

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОСТИ ПРОЦЕССА СБОРКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ В МНОГОЗВЕННЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЯХ

Н. А. ЗАДОРИНА¹, В. В. НЕПОМИЛУЕВ²

¹zadorina@rsatu.ru, ²vvvnn@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»
(РГАТУ имени П. А. Соловьева)

Поступила в редакцию 28.01.2020

Аннотация. Рассмотрены возможности обеспечения устойчивости процесса сборки изделий машиностроения на основе метода индивидуального подбора деталей путем использования компьютерных технологий и вероятностно-статистических моделей. Приведены результаты исследования робастности процесса сборки машин, содержащих многозвенные размерные цепи, с использованием метода индивидуального подбора. Показана невосприимчивость результата процесса сборки при использовании алгоритма частичного случайного перебором к существенным изменениям значений параметров закона распределения случайной величины, характеризующей размеры комплектующих деталей.

Ключевые слова: сборка; размерная цепь; индивидуальный подбор деталей; компьютерное моделирование; робастность; качество.

ВВЕДЕНИЕ

Метод индивидуального подбора деталей основан на принципе подбора деталей до сборки таким образом, чтобы они в максимально возможной степени компенсировали погрешности изготовления друг друга [1]. В настоящее время метод подбора используется при изготовлении особо точных изделий и реализуется в основном вручную, что неизбежно ограничивает количество рассматриваемых вариантов и, следовательно, достигаемое качество. В связи с этим данный метод обладает чрезвычайно высокой трудоемкостью, и далеко не всегда используются его потенциальные преимущества. Часто индивидуальный подбор используется неявно, например, когда качество собираемого изделия определяется совокупностью нескольких параметров соединяемых объектов, а формально описывается – для упрощения – только одним.

Метод индивидуального подбора деталей целесообразно использовать в тех случаях, когда:

- имеющееся оборудование и процессы не позволяют изготавливать детали, качество которых обеспечивало бы возможность использования методов взаимозаменяемости;
- методы компенсации (регулировка и пригонка) использовать либо невозможно, либо слишком сложно.

С точки зрения организации процесса сборки важен факт, что точность, достигаемая этим методом, носит вероятностный характер и зависит от достаточно большого количества разнородных факторов, например количества подбираемых звеньев в размерной цепи, вида закона распределения размеров составляющих звеньев и его параметров [2]. Таким образом, в отличие от методов взаимозаменяемости, метод индивидуального подбора чувствителен к некон-

тролируемым «шумам» (по Г. Тагути [2]) технологических процессов изготовления деталей.

В связи с этим для практического использования метода индивидуального подбора деталей необходимо обеспечить устойчивость, или робастность, процесса сборки. Робастность – свойство статистического метода, характеризующее независимость влияния на результат исследования различного рода выбросов, устойчивости к помехам. Понятие робастности процесса сборки подразумевает устойчивость функциональных характеристик этого процесса к воздействию факторов, вызывающих их нарушение [2].

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА СБОРКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ В МНОГОЗВЕННЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЯХ

К факторам, вызывающим неустойчивость функциональных характеристик процесса сборки по методу индивидуального подбора деталей (порождающим, по Г. Тагути, «шумы» процесса), можно отнести возмущения, которые приводят к изменению результата, а именно:

– неконтролируемые изменения контролируемых параметров качества деталей, например закона распределения размеров и его параметров (чертеж и технические условия на изготовление детали содержат требования к границам допусков контролируемых параметров качества деталей, но не регламентируют, каким образом должны распределяться действительные параметры качества внутри этих допусков);

– изменение неконтролируемых параметров качества деталей, например характера отклонения формы и относительного расположения базовых поверхностей деталей;

– изменение технологических условий процесса сборки, например сборочных усилий;

– изменение внешней среды.

Перечисленные выше возмущения неизбежны в реальном производстве.

Задача обеспечения устойчивости процесса сборки по методу индивидуального

подбора деталей для двухзвенных размерных цепей была решена в работе [3], где была предложена методология обеспечения робастности процесса для таких размерных цепей при наличии «шумов».

