

УДК 621.757  
DOI: 10.12737/23194

А.Л. Симаков, С.В. Кузнецова, А.Н. Рожков

## ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ

Предложены критерии для сравнительного анализа методов адаптации положения соединяемых деталей при автоматизированной сборке. Определены уровни детализации математических моделей методов адаптации, для каждого из которых установлены показатели эффективности. Приведен

пример определения значений предложенных критериев.

**Ключевые слова:** ориентация детали, угловое совмещение, адаптирующее устройство, автоматизированная сборка, показатели эффективности.

A.L. Simakov, S.V. Kuznetsova, A.N. Rozhkov

## EFFICIENCY INDICES OF METHODS AND MEANS IN AUTOMATED PARTS ASSEMBLY

The efficiency assessment of methods and means of automated assembly is necessary at the development of means for automated technological operations. As a rule, one uses efficiency indices in design options of automated assembly devices. In the paper there are offered efficiency criteria for methods and means of automated assembly which can be used at the stages of designing assembly devices. The efficiency of an automated parts combination is defined mainly by the indices of carrying out the stages of position adaptation of parts to be connected. As criteria for the comparison of algorithms of combining there are offered characteristics of program trajectories of matching en-

sured by that or other adaptation way. At the development of a structure chart of the device as a main index is a controllability of the device expressed by the smallest value of the own frequency of the device according to the coordinates of adaptation. At the final stage of the development of design variants of the device as a criterion there is offered the application of the ratio of structural elements rigidity of an adjusting surface to the shown rigidity of a shifting element including also the rigidity of a part to be connected.

**Key words:** part orientation, angular matching, adapting device, automated assembly, efficiency indices.

### Введение

Эффективность применения того или иного метода адаптации положения деталей при автоматизированной сборке определяется результатами управления движением соединяемой детали. Оценка эффективности управления совмещением сопрягаемых поверхностей может быть проведена по следующим показателям:

- начальное рассогласование сопрягаемых поверхностей, при котором обеспечивается надежное совмещение поверхностей (выраженное в отношении к габаритным размерам соединяемой детали);

- время, затраченное на адаптацию соединяемой детали;

- погрешность приведения соединяемой детали в согласованное положение.

Эти показатели позволяют оценить эффективность автоматизированного совмещения деталей только для конкретных средств адаптации. Между тем на ранних стадиях проектирования при выборе метода адаптации необходимо производить сравнение ожидаемой эффективности методов совмещения. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность введения критериев для сравнения методов адаптации на разных уровнях обобщения при их описании.

### Этапы адаптации положения детали при автоматизированной сборке

Наиболее общее описание методов управления ориентацией соединяемой детали получено в виде целевых функций [1]. Такое описание позволяет абстрагироваться от целого ряда параметров, формализовав при этом единственный наиболее важный показатель метода – алгоритм совмещения сопрягаемых поверхностей. Процесс адаптации положения соединяемой детали при автоматизированной сборке для большинства модулей соединений может быть разделен в пространстве и во времени на два этапа [2]:

- предварительная (относительная) ориентация детали при движении по первому участку программной траектории, обеспечивающая совмещение начала подвижной системы координат, связанной с соединяемой деталью, с началом базовой системы координат;

- окончательная (угловая) ориентация детали при движении по второму участку программной траектории, обеспечивающая автоматизированное совмещение модулей базирующих поверхностей деталей.

Цели управления для этих этапов различны, следовательно, могут быть различны и методы управления движением детали.

Исходя из цели управления на начальном участке программной траектории совмещения деталей, будем считать, что координатами адаптации (управляемыми координатами) являются линейные смещения системы координат, связанной с соединяемой деталью, относительно программной траектории. Обозначим радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с началом связанной подвижной системы координат,  $\bar{q}(t)$ , а радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат с точкой программной траектории, –  $\bar{q}_F(t)$  (рис. 1). Подвижная система координат может быть связана как с соединяемой деталью, так и с ее элементами. Во втором случае подвижных систем координат может быть несколько, и радиус-вектор следует относить к каждой из них.

