

## МЕТОДИКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДБОРА ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕРВОПРИВОДОВ

© 2023

- А. В. Медведев** инженер-конструктор;  
Конструкторское бюро «Арматура» – филиал акционерного общества  
«Государственный космический научно-производственный центр  
имени М.В. Хруничева», г. Ковров;  
[mavrich@mail.ru](mailto:mavrich@mail.ru)
- Е. М. Халатов** доктор технических наук, профессор кафедры «Гидропневмоавтоматика  
и гидропривод»;  
Ковровская государственная технологическая академия  
имени В.А. Дегтярева, г. Ковров;  
[halatov@dksta.ru](mailto:halatov@dksta.ru)

Представлена методика подбора деталей и сборочных единиц (далее кратко – деталей) в комплекты для сборки партии электрогидравлических сервоприводов, исходя из измеренных (индивидуальных) механических и гидравлических характеристик деталей. Описан подготовительный этап: построение математической модели изделия, определение параметров деталей и регулировок, которые оказывают наибольшее влияние на параметры готовых изделий, формирование системы оценки качества изделий в партии, математическая формулировка задачи подбора деталей. Задача подбора деталей сформулирована как задача о назначениях в максиминной постановке. Представлен детерминированный алгоритм решения задачи, построенный на основе метода ветвей и границ и учитывающий то, что в процессе сборки приводов выполняются регулировки. Существенное сокращение количества шагов (итераций) при поиске оптимального распределения деталей по сборочным комплектам достигается за счёт выбранной математической формулировки задачи, а также за счёт выбранной стратегии подбора деталей в очередной сборочный комплект. Предложено в сборочные комплекты в первую очередь вовлекать «наиболее проблемные» детали, параметры которых не позволяют получить комплект, прогнозируемый показатель качества которого будет выше определённой величины. При этом негативное влияние этих деталей на параметры изделия компенсируется за счёт сочетания их в одном сборочном комплекте с прочими деталями. Показаны результаты математического моделирования сборки 992 приводов при случайном формировании сборочных комплектов и при индивидуальном подборе деталей. Моделирование показывает, что в результате внедрения индивидуального подбора деталей в соответствии с описанной методикой можно ожидать существенного сокращения разброса параметров готовых изделий в пределах партий, а также улучшения эксплуатационных качеств изделий. Представленная методика индивидуального подбора деталей может быть применена при сборке различных изделий.

*Селективная сборка; сборочный комплект; подбор деталей; математическое моделирование; оптимизация*

---

*Цитирование:* Медведев А.В., Халатов Е.М. Методика индивидуального подбора деталей для селективной сборки электрогидравлических сервоприводов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 67-78. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-67-78

Индивидуальный подбор деталей и сборочных единиц (кратко – деталей) как метод селективной сборки изделий предназначен для уменьшения разброса параметров изделий, собираемых из деталей, для которых установлены широкие поля допусков на значения отдельных параметров [1]. Согласно методу детали подбираются в сборочные комплекты исходя из измеренных (индивидуальных) значений их параметров так, что если отклонения параметров какой-либо детали от номинальных значений оказывают негативное влияние на параметры изделия, то они компенсируются за счёт параметров прочих деталей комплекта. Индивидуальный подбор деталей особо эффективен при

сборке сложных электрогидравлических устройств, параметры которых существенно зависят от механических и гидравлических характеристик деталей, на которые оказывает влияние большое количество производственных факторов, и не всегда возможно организовать изготовление составляющих деталей с достаточно малым разбросом таких характеристик.