Многозвенные размерные цепи обладают существенными специфическими особенностями по сравнению с двухзвенными:

– гораздо большие возможности подбора, поскольку резко увеличивается количество возможных вариантов сочетания имеющихся деталей в одном сборочном комплекте, что повышает как возможности взаимной компенсации погрешностей изготовления деталей, так и трудоемкость самого процесса подбора;

– алгоритм подбора, основанный на сортировке массивов размеров деталей, описанный и исследованный для варианта двухзвенных размерных цепей в работе [2], очевидно, будет не самым эффективным.

В работе [4] задача индивидуального подбора деталей в многозвенной размерной цепи рассмотрена как оптимизационно-комбинаторная. В такой постановке задача заключается в поиске минимума некоторой целевой функции на множестве допустимых решений. Множество допустимых решений представляет собой множество векторов – всех возможных вариантов соединений. Целевая функция во многом зависит от конкретной задачи. Например, в качестве целевой функции может быть ширина поля рассеяния замыкающего звена на множестве размеров всех полученных изделий. В [4] для моделирования процесса сборки с использованием индивидуального подбора деталей предложен приближенный метод решения – алгоритм частичного случайного перебора, в основу которого положены генетические алгоритмы оптимизации.

Генетический алгоритм – метод, основанный на использовании аналогий с природными процессами естественного отбора и генетических преобразований, предназначенный для решения оптимизационных задач. Отличительной особенностью является акцент на использовании оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов.

Алгоритм частичного случайного перебора представляет собой эвристический алгоритм поиска решения путем случайного подбора и комбинирования звеньев в размерной цепи. Возможные варианты соединения деталей в цепи получаются с помощью операции рекомбинации изделий-кандидатов, которые выбираются случайным образом.

Кратко идея алгоритма заключается в следующем:

1) формируется массив данных. Каждая строка массива – цифровая модель изделия;

2) для полученного решения вычисляется значение целевой функции. Все строки массива данных помечаются как необработанные;

3) пока не достигнут критерий окончания процесса поиска, из необработанных выбираются два изделия (строки, соответствующие этим изделиям, помечаются как обработанные) и проводится обмен частями (детальями) двух выбранных изделий с некоторой заданной вероятностью. Вычисляются размеры вновь полученных деталей с целью проверки возможности обмена. Если обмен признается целесообразным, то вносятся изменения в массив, иначе обмен отклоняется. Когда все строки обработаны (получено очередное решение), происходит переход к п. 2.

Исследование показало большие возможности метода при приемлемых затратах и целесообразность его практического применения. В связи с этим для практического применения метода подбора необходимо исследование робастности процесса сборки.

В ходе выполнения этого исследования в программе MS Excel было выполнено компьютерное моделирование процесса сборки размерной цепи, полное описание которого представлено в работе [4], а основная суть заключается в компьютерном моделировании процесса сборки с помощью MS Excel. Для реализации этого:

– генерировались соответствующие массивы данных, имеющие случайный разброс

и заданное среднее значение размеров деталей, которые имитировали составляющие звенья рассматриваемой размерной цепи;

– закон распределения размеров деталей – нормальный;

– количество значений в каждой выборке – 5;

– статистическая обработка проводилась по результатам 1000 экспериментов;

– для сравнения аналогичные исследования проводились также для алгоритма с сортировкой, описанного в работе [2], и алгоритма полного перебора.

Результаты компьютерного моделирования представлены ниже.

Эксперимент 1.

Исследовалось влияние варьирования средней величины одного из составляющих звеньев размерной цепи на ширину поля рассеяния замыкающего звена для трехзвенной размерной цепи.

Параметры моделирования:

– количество составляющих звеньев размерной цепи $n = 3$;

– параметры распределения размеров деталей: стандартное отклонение $\sigma = 0,3$;

– варьируется средняя величина составляющего звена размерной цепи (1; 1,5; 2; 2,5; 3).