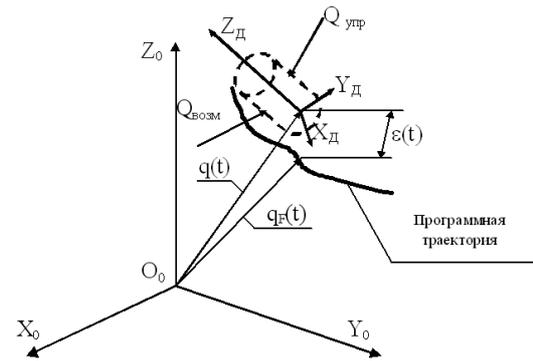


Рис. 1. Схема перемещения соединяемой детали на первом этапе адаптации

Рассогласование между этими векторами в данный момент времени характеризуется величиной  $\varepsilon$ . Для достижения цели первого этапа движения соединяемой детали возможны разные варианты управления положением начала системы координат  $X_d Y_d Z_d$ , непосредственно связанные с видом программной траектории. При этом должно формироваться управляющее воздействие  $\bar{Q}_{упр}$ , учитывающее программное и действительное значения координат. Отклонения от программного движения связаны с действием возмущающих факторов  $\bar{Q}_{возм}$ .

Цель управления на втором этапе – угловое совмещение сопрягаемых поверхностей, поэтому координатами адаптации являются углы поворота соединяемой детали. Число этих координат изменяется от двух до трех в зависимости от модуля соединения. Особенностью управления на этом этапе следует считать отсутствие конкретной программной траектории. На втором этапе адаптации движение детали может осуществляться по любой из множества траекторий, удовлетворяющих условию

$$\Theta_i(t) \leq \theta_i(t), T_1 \leq t \leq T,$$

где  $\Theta_i(t)$  – текущее значение  $i$ -й координаты адаптации в момент времени  $t$ ;  $\theta_i(t)$  – предельное значение  $i$ -й координаты адаптации в момент времени  $t$ .

Схема перемещения соединяемой детали на втором этапе адаптации приведена

на рис. 2. Координатами адаптации здесь

Перемещение соединяемой детали производится по одной из программных траекторий, расположенных внутри поверхности  $\Sigma$ . В процессе перемещения система координат  $X_d Y_d Z_d$ , связанная с соединяемой деталью 1, изменяет угловые положения в соответствии с приведенными условиями. Предельные положения оси

являются угловые координаты  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ .  $Z_d$  для моментов времени  $t_{j-1} < t_j < t_n$  обозначены соответственно  $Z_{j-1}, Z_j, Z_n$ . Линейное рассогласование систем координат  $X_d Y_d Z_d$  и  $X_0 Y_0 Z_0$ , связанной с базовой деталью 2, в момент времени  $T_j$  не должно превышать величины  $\Delta$ , определяемой условиями собираемости.

### Показатели эффективности методов и средств автоматизированной сборки

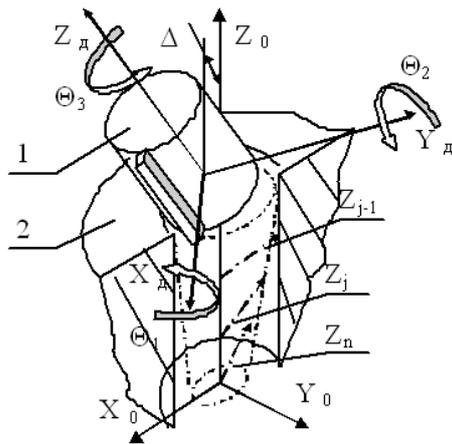


Рис. 2. Схема перемещения соединяемой детали на втором этапе адаптации

Поскольку алгоритм совмещения определяется видом программной траектории движения детали, в качестве критериев для сравнения алгоритмов совмещения могут быть предложены характеристики программных траекторий. К ним относятся:

– отношение числа координат адаптации  $k$  к числу управляемых координат  $l$ :

$$\chi_{21} = \min(\omega_{oi}); \quad i = k,$$

где  $k$  – число координат адаптации.

С учетом ограничений на этот параметр и его зависимости от параметров соединяемой детали можно определить границы применимости тех или иных видов обратных связей (и, следовательно, способов совмещения) для групп деталей с разными массогабаритными характеристиками.

$$- \chi_{11} = \frac{k}{l};$$

– отношение габаритного размера детали  $r_o$  к длине управляемого перемещения  $R$ :

$$\chi_{12} = \frac{r_o}{R}.$$

При этом оценки применимости того или иного метода будут носить приближенный характер, требующий дальнейшего уточнения в процессе детализации в описании метода.

