

УДК 621.753.1/2(035)

О.В. Филипович, доцент, канд. техн. наук,

А.П. Мартынов, доцент, канд. техн. наук,

В.П. Кноблех,

Ю.Д. Михайлов

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053;

Донбасская государственная машиностроительная академия,

ул. Шкадинова, 72, Донецкая обл., г. Краматорск, Украина, 84313;

НИИПТМаш, ул. Орджоникидзе, 10, Донецкая обл., г. Краматорск, Украина, 84313

E-mail: phiol@ukr.net

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Построена математическая модель процесса селективной сборки прецизионных соединений питателей смазочных систем. Рассмотрена задача оптимизации параметров данного процесса на основе построенной модели.

Ключевые слова: *прецизионное соединение, селективная сборка, питатель смазочной системы, математическая модель, оптимизация.*

Метод групповой взаимозаменяемости получил широкое распространение при сборке прецизионных узлов, какими, например, являются, золотниковые и плунжерные пары узлов смазочной аппаратуры. Согласно данному методу предварительно аттестуют размеры сопрягаемых поверхностей и селективно образуют сборочные комплекты из деталей одноименных групп.

Целью работы является разработка модели для оптимизации формирования сборочных комплектов и технологического воздействия на параметры сборочного процесса на примере прецизионных соединений питателей для двухмагистральных централизованных смазочных систем (ГОСТ 6911 -71).

Рассматривается процесс селективной сборки двух прецизионных элементов питателя (плунжера или золотника и корпуса) по параметрам x_1 и x_2 . Указанная задача является широко известной в литературе задачей однопараметрического селективного комплектования и сборки двух деталей [1, 2]. Схема комплектования показана на рисунке 1 (обозначения соответствуют принятым в [1]).

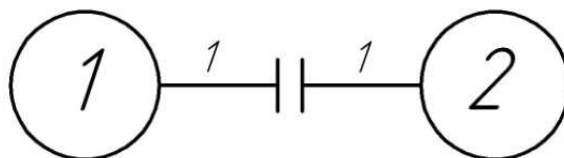


Рисунок 1 – Схема однопараметрического комплектования двух деталей

Предположим, что эти параметры являются независимыми случайными величинами (СВ), имеющими плотности распределения $f_1(x)$ и $f_2(x)$. В данном случае выходной параметр y (зазор), являющийся замыкающим звеном рассматриваемой размерной цепи и получаемый при сборке, связан с исходными линейной зависимостью

$$y = x_2 - x_1. \quad (1)$$

Плотность распределения СВ y можно определить как плотность распределения разности двух независимых случайных величин

$$f_S(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(k-x) f_2(k) dk. \quad (2)$$

Соединение указанных деталей является подвижным, т.е. собираемость узла возможна при обеспечении условия

$$\varphi_1(x) = y = x_2 - x_1 \geq 0. \quad (3)$$

Назначение питателя состоит в периодической подаче пластичных материалов и смазочных масел к трущимся поверхностям. При приемо-сдаточных испытаниях изготовленных питателей утечки масла

через поршень при наибольшем рабочем давлении не должны превышать от 1 до 6 капель в минуту в зависимости от номинального подаваемого объема в один отвод. Поэтому основным параметром качества соединения является гидроплотность T , т.е. количество смазочной жидкости, протекающей через прецизионное соединение под определенным давлением за фиксированное время, определяемая гидравлическими испытаниями узла. Собранные питатели будут иметь требуемую гидроплотность в пределах установленных значений $[T_{\min}, T_{\max}]$ если значение величины y удовлетворяет условию

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max},$$

которое можно представить следующим образом:

$$\phi_2(x) = y_{\min} - y \leq 0; \quad (4)$$

$$\phi_3(x) = y - y_{\max} \leq 0. \quad (5)$$

Вероятность появления собранных узлов с гидроплотностью T , не выходящей за пределы $[T_{\min}, T_{\max}]$ будет определяться вероятностью выхода зазоров за предельные значения

$$\bar{P}_S = 1 - \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f_S(x) dx,$$