Полученные результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Величины полей рассеяния размеров замыкающего звена по результатам компьютерного моделирования с варьированием средней величины одного из составляющих звеньев размерной цепи

Алгоритм подбора	Средняя величина варьируемого составляющего звена				
	1	1,5	2	2,5	3
Алгоритм с частичным перебором	0,396	0,386	0,426	0,424	0,403
Алгоритм с сортировкой	0,736	0,731	0,734	0,755	0,806
Полный перебор	0,396	0,373	0,426	0,424	0,403

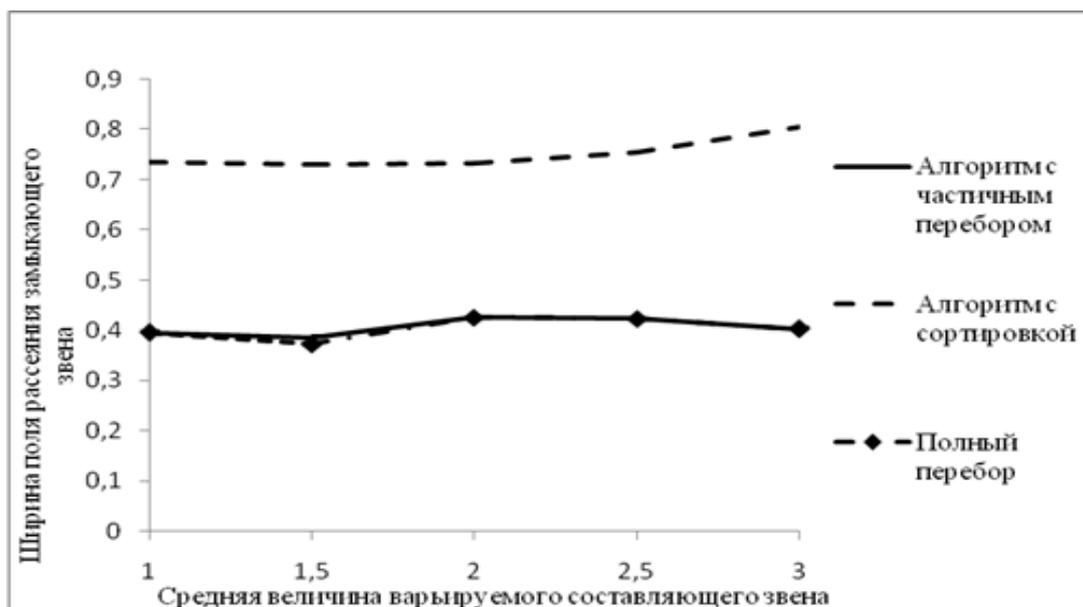


Рис. 1. Величины полей рассеяния размеров замыкающего звена для эксперимента 1

Эксперимент 2.

Исследовалось влияние варьирования величины стандартного отклонения размера одного из составляющих звеньев на величину поля рассеяния замыкающего звена трехзвенной размерной цепи.

Параметры моделирования:

- количество составляющих звеньев размерной цепи $n = 3$;
- параметры распределения размеров деталей: среднее значение 1;
- стандартные отклонения размера одного из составляющих звеньев варьируются от $\sigma = 0,3$ до $\sigma = 0,9$.

Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Величины полей рассеяния замыкающего звена при варьировании величины стандартного отклонения размера одного из составляющих звеньев размерной цепи

Алгоритм подбора	$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,45$	$\sigma = 0,6$	$\sigma = 0,9$
Алгоритм с частичным перебором	0,396	0,616	0,818	1,126
Алгоритм с сортировкой	0,736	0,744	0,898	1,633
Полный перебор	0,396	0,601	0,810	1,054