Вторым уровнем детализации метода совмещения следует считать разработку структурных схем устройств адаптации, реализующих способ управления движением детали. Основное внимание при этом уделяется структуре обратных связей, так как именно они обеспечивают динамические и метрологические характеристики устройства. Поэтому основным показателем, определяющим возможность замыкания данного вида обратных связей, является управляемость устройства, выражаемая наименьшим значением собственной частоты устройства по координатам адаптации:

Дополнительным показателем, позволяющим оценить возможность изменения параметров обратных связей в требуемых пределах для формирования поисковых режимов работы устройства, является производная переменной собственной частоты по входному параметру устройства  $S_{ex}$ :

$$\chi_{22} = \frac{\partial \omega_0}{\partial S_{ex}}.$$

Эти показатели позволяют оценить динамику изменения характеристик обратных связей в зависимости от изменения входных переменных.

Третий уровень детализации – это выбор элементов структурной схемы, то есть конструктивная проработка способа совмещения. С учетом основных функций средства адаптации его конструктивный вариант должен включать следующие структурные компоненты:

- базовую установочную поверхность;
- сопряженную установочную поверхность;
- перемещающий элемент, преобразующий движение рабочего органа в движение сопрягаемой детали по координатам адаптации или обеспечивающий движение сопрягаемой детали по траектории поиска согласованного положения.

При конструктивной реализации перечисленных структурных компонентов должны обеспечиваться следующие системозначимые свойства:

- установочные поверхности должны реализовать ограничивающие связи с ориентирующими поверхностями базовой и сопрягаемой деталей за счет физико-механических свойств материалов, геометрических параметров и допусков на исполнительные размеры и взаимное расположение поверхностей;

- перемещающий элемент должен реализовать преобразующую связь с сопряженной ограничивающей поверхностью за счет геометрических параметров и определенной жесткости конструкции, обеспечивающих требуемый уровень статических и динамических погрешностей преобразования перемещений рабочего органа.

Указанные связи должны иметь активный (т.е. направленный) и нестационарный (зависящий от времени) характер.

### Пример определения показателей эффективности для разных методов автоматизированной сборки деталей

В качестве примера рассмотрим схемы адаптирующих устройств, реализующих различные методы совмещения деталей:

нарный (зависящий от времени) характер. В качестве показателей, формализующих наличие или отсутствие системозначимых свойств, предлагаются относительные конструктивные характеристики установочных поверхностей и перемещающего элемента. Для определения характера связей целесообразно использовать отношение жесткости конструктивных элементов установочной поверхности к приведенной жесткости перемещающего элемента, включающей и жесткость соединяемой детали:

$$\chi_{31} = \frac{C_y}{C_{np}},$$

где  $C_y$  – жесткость элементов установочной поверхности;  $C_{np}$  – приведенная жесткость перемещающего элемента.

При значениях  $\chi_{31} \geq 1$  связи, реализуемые установочными поверхностями, будут иметь ограничивающий характер. При значениях  $\chi_{31} \leq 1$  связи носят ориентирующий характер. В качестве характеристики преобразующих связей перемещающего устройства предлагается рассматривать относительное перемещение соединяемой детали по координатам адаптации:

$$\chi_{32} = \frac{r}{S},$$

где  $r$  – перемещение детали по координате адаптации;  $S$  – перемещение рабочего органа сборочной системы.

При  $\chi_{32} \geq 1$  преобразователь эффективно обеспечивает закон перемещения соединяемой детали, при  $\chi_{32} \leq 1$  преобразующая связь неэффективна.

Предлагаемые критерии для сравнения методов и средств адаптации приведены в табл. 1.

- адаптирующее устройство с упругим базированием соединяемой детали;
- адаптирующее устройство с переменными геометрическими параметрами;

Таблица 1

## Критерии для сравнения методов и средств адаптации

№	Этап разработки (уровень детализации)	Критерии для сравнения
1	Выбор метода совмещения (метода управления движением соединяемой детали)	Параметры программной траектории $\chi_{11}$ , $\chi_{12}$
2	Выбор способа совмещения (разработка структурной схемы устройства)	Показатели управляемости $\chi_{21}$ , $\chi_{22}$
3	Выбор элементной базы (разработка конструктивных вариантов устройства)	Характеристики структурных компонентов $\chi_{31}$ , $\chi_{32}$

- адаптирующее устройство с переменными упруго-инерционными параметрами.