Задачу распределения деталей по сборочным комплектам для сборки партии изделий на примере деталей двух типов, условно «валов» и «втулок», математически можно сформулировать как классическую двухиндексную задачу о назначениях [2]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M L_{ij} d_{ij} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^M d_{ij} = 1, j = \overline{1, M}; \sum_{j=1}^M d_{ij} = 1, i = \overline{1, M}; \\ d_{ij} = \{1, 0\}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, M}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_{ij}$  – показатель, характеризующий «потерю качества» изделия, собираемого из комплекта, в который входят  $i$ -й по порядку «вал» и  $j$ -я по порядку «втулка»;  $d_{ij}$  – элемент матрицы  $\|d_{ij}\|$ , который принимает значение 1, если  $i$ -й по порядку «вал» и  $j$ -я по порядку «втулка» подобраны в один комплект, принимает значение 0, если хотя бы одна из этих деталей подобрана в другой комплект. При решении задачи требуется найти матрицу  $\|d_{ij}\|$ , описывающую распределение деталей по сборочным комплектам.

Однако наибольшее практическое значение имеет задача подбора в комплекты трёх и более деталей. Такая задача о назначениях называется многоиндексной. Известные алгоритмы точного решения классической многоиндексной задачи о назначениях требуют большого количества вычислений. Поэтому чаще всего для индивидуального подбора деталей в сборочные комплекты используют эвристические алгоритмы [3; 4], разработанные для строго определённых изделий, алгоритмы с элементами случайного поиска [5 – 7]. И те и другие алгоритмы дают приближенное решение задачи типа (1). В литературе не представлено универсальной и отработанной методики индивидуального подбора деталей для сборки партии изделий путём оптимального распределения деталей по сборочным комплектам, которая могла бы найти широкое применение при сборке различных изделий.

Рассмотрим методику индивидуального подбора деталей для сборки партии изделий, основанную на решении задачи о назначениях, которая была опробована при сборке электрогидравлических сервоприводов ракетно-космической техники (далее – ЭГС, привод), продемонстрировала эффективность и может найти широкое применение при сборке различных изделий.

В качестве объекта сборки рассмотрим ЭГС, принципиальная схема которого показана на рис. 1. Привод предназначен для перемещения инерционного объекта на расстояние, пропорциональное входному электрическому сигналу, с требуемой динамической и статической точностью при воздействии различных нагрузок. Укрупнённо привод включает в себя: двухкаскадный электрогидравлический усилитель (ЭГУ), силовой гидроцилиндр, механизм обратной связи.

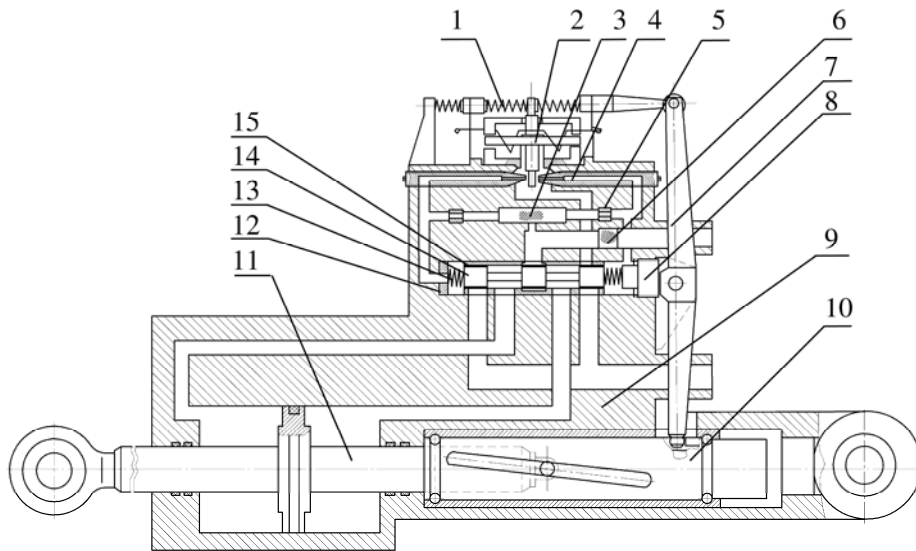


Рис. 1. Принципиальная схема привода:

- 1 – позиционная пружина; 2 – электромеханический преобразователь; 3 – фильтр; 4 – сопло;  
5 – дроссель; 6 – фильтр; 7 – рычаг; 8 – пробка; 9 – корпус; 10 – поворотный механизм;  
11 – шток-поршень; 12 – шайба; 13 – пружина; 14 – золотник; 15 – гильза

Первый каскад ЭГУ образуют электромеханический преобразователь (ЭМП) 2 и гидравлический мост, включающий в себя дроссели 5, сопла 4 и заслонку ЭМП. В линии питания первого каскада ЭГУ установлен фильтр 3. Второй каскад ЭГУ образуют золотник 14, гильза 15 и пружины 13. Нейтральное положение золотника в гильзе устанавливается с помощью регулировочной шайбы 12 и резьбовой пробки 8. Корпус ЭГУ совмещён с корпусом силового гидроцилиндра. Силовой гидроцилиндр включает в себя корпус 9, шток-поршень 11, фильтр 6. Механизм обратной связи включает в себя поворотный механизм 10, рычаг 7 и пружины 1.

Для организации индивидуального подбора деталей в сборочные комплекты, в первую очередь, необходимо:

- 1) выделить управляемые параметры изделия, на значения которых будет оказываться воздействие путём подбора деталей в комплекты;
- 2) определить какие детали будут подбираться в комплекты, какие параметры деталей при этом надо учитывать;
- 3) если изделие имеет места регулировки, то важно определить, позволяют ли они полностью компенсировать отклонения параметров деталей.

В ходе такого анализа задачи необходимо также среди всех параметров изделий выделить:

- 1) параметры изделия, по значениям которых контролируется качество сборки: при качественной сборке значения этих параметров не выходят за допустимые границы, возможное изменение их значений не рассматривается потребителем как повышение эксплуатационных качеств изделия;
- 2) параметры изделия, значения которых находятся в допустимых границах при любых сочетаниях параметров составляющих деталей, но возможное изменение их значений значимо для потребителя и рассматривается им как повышение эксплуатационных качеств изделия;
- 3) параметры изделия, значения которых при произвольном сочетании деталей могут выходить за пределы поля допуска.

В качестве управляемых параметров нужно выбирать параметры второй и третьей группы. Выбранные параметры изделия должны быть связаны через параметры подбираемых деталей и быть конкурирующими, когда воздействие на один параметр с целью улучшения его значения приводит к негативному изменению значения другого параметра изделия. В противном случае задачу можно упростить:

1) если параметры изделия зависят от параметров непересекающихся групп деталей – исходную задачу можно разбить на меньшие независимые задачи;

2) если значения двух параметров изделия одинаковым образом откликаются на изменение параметров одних и тех же деталей – имеет смысл выбрать в качестве управляемого тот параметр, к которому предъявляются более жёсткие требования.

Описанные выше действия направлены на максимальное упрощение задачи распределения деталей по сборочным комплектам за счёт сокращения количества управляемых параметров изделий, количества подбираемых деталей и учитываемых при этом регулировок. Анализ процесса сборки ЭГС и выражений, связывающих параметры деталей и параметры изделия, показал, что в ходе сборки необходимо обеспечить выполнение требований более чем к 14 параметрам промежуточных сборок и изделия в целом (9 из них – параметры готового изделия). Конструкция изделия имеет 4 места регулировки, однако данные регулировки позволяют лишь частично компенсировать отклонения параметров деталей от номинальных значений, придавая процессу сборки трудоёмкий итерационный характер [8]. В качестве управляемых параметров ЭГС были выбраны точки амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) системы «привод – стенд», имитирующей перемещаемый инерционный объект и упругость крепления привода:

– максимальная относительная амплитуда колебаний инерционного объекта в диапазоне частот управляющего сигнала до 10 Гц;

– фазовые запаздывания перемещения инерционного объекта при частотах управляющего сигнала 1, 2, 3, 4 и 5 Гц. К данным параметрам ЭГС предъявляются следующие требования:

1) максимальная относительная амплитуда колебаний инерционного объекта в диапазоне частот управляющего сигнала до 10 Гц должна быть не более  $A_{\max}$ ;

2) фазовые запаздывания перемещения инерционного объекта при частотах управляющего сигнала 1, 2, 3, 4 и 5 Гц должны быть не более  $\varphi_{1\max}$ ,  $\varphi_{2\max}$ ,  $\varphi_{3\max}$ ,  $\varphi_{4\max}$  и  $\varphi_{5\max}$  соответственно. На АЧХ и ФЧХ системы «привод – стенд» существенно влияют две регулировки: изменение расстояний между соплами и заслонкой ЭМП при нейтральном положении заслонки и изменение жёсткости пружин под торцами золотника (подбор пружин необходимой жёсткости из набора), причём по-разному на отдельные участки характеристики.

АЧХ и ФЧХ системы «привод – стенд» для опытного образца рассматриваемого ЭГС, накладываемые на АЧХ и ФЧХ ограничения и влияние регулировок на характеристики показаны на рис. 2. В качестве деталей, параметры которых существенно влияют на АЧХ и ФЧХ системы «привод – стенд», были выделены:

– ЭМП и его следующие параметры: коэффициент усиления по току и жёсткость механической характеристики, поперечная жёсткость трубчатой пружины;

– сопла ЭГУ и их параметры: удельная проводимость элемента сопло-заслонка, коэффициент чувствительности удельной проводимости элемента сопло-заслонка к изменению расстояния между соплом и плоскостью, диаметр отверстия сопла;

– дроссели ЭГУ и их гидравлические сопротивления;

– золотниковая пара (золотник с гильзой) и удельная проводимость окон золотниковой пары.

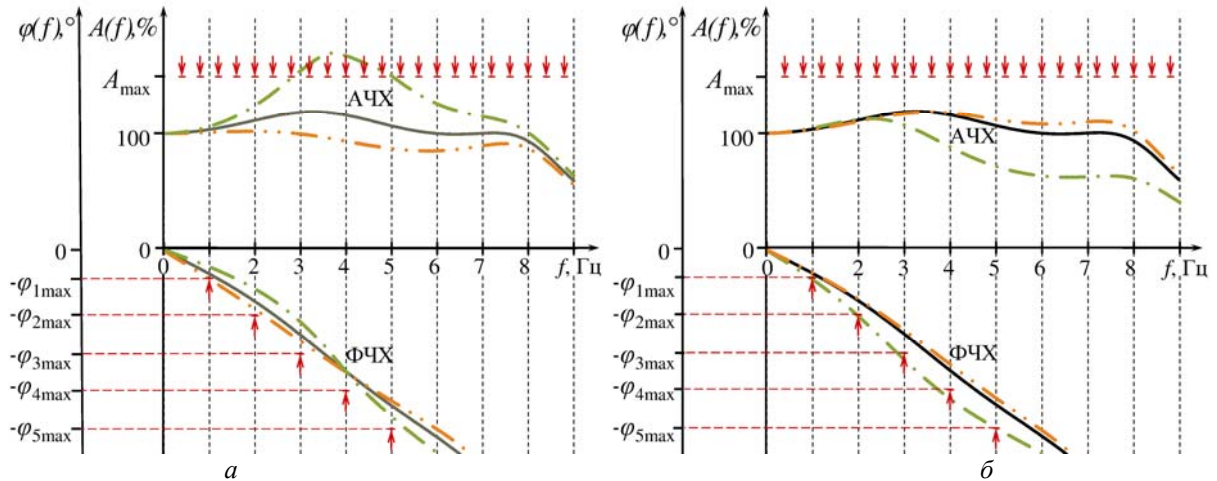


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ опытного образца ЭГС при изменении жёсткости пружин под торцами золотника (а) и расстояния между соплами и заслонкой ЭМП (б):