где $f_S(x)$ определяется соотношением (2). Собираемость питателей по гидроплотности будет составлять

$$P_T = 1 - \bar{P}_S.$$

На практике на величину выходного параметра и качество изделия оказывают влияние не только значения линейных размеров сопрягаемых деталей, но и некоторые непрогнозируемые случайные факторы, к которым можно отнести их отклонения формы, расположения и шероховатость поверхности. Для их учета в модель необходимо ввести случайные величины ω . Полученная выше величина зазора может определяться по формуле (1) при условии, что, например, сопрягаются две поверхности, имеющие номинальную форму. С учетом отклонения формы зазор y определим как

$$y(x, \omega) = x'_2 - x'_1 + \omega, \quad (6)$$

где параметры x'_1 и x'_2 соответствуют диаметрам прилегающих поверхностей (окружностей, профилей) сопрягаемых деталей, являющихся базой, служащей для нормирования и количественной оценки отклонений формы. Из литературы известно, что отклонение формы и размер связаны между собой вероятностной зависимостью. Для определения распределения зазоров необходимо знать эту зависимость, которая в полной мере может быть отражена двумерной плотностью распределения $f(x, \omega)$. Определение указанной плотности обычно вызывает огромные затруднения и в большинстве случаев ее вычисляют экспериментально для конкретных деталей и их сопряжений. С учетом написанного выше условия (3...5) примут вид

$$\phi'_1(x, \omega) = x'_2 - x'_1 + \omega \geq 0; \quad (6)$$

$$\phi'_2(x, \omega) = y_{\min} - y(x, \omega) \leq 0; \quad (7)$$

$$\phi'_3(x, \omega) = y(x, \omega) - y_{\max} \leq 0. \quad (8)$$

Соотношения (6...8) могут быть положены в основу математической модели для оптимизации параметров сборочного процесса.

Постановку задачи определения оптимальных параметров селективной сборки можно осуществить следующим образом. Пусть параметры сопрягаемых деталей имеют расширенные допуски на изготовление, обозначаемые T_1 и T_2 соответственно. Перед сборкой детали сортируются по группам с полями групповых допусков T_i^j (i – номер детали, $i = \overline{1, 2}$, j – номер селективной группы) таким образом, что

$$T_i^j = \{x_i^{(j)} \leq x_i < x_i^{(j+1)}\}, \quad j = \overline{1, 2, \dots, l_i}, \quad i = \overline{1, 2},$$

где $x_i^{(j)}$, $x_i^{(j+1)}$ – границы j -й селективной группы для i -й детали, l_i – количество селективных групп для i -й детали. Для рассматриваемого случая $T_1 = T_2$, $l_1 = l_2 = l$. Для удобства дальнейшего анализа параметров процесса сборки условно совместим поля допусков деталей с соответствующими кривыми распределения (рисунок 2).