Конструктивные схемы устройств приведены в табл. 2.

Схема 1 реализует управляющее воздействие на соединяемую деталь путем

замыкания обратной связи по усилию. Эта схема осуществляет способ упругого базирования, который является одной из вариаций метода стабилизации движения соединяемой детали [3].

Таблица 2

## Конструктивные схемы устройств адаптации

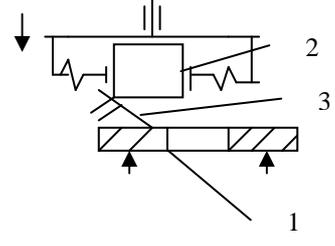
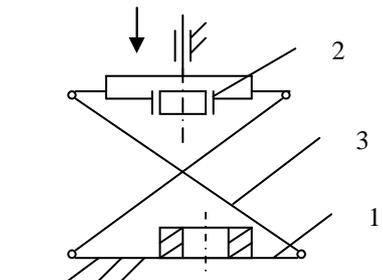
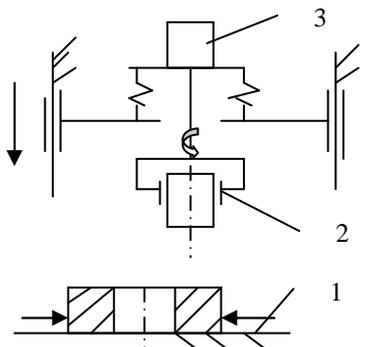
№	Конструктивная схема	Реализация структурных компонентов	Примечание
1		1 - базовая установочная поверхность; 2 - сопряженная установочная поверхность; 3 - перемещающий элемент	Устройство функционирует только при силовом замыкании кинематической цепи
2		1 - базовая установочная поверхность; 2 - сопряженная установочная поверхность; 3 - перемещающий элемент	Перемещающий элемент выполнен в виде линейчатой поверхности однополостного гиперболоида
3		1 - базовая установочная поверхность; 2 - сопряженная установочная поверхность; 3 - перемещающий элемент	Устройство функционирует при силовом замыкании кинематической цепи

Схема 2 обеспечивает управляющее воздействие как на соединяемую, так и на базовую детали. Адаптирующее устройство реализуется в виде упругого подвеса соединяемой детали и линейчатой поверхности с изменяемыми геометрическими параметрами, выполняющей функцию перемещающего элемента как для базовой, так и для соединяемой деталей. В соответствии с классификацией такая схема является вариантом метода позиционного управления базовой деталью [4].

Схема 3 обеспечивает управляющее воздействие на соединяемую деталь. Адаптирующее устройство состоит из упругого подвеса с переменной угловой жесткостью и дополнительного двигателя, задающего вращение соединяемой детали вокруг оси симметрии [5]. Это устройство относится к системам, реализующим метод самонаведения детали (или автоматического поиска).

Оценим рассматриваемые схемы по критерию управляемости, т.е. по наименьшим значениям собственной частоты устройства по координатам адаптации.

Для схемы 1 выражение для собственной частоты устройства по координате адаптации  $r$  [6] имеет вид

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_r \left( 1 + \frac{c_z}{2c_r} \left( ctg^2 \varepsilon + \frac{ctg \varepsilon - f}{ctg \varepsilon + f} \right) \right)}{m \frac{1}{\sin^2 \varepsilon} - \frac{f(1 - ctg^2 \varepsilon)}{1 + fctg^2 \varepsilon}},$$

где  $c_r$  – жесткость упругого подвеса по координате адаптации;  $m$  – масса соединяемой детали;  $c_z$  – жесткость упругого подвеса по координате управления;  $f$  – коэффициент трения между соединяемой деталью и направляющей поверхностью;  $\varepsilon$  – угол между образующей направляющей поверхности и осью управляющего перемещения (конструктивный параметр устройства).