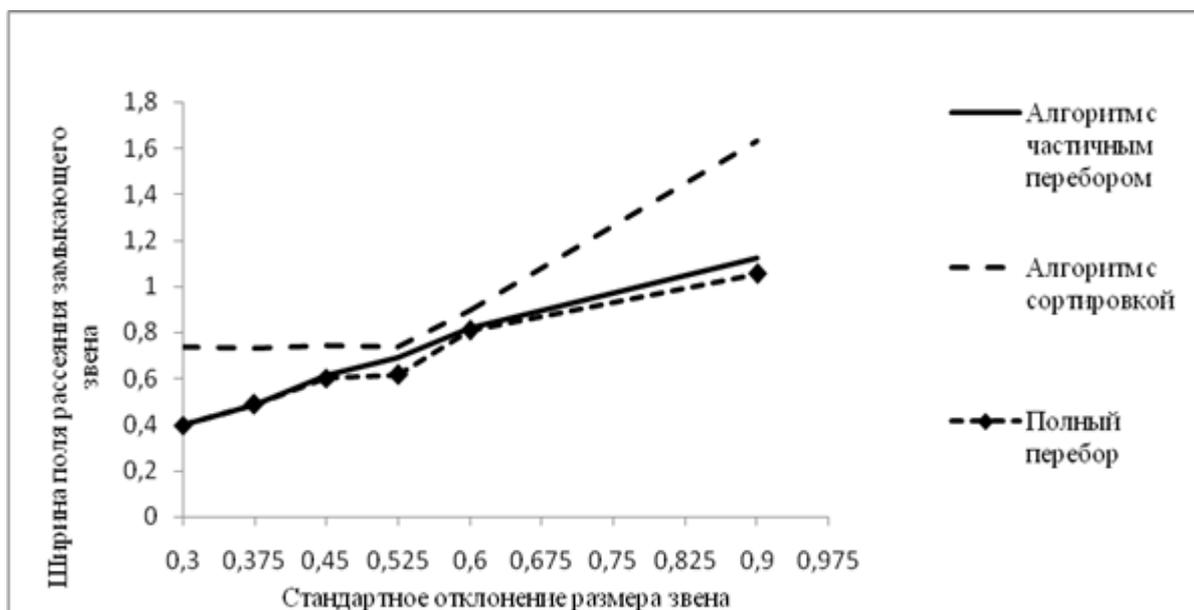


Рис. 2. Величины полей рассеяния размеров замыкающего звена для эксперимента 2

Эксперимент 3.

Исследовалось влияние варьирования средних величин двух составляющих звеньев размерной цепи на ширину поля рассеяния замыкающего звена для трехзвенной размерной цепи.

Параметры:

- количество составляющих звеньев размерной цепи $n = 3$;
- параметры распределения размеров деталей: среднее значение 1, стандартное отклонение $\sigma = 0,3$;
- варьируется средний размер двух составляющих звеньев от 1 до 3.

Полученные результаты представлены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

Величины полей рассеяния замыкающего звена при варьировании величин средних размеров двух составляющих звеньев размерной цепи

Алгоритм подбора	Средние величины варьируемых составляющих звеньев				
	1	1,5	2	2,5	3
Алгоритм с частичным перебором	0,396	0,362	0,302	0,300	0,317
Алгоритм с сортировкой	0,736	0,741	0,738	0,740	0,741
Полный перебор	0,396	0,360	0,288	0,292	0,297

Эксперимент 4.

Исследовалось влияние варьирования величин стандартных отклонений размеров двух составляющих звеньев на величину поля рассеяния замыкающего звена трехзвенной размерной цепи.

Параметры:

- количество составляющих звеньев размерной цепи $n = 3$;
- параметры распределения размеров деталей: среднее значение 1, стандартное отклонение $\sigma = 0,3$;
- варьируется разброс стандартных отклонений размеров двух составляющих звеньев от $\sigma = 0,3$ до $\sigma = 0,9$.

Полученные результаты представлены в табл. 4 и на рис. 4.

Таблица 4

Величины полей рассеяния замыкающего звена при варьировании величин стандартных отклонений размеров двух составляющих звеньев размерной цепи

Алгоритм подбора	$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,45$	$\sigma = 0,6$	$\sigma = 0,9$
Алгоритм с частичным перебором	0,396	0,304	0,270	0,349
Алгоритм с сортировкой	0,736	0,412	0,542	0,654
Полный перебор	0,396	0,155	0,269	0,349