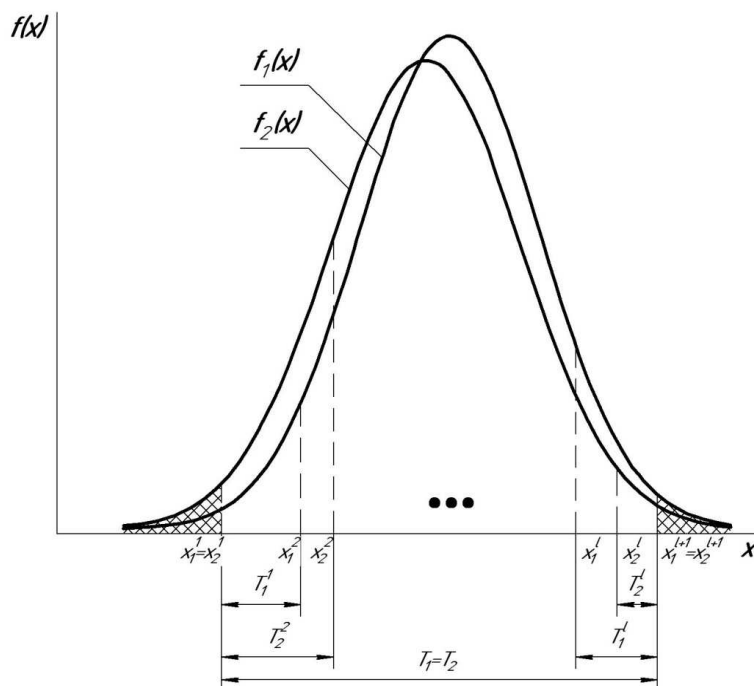


Рисунок 2 – Возможное относительное расположение кривых распределения $f_1(x)$ и $f_2(x)$ при совмещении полей допусков

В общем случае можно положить, что:

1) сопрягаемые параметры имеют различные распределения (или одинаковые распределения с различными числовыми характеристиками случайных величин);

2) при одинаковом количестве селективных групп и расширенных допусках T_i могут различаться величины групповых допусков T_i^j ;

3) исходя из условий решаемой задачи комплектование деталей из селективных групп будет одновариантным, т.е. детали из j -й группы первого типа комплектуются с контрдетальями из одноименной группы второго типа.

В j -ю селективную группу детали i -го типа попадают с вероятностью

$$P_i^j = \int_{x_i^j}^{x_i^{j+1}} f_i(x) dx, \quad j=1,2,\dots,l, \quad i=\overline{1,2}.$$

В группы с условными номерами 0 и $l+1$, лежащими за пределами границ допусков $T_1=T_2$ (заштрихованные области на рисунке 2) детали попадают с вероятностями

$$P_i^0 = \int_{-\infty}^{x_i^1} f_i(x) dx, \quad P_i^{l+1} = \int_{x_i^{l+1}}^{\infty} f_i(x) dx, \quad i=\overline{1,2}.$$

Сумма этих вероятностей составляет вероятность предварительного брака, детали из указанных групп исключены из процесса комплектования.

Вероятность получения сборочных комплектов (СК) j -го типа (тип соответствует номеру группы) можно определить соотношением [2]

$$I_{СК}^j = \min\{P_1^j, P_2^j\}.$$

Суммарная вероятность получения СК по всем селективным группам составляет

$$I_{СК} = \sum_{j=1}^l I_{СК}^j. \quad (9)$$

Вероятность появления некомплектных деталей, образующих в дальнейшем незавершенное производство, равна

$$P_{НП} = 1 - I_{СК}. \quad (10)$$

Имея полученные соотношения, можно поставить ряд задач, связанных с анализом, синтезом и оптимизацией процессов комплектования и селективной сборки. В качестве основного критерия может рассматриваться как получение максимально возможного числа сборочных комплектов

$$\max\{I_{СК}\},$$

так и сведение к минимуму количества незавершенного производства

$$\min\{P_{НП}\},$$

что является эквивалентным.

В качестве варьируемых переменных при решении подобных задач могут выступать:

- 1) количество селективных групп l ;
- 2) величины групповых допусков T_i^j ($j=1,2,\dots,l_i$, $i=\overline{1,2}$);
- 3) другие факторы, оказывающие влияние на вид плотностей распределения $f_i(x)$ ($i=\overline{1,2}$).

Рассмотрим практические аспекты решаемой задачи. В процессе изготовления питателя (рисунок 3) обрабатывают отверстия золотниковых 1 ($\varnothing 6$ мм) и плунжерных 2 ($\varnothing 10$ мм) пар, отверстия магистральных каналов 4 и соединительных каналов 3, 7 рассверливают и нарезают резьбы 5, 6 под пробки (рисунок 3, а). Как показали статистические исследования, на величину выходного параметра и качество изделия оказывают влияние не только значения линейных размеров, но и отклонения формы поверхности (рисунок 4), для учета которых, как указывалось выше, в модель введены СВ ω .