Для второй схемы выражение для собственной частоты устройства по координате адаптации имеет вид

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3 \pi E d^4 l^3 [1 - ftg \alpha(S)] n(S)}{32 m \sum_{i=1}^{n(S)} a_i^3(S) [l - a_i(S)]^3}},$$

где  $m$  – масса соединяемой детали;  $E$  – модуль упругости материала стержня;  $d_c, l_c$  – диаметр и длина стержня;  $f$  – коэффициент сухого трения;  $a_i(S)$  – расстояние от неподвижной опоры стержня до точки контакта с соединяемой деталью;  $\alpha(S)$  – угол поворота стержня в радиальной плоскости;  $n(S)$  – число стержневых элементов, участвующих в адаптации, для текущего перемещения  $S$  рабочего органа.

Для схемы 3 выражение для собственной частоты колебаний устройства по координате  $\Theta$  (угол нутации) имеет вид

$$\omega_0 = \left\{ \begin{array}{l} \left[ -\Omega^2 + \frac{K_1}{J_1 \left( 1 + \chi \frac{l_y^2}{l^2} \right)} + \frac{K_2}{J_1 \left( 1 + \chi \frac{l_\Delta^2}{l_y^2} \right) \left( 1 + \frac{Vt}{a - a_2} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \frac{m_y g (l_2 - 2b) \left( 1 + \frac{\chi(l - 2b)}{l_2 - 2b} \right)}{2J_1 \left( 1 + \chi \frac{l_y^2}{l^2} \right)} \\ \frac{m_y g (1 + 2\chi) + C_1(a_1 - b) \left[ 1 - \frac{C_2(a_2 - b)}{C_1(a_1 - b)} \right] Vt +}{J_1 \left( 1 + \chi \frac{l_\Delta^2}{l_y^2} \right)} \\ \frac{C_1 + C_2}{J_1 \left( 1 + \chi \frac{l_y^2}{l^2} \right)} V^2 t^2 \end{array} \right\} \Gamma$$

где  $\Omega$  – угловая скорость вращения детали;  $K_1, K_2$  – угловые жесткости пружин патрона и упругого подвеса;  $J_1$  – момент инерции адаптирующего устройства;  $V$  – скорость перемещения адаптирующего устройства;  $a, a_2$  – геометрические параметры устройства;  $m_y$  – масса устройства вращения;  $l_y, l_\Delta, l, b$  – линейные размеры устройства;  $C_1, C_2$  – линейные жесткости пружин патрона и упругого подвеса;  $\chi$  – отношение массы соединяемой детали к массе устройства вращения.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Для схемы 1 существуют ограничения, связанные с обеспечением требуе-

мой жесткости упругих элементов подвеса для деталей с малыми массой и размерами ( $d < 10$  мм). При этом жесткости по координате адаптации должны иметь малые значения ( $c_r < 100 \text{ Нм}^{-1}$ ). Для деталей больших масс и габаритных размеров требуемые значения жесткостей имеют высокий уровень, что снижает чувствительность адаптирующего устройства и точность позиционирования детали относительно программной траектории.

2. Для схемы 2 значения собственных частот не зависят от начального расхождения сопрягаемых поверхностей и значительно (более чем на порядок) превышают значения соответствующих частот устройства с упругим базированием детали. Снижение собственных частот с возрастанием размеров соединяемых деталей происходит медленнее, чем в устройстве с упругим базированием детали. Из оценочных расчетов следует, что сборка деталей с большими массогабаритными параметрами может привести к снижению управляемости устройства.

### Заключение

Предлагаемые показатели эффективности автоматизированной сборки деталей позволяют дать объективную оценку средств автоматизации сборочных операций на разных стадиях их разработки, начиная с выбора метода автоматизирован-

3. Для схемы 3 графики изменения собственной частоты показывают, что при относительно больших массах соединяемой детали происходит снижение начального значения собственной частоты устройства по углу нутации. Переход в эту область для деталей относительно малой массы (до  $\chi = 0,5$ ) происходит при меньших перемещениях устройства. Для деталей с большими массами возможны случаи, при которых переход к неустойчивому состоянию (начало поискового движения) может достигаться при значениях перемещений, близких к максимально допустимым (например конструкцией упругого подвеса). Это приведет к затягиванию поискового движения в результате уменьшения шага расходящейся спиральной траектории или, в худшем случае, к сохранению устойчивого положения системы и воспроизведению круговой траектории движения детали. Поэтому для устройств с переменной угловой жесткостью подвеса предпочтительнее соединяемые детали относительно малой массы.