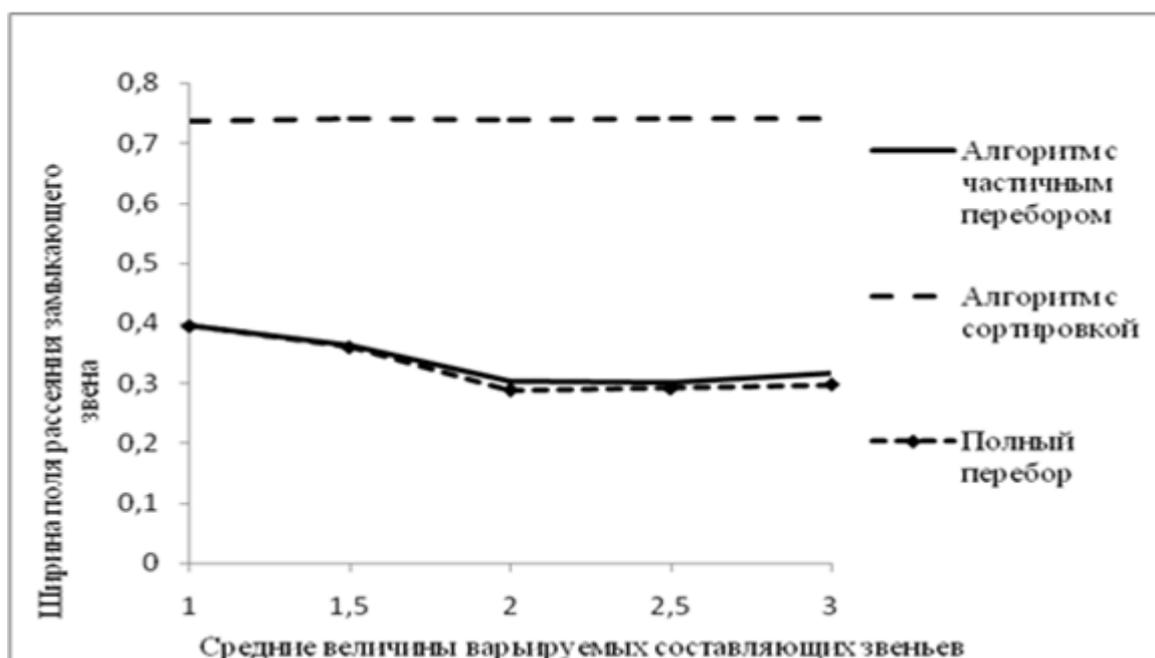


Рис. 3. Величины полей рассеяния размеров замыкающего звена для эксперимента 3

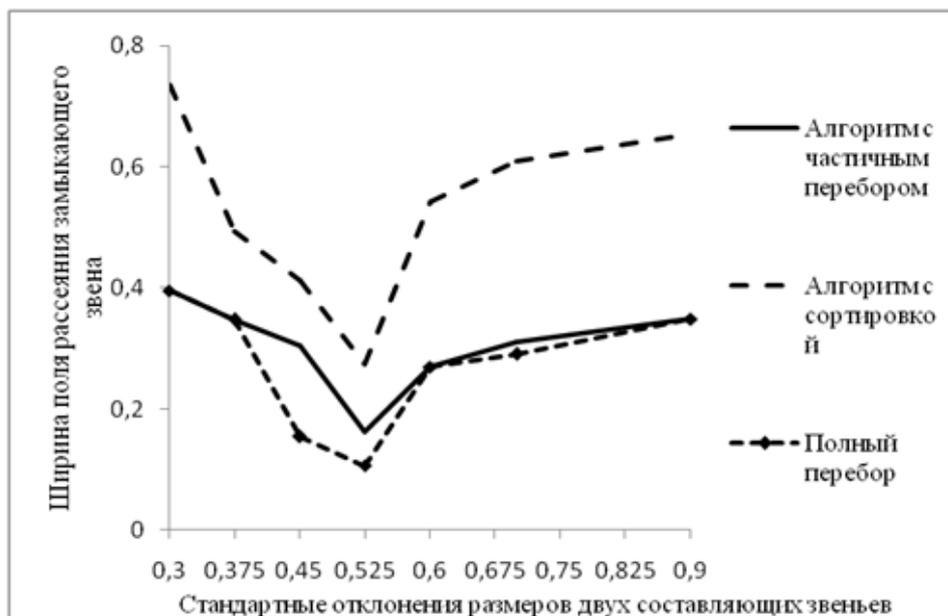


Рис. 4. Величины полей рассеяния размеров замыкающего звена для эксперимента 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты исследования робастности процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей. В результате проведенных экспериментов с имитационной моделью было установлено, что:

– индивидуальный подбор деталей перед сборкой в многозвенных размерных цепях позволяет резко снизить, теоретически почти до нуля, погрешность замыкающего звена размерной цепи;