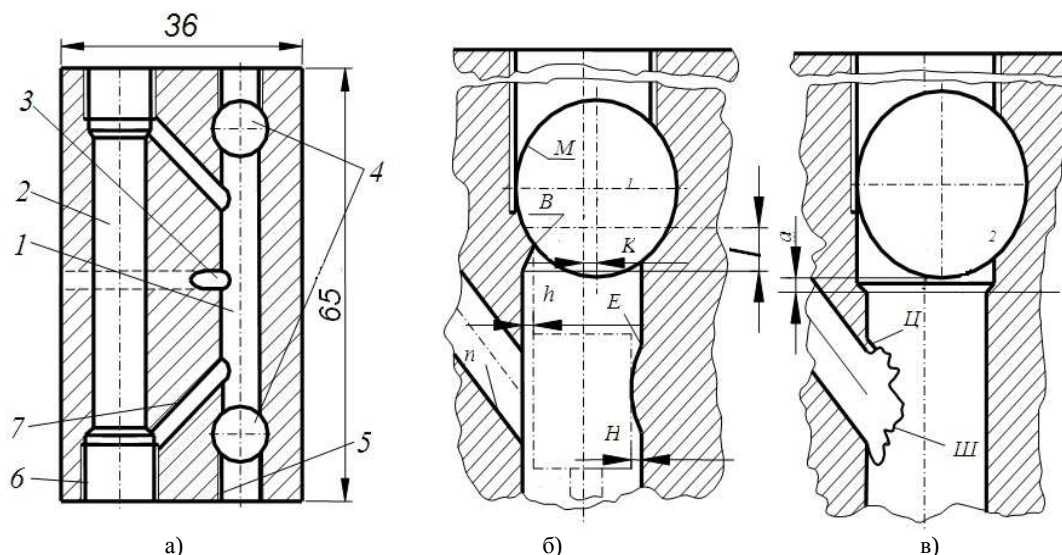


Рисунок 3 – Корпус питателя (а) и схема образующихся при обработке выступов (б) и заусенцев (в)

В результате проведенного статистического анализа точности отверстий 1, 2 (рисунок 3), было установлено, что широкие поля рассеивания размеров и формы не могут обеспечить заданные технические требования и точность соединений. Особенно большие технологические трудности вызывало достижение точности золотниковых отверстий, которые, имея малый диаметр (6мм) и значительную длину (отношение длины отверстия к диаметру равно 6), пересекаются соединительными и магистральными каналами.

Собираемость соединений с обеспечением гидроплотности затрудняется также тем, что на предприятии предельные размеры понимались так, как это рассматривается в стандартах ЕСПД для общего случая, то есть, на основе двухточечного измерения. Однако для рассматриваемых прецизионных соединений их целесообразно интерпретировать в соответствии с основным принципом ISO 8015 (согласно ГОСТ 25346-89 и ДСТУ ISO 286-1-2002 в таких случаях чертеж детали необходимо дополнить ссылкой «*Tolerancing ISO 8015*», а размер с предельными отклонениями — символом $\square$). При такой интерпретации предельным размером отверстия (см. рисунок 4) является диаметр наибольшего правильного воображаемого цилиндра, который может быть вписан в отверстие так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности на длине соединения (размер сопрягаемой детали идеальной геометрической формы, прилегающей к отверстию без зазора), не должен

быть меньше, чем предел максимума материала. При этом наибольший диаметр в любом месте отверстия, определенный путем двухточечного измерения, не должен быть больше, чем предел минимума материала. Кроме того, поскольку при таком толковании размеров наибольшие отклонения формы поверхности отверстия питателя по величине могут приводить к невозможности выполнять соединением служебное назначение, на наш взгляд, следует отдельно нормировать допуски овальности и прямолинейности отверстия.