- АЧХ и ФЧХ собранного и отрегулированного привода;
- - - АЧХ и ФЧХ при установке минимального значения параметра регулировки;
- · · АЧХ и ФЧХ при установке максимального значения параметра регулировки

Очевидно сопла и дроссели ЭГУ должны подбираться в сборочные комплекты парами, когда у обоих сопел или дросселей в паре близкие параметры. Для сборки партии из  $M$  ЭГС должно быть изготовлено минимум  $M$  ЭМП,  $M$  пар сопел и дросселей, а также  $M$  золотниковых пар. Имеется по  $M$  деталей четырёх типов, из которых должна быть собрана партия ЭГС, отвечающая какому-либо критерию. Можно показать, что в таком случае существует  $(M!)^3$  вариантов распределения деталей по сборочным комплектам, при реализации каждого из которых будет получена партия ЭГС с уникальным набором параметров.

Для оценки возможности сборки изделий из подобранных деталей была принята система показателей качества сборочных комплектов, рассчитываемых на основе прогнозируемых значений параметров изделий, получаемых из этих комплектов [9]. Единичный показатель качества  $q^k$  сборочного комплекта по значению  $k$ -го параметра изделия было принято рассчитывать как отношение прогнозируемого запаса по значению параметра  $\Delta z_{np}^k$  к желаемому запасу по значению этого параметра  $\Delta z_{жс}^k$ :

$$q^k = \Delta z_{np}^k / \Delta z_{жс}^k, \quad (2)$$

где под запасом  $\Delta z^k$  по значению параметра понимается величина, характеризующая насколько значение  $z^k$   $k$ -го параметра изделия удалено от предельно допустимых значений (границ поля допуска)  $\{z_{\min}^k; z_{\max}^k\}$ :

$$\Delta z^k = \min \{z_{\max}^k - z^k; z^k - z_{\min}^k\}.$$

Желаемые запасы по значению того или иного параметра можно назначать исходя из опыта сборки изделий как максимальные практически достижимые запасы по значениям параметров или, исходя из погрешности прогноза характеристик собираемых из-

делий, пропорционально среднеквадратическому отклонению случайной составляющей ошибки прогноза.

Единичные показатели качества для ЭГС были назначены следующим образом:  $q^1$  – характеризует запас по значению максимальной относительной амплитуды колебаний инерционного объекта;  $q^2 - q^6$  – характеризуют запасы по значениям фазовых запаздываний перемещения инерционного объекта при частотах управляющего сигнала от 1 до 5 Гц. Обобщённый показатель качества  $Q$  сборочного комплекта по  $K$  ( $K=6$ ) единичным показателям было принято рассчитывать как:

$$Q = \min \{q^1; q^2; \dots; q^K\}. \quad (3)$$

Принятая система показателей качества сборочных комплектов обуславливает математическую формулировку задачи распределения деталей по сборочным комплектам в виде максиминной задачи о назначениях. Учитывая возможные значения обобщённых показателей качества сборочных комплектов, задачу распределения четырёх типов деталей по сборочным комплектам для сборки партии из  $M$  ЭГС математически можно сформулировать как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{i,j,k,l: d_{ijkl}=1} \{Q_{ijkl}\} \rightarrow \max; \\ \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M d_{ijkl} = 1, \quad i = \overline{1, M}; \quad \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M d_{ijkl} = 1, \quad j = \overline{1, M}; \\ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M d_{ijkl} = 1, \quad k = \overline{1, M}; \quad \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M d_{ijkl} = 1, \quad l = \overline{1, M}; \\ d_{ijkl} = \{1, 0\}, \quad i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, M}, \quad k = \overline{1, M}, \quad l = \overline{1, M}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $Q_{ijkl}$  – элемент матрицы  $\|Q_{ijkl}\|$  показателей качества сборочных комплектов, содержащий значение показателя качества комплекта из деталей первого, второго, третьего и четвёртого типа с условными номерами  $i, j, k$  и  $l$  соответственно.