– алгоритм с частичным перебором является наиболее эффективным: при невысокой трудоемкости в многозвенных размерных цепях позволяет таким образом подобрать собираемые детали, что они практически полностью взаимно компенсируют погрешности изготовления друг друга;

– приведенные исследования демонстрируют невосприимчивость результата процесса сборки при использовании алгоритма с частичным перебором к существенным изменениям значений параметров закона распределения случайной величины, характеризующей размеры комплектующих деталей, и несущественность возникающих отклонений;

– разработки специальной методики обеспечения робастности процесса сборки, позволяющей удерживать результат сборочного процесса в нужных границах допуска, в данном случае не требуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В. Ф., Непомилуев В. В., Семенов А. Н. Обеспечение качества изделий при сборке. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 204 с. [V. F. Bez'yazychny, V. V. Nepomiluev, A. N. Semenov, *Workpieces quality assurance at assembly*, (in Russian). Moscow: Izdatel'skij dom "Spektr", 2012.]
2. Непомилуев В. В., Олейникова Е. В., Семенов А. Н. Метод индивидуального подбора деталей как основа обеспечения качества сборки высокоточных изделий // Вестник РГТУ им. П. А. Соловьева. 2016. № 4 (39). С. 37–42. [V. V. Nepomiluev, E. V. Oleynikova, A. N. Semyonov, "Details individual selection technique as a basis of quality assurance at high-precision products assembly," (in Russian), in *Vestnik RGATU im. P. A. Solovyov*, no. 4 (39), pp. 37-42, 2016.]
3. Непомилуев В. В., Олейникова Е. В., Тимофеев М. В. Обеспечение устойчивости процесса сборки на основе метода индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 11. С. 7–12. [V. V. Nepomiluev, E. V. Oleynikova, M. V. Timofeev, "The improving of stability of the assembly process on the basis of individual component selection," (in Russian), in *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, no. 11, pp. 7-12, 2015.]
4. Задорина Н. А., Непомилуев В. В. Исследование возможности повышения качества сборки на основе использования метода индивидуального подбора деталей // Вестник РГТУ им. П. А. Соловьева. 2018. № 4 (47). С. 84–89. [N. A. Zadorina, V. V. Nepomiluev, "Research on the possibilities of assembly quality enhancement on the basis of details individual selection method implementation," (in Russian), in *RGATU im. P. A. Solovyova*, no. 4 (47), pp. 84-89, 2018.]

ОБ АВТОРАХ

ЗАДОРИНА Наталья Александровна, ст. преп. каф. МПО ЭВС. Дипл. инженер-программист (РГАТА, 1995). Готовит дис. об обеспечении качества сборки на основе метода индивидуального подбора деталей.

НЕПОМИЛУЕВ Валерий Васильевич, проф. каф ОПиУК. Дипл. инженер-механик (РАТИ, 1981). Д-р техн. наук по технологии изготовления ГТД (РГАТА, 2000). Иссл. в обл. обеспечения качества сборки высокоточных изделий.

METADATA

Title: Study of robustness of the Assembly process based on the method of individual selection of parts in multi-dimensional chains.

Authors: N. A. Zadorina¹, V. V. Nepomiluev²

Affiliation:

Federal State-Financed Educational Institution of High Professional Education «P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University», Russia.

Email: ¹zadorina@rsatu.ru, ²vvvvnn@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 1 (87), pp. 10-16, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The possibilities of ensuring the stability of the Assembly process of engineering products on the basis of the method of individual selection of parts through the use of computer technology and probabilistic and statistical models. The results of the study of the robustness of the Assembly process of machines containing multi-link dimensional chains using the method of individual selection are presented. It is shown that the result of the Assembly process is not susceptible to significant changes in the parameters of the distribution law of a random variable that characterizes the dimensions of component parts when using the partial random search algorithm.

Key words: assembly; dimensional chain; individual selection of parts; computer simulation; robustness; quality.

About authors:

ZADORINA, Natalya Alexandrovna, teacher, Dept. of software for electronic computing tools. Programmer engineer (RGATA, 1995).

NEPOMILUYEV, Valeriy Vasilyevich, Prof., Dept. of quality management. Dipl. mechanical engineer (РАТИ, 1981). Dr. of Tech. Sci. (RGATA, 2000).