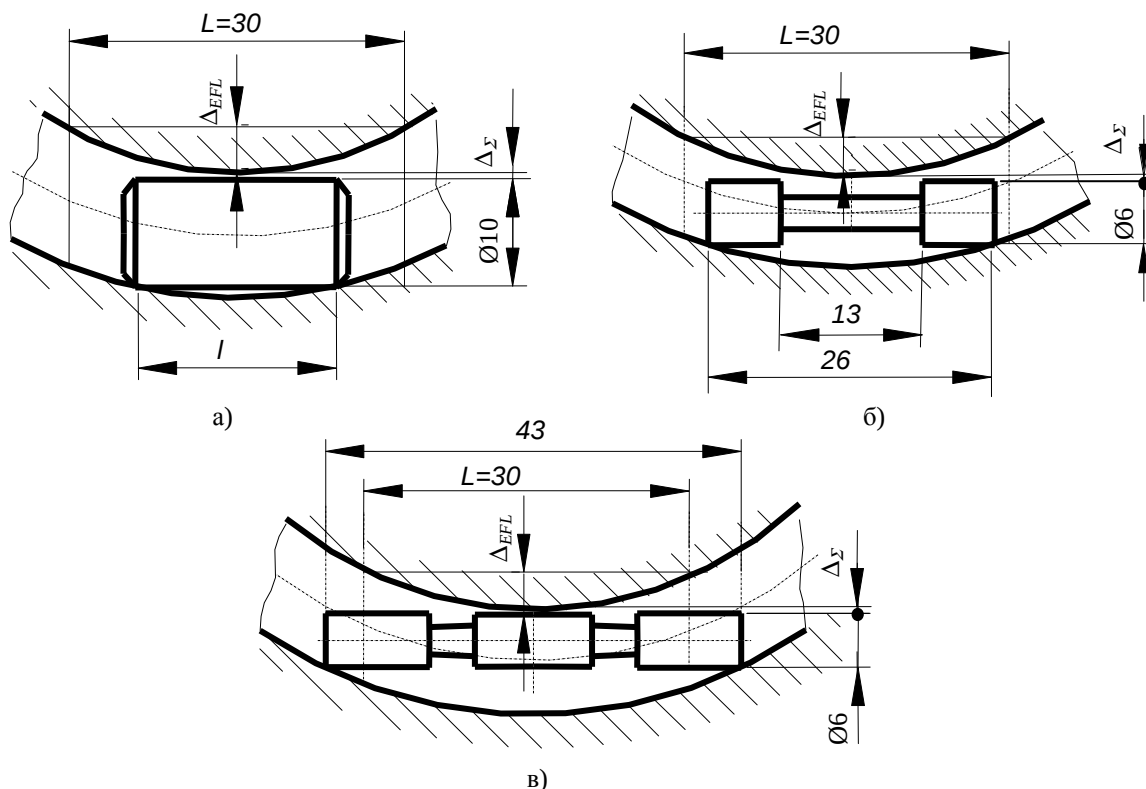


Рисунок 4 – Схема влияния отклонения от прямолинейности оси отверстия на собираемость соединения с а) плунжером; б) двухпорным золотником; в) трехпорным золотником

В результате проведенных исследований установлено, что основными трудноустраняемыми препятствиями на пути уменьшения зазора между деталями прецизионных пар и уменьшения поля рассеивания являются (см. рисунок 3, б,в): выступы (локальные отклонения формы) *Е* в золотниковом отверстии против его пересечения с соединительными каналами *П*, заусенцы *Ш* и выпучивания *Ц*, отклонение от прямолинейности и овальность отверстий, несовпадение *К* их с осью магистрального канала *М*, значительная шероховатость.

Были установлены причины появления указанных отклонений. Так, высота *H* указанных выступов зависит от конструкции прошивки, степени ее затупления, модулей упругости материала инструмента и детали. Появления выступов удалось избежать благодаря разработанной конструкции специальной, «заглаживающей» прошивки из твердого сплава ВК6М (таким образом, обработка этим инструментом дополняет известные [3] виды прошивания – выглаживающее и деформирующее).