Система показателей качества сборочных комплектов (2) – (3) и математическая формулировка задачи (4) логично вытекают из стремления получать партии изделий с гарантированными запасами по значениям отдельных параметров. Критерием оптимального распределения деталей по сборочным комплектам является то, что обобщённый показатель качества «наиболее проблемного» сборочного комплекта имеет максимальное значение. Наиболее проблемным сборочным комплектом является комплект, который имеет минимальное значение обобщённого показателя качества среди остальных комплектов для сборки партии изделий. Согласно прогнозу из такого комплекта будет собрано изделие, значение одного из параметров которого в относительном измерении ближе к границе допуска, чем значения любого параметра любого изделия из этой партии.

Распределение деталей по сборочным комплектам необходимо выполнять перед сборкой каждой партии изделий. Поиск оптимального распределения деталей по комплектам в соответствии с (4) состоит из двух этапов:

1) рассмотрение всех  $M^N$  возможных сочетаний деталей в комплектах и заполнение матрицы  $\|Q_{ijkl}\|$  обобщённых показателей качества сборочных комплектов;

2) собственно поиск оптимального распределения деталей путём неполного перебора вариантов распределения деталей по комплектам.

Важно отметить, что на первом этапе, если изделие имеет места регулировки, необходимо выполнять расчёт оптимальных регулировок для всех сочетаний деталей в сборочных комплектах. Для ЭГС оптимальные расстояния между соплами и заслонкой ЭМП при нейтральном положении заслонки и значение жёсткости пружин под торцами золотника рассчитывались совместно так, чтобы для каждого сочетания деталей получить максимальное значение обобщённого показателя качества сборочного комплекта.

Важная особенность математической формулировки задачи (4) в том, что решение многоиндексной максиминной задачи о назначениях требует меньше вычислений, чем решение классической многоиндексной задачи о назначениях. При этом стандартным методом решения оптимизационной задачи является метод ветвей и границ, который подразумевает неполный перебор вариантов распределения деталей по сборочным комплектам и выбор среди них оптимального. Самый очевидный подход для формирования очередного варианта комплектования – подбор деталей последовательно в каждый комплект путём перебора по порядку их условных номеров. Однако исследования показали, что количество рассматриваемых вариантов распределения деталей по сборочным комплектам может быть сокращено, если каждый раз выделять среди не подобранных деталей «наиболее проблемную» деталь. Это деталь, параметры которой не позволяют её подобрать в один комплект с остальными деталями так, чтобы значение обобщённого показателя качества комплекта было больше  $Q^*$ , где  $Q^*$  – переменная величина, определяемая при подборе деталей в очередной сборочный комплект. Остальные детали можно подобрать в сборочные комплекты с более высоким значением обобщённого показателя качества. Выделенная таким образом деталь должна подбираться в комплекты в первую очередь, пока имеются максимальное количество прочих деталей, параметры которых могут компенсировать негативное влияние её параметров на параметры готового изделия.

Для краткости порядок определения наиболее проблемной детали покажем на примере подбора в сборочные комплекты деталей двух типов. Пусть имеется матрица  $\|Q_{ij}\|$  обобщённых показателей качества сборочных комплектов для сборки партии из  $M$  изделий. В сборочные комплекты нужно подобрать «вал» (для нумерации валов используются индексы  $i$ ) и «втулку» (для нумерации втулок используются индексы  $j$ ). Вычислив максимальные значения элементов матрицы в строках и столбцах

$$\alpha_i = \max_{j=1..M} \{Q_{ij}\}, \quad \beta_j = \max_{i=1..M} \{Q_{ij}\},$$

