Engineering. Instrument-Making*. - 2013. - №2. - pp. 12-20.
5. Kuznetsova, S.V. Evaluation of automated assembly system effectiveness by method of phase space/ S.V. Kuznetsova// *Proceedings of the IV-th Inter. Scientific-Eng. Seminar "Modern techniques in Assembly" (Moscow, October 22-23, 2015 / University of Mechanical Engineering; under the editorship of I.N. Zinina*. - M.: MSEU, 2015. - pp. 135-145.

Статья поступила в редакцию 11.02.2016 г.

Рецензент: д.т.н., профессор

КГТА им. Дегтярева

Житников Ю.З.

**Сведения об авторах:**

**Кузнецова Светлана Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры «Приборостроение» Ковровской

**Kuznetsova Svetlana Vladimirovna**, Academic degree: Can.Eng. Academic status: Assistant Prof. Position: Assistant Prof. of the Dep. "Instrument-Making",

государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева, e-mail: [svkyzniecova@gmail.com](mailto:svkyzniecova@gmail.com).

Place of employment: FSBEI HVE "Degtyaryov State Technological Academy of Kovrov", e-mail: [svkyzniecova@gmail.com](mailto:svkyzniecova@gmail.com).