Для устранения местных искривлений в начале отверстия отверстие просверливали, протягивали режущими и выглаживающими прошивками до окончательного размера, а затем рассверливали под пробки 5, 6 (см. рисунок 3, а), что позволило удалить искривленные участки. Образовавшиеся при этом кольцевые заусенцы по краям отверстия и местные выступы *В* удаляли специальной прошивкой (одновременно с удалением заусенцев *Ш* – см. рисунок 3, б,в).

Зазор в сопряжении как замыкающее звено размерной цепи

$$\Delta_{\Sigma} = S_{EFL} + \Delta_{EFK} + \Delta_{EFP} + S_{\min},$$

где Δ_{EFK} – отклонение формы отверстия ($\Delta_{EFK} = 3$ мкм); Δ_{EFP} – отклонение формы (овальность) золотника ($\Delta_{EFP} = 1$ мкм); $S_{\min}$ – минимально необходимый зазор ($S_{\min} = 1$ мкм). В результате установлено, что для четырех типоразмеров плунжеров и золотников требуется обеспечить отклонение от прямолинейности отверстия в пределах (соответственно) 15; 7; 9; 2,5 мкм.

На основе проведенных исследований разработан основной маршрут технологического процесса обработки корпусов питателей: сверление золотниковых и плунжерных отверстий 2 ружейными сверлами, прошивание золотниковых и плунжерных отверстий 1,2 режущими (из Р9) и до окончательного размера выглаживающими прошивками (из ВК6М), сверление магистральных каналов 4, соединительных каналов 3,7, рассверливание и нарезание резьбы 5,6 под пробки, цинкование корпуса, удаление заусенцев и налета цинка из золотниковых и плунжерных 2 отверстий специальными прошивками (из ВК6М).

Составлен также оптимальный маршрут обработки поверхностей золотников и плунжеров: предварительное и окончательное шлифование, промывка, шлифование финишное, промывка, предварительная сортировка на размерные группы с отклонением диаметров не более 0,002 мм, предварительная доводка, промывка, сортировка на размерные группы с отклонением диаметров не более 0,001 мм, окончательная доводка.

Отклонения формы рабочих поверхностей золотников и плунжеров, обеспечиваемые обработкой, составляют: конусообразность – 0,001 мм; овальность – 0,001 (золотники) и 0,002 (плунжеры). Шероховатость поверхности Ra 0,063...0,04 мкм. В соответствии с достигнутой точностью окончательно обработанных прецизионных отверстий, а также диаметров золотников и плунжеров допуски на их обработку приняты одинаковыми $T = 0,02$ мм.

Проведенные исследования показали, что с учетом допустимой утечки смазки максимальная величина зазора в сопряжении не должна превышать 0,007...0,01 мм. Минимально допустимая величина зазора принята 0,003 мм, равная максимальной погрешности геометрических форм окончательно обработанных отверстий. Таким образом, предельные отклонения зазора: $ei = +0,003$; $es = +0,007$.

Как показали расчеты, из условий обеспечения такого замыкающего звена при равномерной разбивке допуска на размеры золотников и плунжеров групповой допуск $T_{гр} = 0,002$ мм и, следовательно, количество групп $T/T_{гр} = 10$.

Сортировка золотников на размерные группы производилась с помощью специального прибора с двумя измерительными головками конструкции НИИ Измерений (г. Москва), а плунжеров – с помощью опикатора (в обоих приборах погрешность измерения составляла $\pm 0,0005$ мм).

Одна из задач оптимизации параметров рассматриваемого процесса селективной сборки прецизионных элементов питателей может быть сформулирована следующим образом: найти

$$\max \{I_{CK}(T_i^j, l)\}$$

при ограничениях

- 1) на максимально возможное число групп, введенное в соответствии с возможностями технологического, складского и других видов оборудования

$$l \leq l_{\max};$$

- 2) на предельные значения величин групповых допусков T_i^j , определяемые таким образом, чтобы собранное из соответствующих селективных групп изделие полностью удовлетворяло всем требованиям собираемости и качества (для рассматриваемого примера – либо соотношениям (3) – (5), либо – (6) – (8)).