ного совмещения деталей. Эти показатели могут быть использованы для определения областей применимости тех или иных методов и средств автоматизированной сборки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житников, Ю.З. Обоснование эффективных методов и средств адаптации для автоматизации сборочных операций/ Ю.З.Житников, Б.Ю.Житников, А.Л.Симаков// Конструкторско-технологическая информатика - 2000: тр. 1V междунар. конгресса: в 2 т. - М.: Станкин, 2000. - Т. 1. - С. 190-192.
2. Симаков, А.Л. Согласование этапов ориентации присоединяемой детали при движении по поисковой программной траектории совмещения/ А.Л.Симаков, Д.А.Симаков// Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2009. - №6. - С. 20-22.
3. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах/ Л.С.Ямпольский, М.Н.Полищук. - Киев: Техника, 1988. - 175 с.
4. Симаков, А.Л. Обоснование выбора кинематической схемы устройства пассивной адаптации и ее конструктивная реализация/ А.Л.Симаков, О.Н.Кабаева// Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2007. - №2. - С. 20-25.
5. Пат. RU 2207944 7В 23Р 19/10. Способ наживления и сборки деталей, сопрягаемых по цилиндрическим поверхностям с гарантированным зазором, и устройство для его осуществления/ Ю.З.Житников, А.Л.Симаков, М.В.Федотов. - Бюл. № 19 от 10.07.03.
6. Симаков, А.Л. Обоснование границ применимости методов адаптации для автоматизированной сборки/ А.Л.Симаков// Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2001. - №3. - С. 14-16.

1. Zhitnikov, Yu.Z. Substantiation of effective methods and means of adaptation for automation of assembly operations/ Yu.Z.Zhitnikov, B.Yu.Zhitnikov, A.L.Simakov// *Design-Technological Informatics - 2000: Proceedings of the IV-th Inter. Congress*: in 2 Vol. - M.: Stankin, 2000. - Vol. 1. - pp. 190-192.
2. Simakov, A.L. Agreement of orientation stages of parts to be connected at motion through search program trajectory of matching/ A.L.Simakov, D.A.Simakov// *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument-making*. - 2009. - №6. - pp. 20-22.
3. *Optimization of Technological Processes in Flexible Industrial Systems*/ L.S.Yampolsky, M.N.Polishchuk. - Kiev: Technique, 1988. - pp. 175.
4. Simakov, A.L. Substantiation of kinematics choice of passive adaptation device and its design realization/ A.L.Simakov, O.N.Kabayeva// *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument-making*. - 2007. - №2. - pp. 20-25.
5. Pat. RU 2207944 7B 23P 19/10. Method for nut and assembly of parts mated on cylindrical surfaces with ensured clearance and device for its carrying out/ Yu.Z.Zhitnikov, A.L.Simakov, M.V.Fedotov. – *Bull. № 19 of 10.07.03*.
6. Simakov, A.L. Substantiation of limits for applicability of adaptation methods for automated assembly / A.L.Simakov// *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument-making*. - 2001. - №3. - pp. 14-16.

*Статья поступила в редколлегию 15.02.2016.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева  
Житников Ю.З.*

#### Сведения об авторах:

**Симаков Александр Леонидович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Приборостроение» Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева, e-mail: [alsimakov@mail.ru](mailto:alsimakov@mail.ru).

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

**Simakov Alexander Leonidovich**, D. Eng., Prof., Head of the Dep. "Instrument-making", FSBEI HVE "Degtyaryov Technological Academy of Kovrov" (Federal State Budget Educational Institution of Higher Vocational Education "Degtyaryov State Technological Academy of Kovrov", Kovrov), e-mail: [alsimakov@mail.ru](mailto:alsimakov@mail.ru).

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

**Рожков Александр Николаевич**, ст. преподаватель кафедры «Приборостроение» Ковровской государственной технологической академии им. В.А. Дегтярева, e-mail: [ralexandr@rambler.ru](mailto:ralexandr@rambler.ru).

**Kuznetsova Svetlana Vladimirovna**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Instrument-making", FSBEI HVE "Degtyaryov Technological Academy of Kovrov", e-mail: [svkyznecova@gmail.com](mailto:svkyznecova@gmail.com).

**Rozhkov Alexander Nikolayevich**, Senior Lecturer of the Dep. "Instrument-making", FSBEI HVE "Degtyaryov Technological Academy of Kovrov", e-mail: [ralexandr@rambler.ru](mailto:ralexandr@rambler.ru).