Данная задача решается на этапе контроля и сортировки деталей. Задача, связанная с обеспечением минимального количества незавершенного производства путем управления параметрами процесса изготовления сопрягаемых поверхностей, рассмотрена в [4]. Алгоритм управления организуется следующим образом: объем выпуска одной из деталей (например, той, которую проще изготовить) внутри расширенного поля допуска разбивается на определенное количество неравных частей. Каждая часть изготавливается независимо от остальных при заданном смещении центра настройки основного технологического оборудования. Управляющими параметрами при этом являются количество частей, их центры настройки и объемы. Указанные параметры выбираются таким образом, чтобы незавершенное производство было минимальным.

В обоих случаях рассматриваются задачи многопараметрической оптимизации большой размерности, которые можно решить, применив специально разработанные алгоритмы и численные методы. Исходными данными для их решения являются:

- 1) вид плотностей распределения сопрягаемых параметров ($f_1(x)$, $f_2(x)$), который можно получить, произведя 100 %-ый контроль пробной партии изделий по параметру и обработав результаты измерений, сгладив эмпирические зависимости;

- 2) требования к выходному параметру собранного изделия, определяемые условиями собираемости и качества;

- 3) количественное значение величин расширенных допусков на изготовление T_i ($i = \overline{1,2}$).

4) вероятностные зависимости, связывающие исходный параметр со случайными величинами, влияющими на получение выходного параметра изделия;

5) другие данные, определяемые конкретной решаемой задачей (например, точность технологического и измерительного оборудования, наибольшее возможное количество числа селективных групп и др.).

Следует отметить, что для построения зависимостей, указанных в п. 4, применяют эвристические и экспериментальные функции, построенные с помощью статистических и других методов.

Решение данной задачи позволит получить оптимальное количество готовых изделий при неизменных требованиях к их качеству, а также осуществить рациональное управление процессами изготовления комплектующих, комплектования и сборки.

Перспективой дальнейших исследований в данной области является установление эмпирических вероятностных зависимостей между отклонениями формы и линейными размерами сопрягаемых элементов питателей, очевидно, являющимися зависимыми случайными величинами.

Библиографический список использованной литературы

1. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. — Л.: Политехника, 1991. — 303 с.
2. Буловский П.И. Автоматизация селективной сборки приборов / П.И. Буловский, П.И. Крылов, В.А. Лапухин. — Л.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
3. Розенберг М.А. Твердосплавные протяжки для обработки отверстий методом пластического деформирования / М.А. Розенберг. — К.: УкрНИИТИ, 1978. — 55с.
4. Копп В.Я. Одно- и многошаговое управление параметрами селективной сборки / В.Я. Копп, Н.В. Серова, О.В. Филипович // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь: СевНТУ, 2009. — Вып. 11. — С. 28–39.

Поступила в редакцию 04.07.2011 г.

Філіпович О.В., Мартинов А.П., Кноблех В.П., Михайлов Ю.Д. Математична модель для оптимізації параметрів процесу селективного складання прецизійних з'єднань

Побудовано математичну модель процесу селективного складання прецизійних з'єднань живильників мастильних систем. Розглянуто завдання оптимізації параметрів цього процесу на основі побудованої моделі.

Ключові слова: прецизійне з'єднання, селективне складання, живильник мастильної системи, математична модель, оптимізація.

Filipovich O.V., Martynov A.P., Knobloch V.P., Mikhaylov Yu.D. A mathematical model for optimizing parameters of the process of selective assemblage of precision connections

A mathematical model for the selective assembly process for precision connections of the lubricant systems feeders is developed. The article considers the problem of parameter optimization for the given process based on the model developed.

Keywords: precision connection, selective assembly, feeder of lubricant system, mathematical model, optimization.