можно утверждать, что  $\alpha_i$  – максимальное значение обобщённого показателя качества, которое может быть у сборочного комплекта с  $i$ -м валом;  $\beta_j$  – максимальное значение обобщённого показателя качества, которое может быть у сборочного комплекта с  $j$ -й втулкой.  $Q^*$  находим как минимальное значение среди элементов векторов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$Q^* = \min_{i=1..M; j=1..M} \{\alpha_i, \beta_j\}.$$

Если значение  $Q^*$  имеет  $i$ -й элемент вектора  $\alpha$ , то наиболее проблемной деталью является вал с порядковым номером  $i$ , если  $j$ -й элемент вектора  $\beta$  – то втулка с порядковым номером  $j$ . Определив индексы элемента матрицы  $\|Q_{ij}\|$  со значением  $Q^*$  можно

установить, с какими деталями необходимо подобрать в один сборочный комплект найденную деталь, чтобы максимально компенсировать негативное влияние её параметров на параметры готового изделия. Повторяя описанные действия, предварительно исключив из рассмотрения детали, ранее подобранные в сборочные комплекты, получим вариант распределения деталей по сборочным комплектам, который характеризуется набором обобщённых показателей качества:

$$\{Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_s^*, \dots, Q_M^*\}.$$

Можно показать что, если минимальное значение имеет первый элемент набора, наиболее проблемным является первый сборочный комплект, то полученный вариант распределения деталей является решением задачи в формулировке (4), решение найдено за один шаг. Если наиболее проблемным является любой другой  $s$ -й сборочный комплект,  $s \neq 1$ , то распределение деталей по сборочным комплектам необходимо повторить, изменив составы сборочных комплектов, подобранных до  $s$ -го, начиная с  $(s-1)$ -го комплекта. Для этого достаточно запретить подбор в один сборочный комплект деталей, подобранных в  $(s-1)$ -й комплект, и повторить описанную выше процедуру распределения деталей.

Кратко алгоритм распределения деталей по комплектам для случая произвольного количества типов подбираемых деталей можно сформулировать так:

1) вычисление для каждой неподбранной детали наилучшего значения обобщённого показателя качества изделия, которое может быть получено при её подборе в сборочный комплект, определение наиболее проблемной детали;

2) подбор сочетания найденной проблемной детали с прочими неподбранными деталями в очередной по порядку  $i$ -й сборочный комплект, характеризующийся лучшим значением обобщённого показателя качества;

3) повтор подбора деталей согласно пунктам 1) и 2) до тех пор, пока не будут подобраны детали в требуемое количество сборочных комплектов (если изготовлено ровно по  $M$  деталей каждого типа для сборки партии из  $M$  изделий, то подбор деталей в  $(M-1)$ -й сборочный комплект определяет состав  $M$ -го комплекта);

4) определение номера  $s$  наиболее проблемного сборочного комплекта;

5) повтор подбора деталей согласно 1) – 4) пока  $s > 1$ , начиная с подбора деталей в  $(s-1)$ -й сборочный комплект, исключая рассмотрение сочетания деталей, подбиравшихся в этот комплект ранее. Оптимальный вариант распределения деталей – один из рассмотренных вариантов распределения, характеризующийся наибольшим значением обобщённого показателя качества наиболее проблемного сборочного комплекта.

Реализация предложенного алгоритма распределения деталей по комплектам для сборки партии ЭГС показала, что в большинстве случаев решение задачи может быть найдено после рассмотрения небольшого количества вариантов распределения деталей. Так, в случае сборки ЭГС партиями по 8 изделий, когда существует более  $6 \cdot 10^{13}$  вариантов распределения деталей по сборочным комплектам, решения были найдены:

- в 47% случаев – при рассмотрении 1 варианта распределения деталей (за 1 шаг);
- в 19% случаев – при рассмотрении от 1 до  $10^2$  вариантов;
- в 14% случаев – при рассмотрении от  $10^2$  до  $10^4$  вариантов;
- в 11% случаев – при рассмотрении от  $10^4$  до  $10^6$  вариантов;
- в 6% случаев – при рассмотрении от  $10^6$  до  $10^8$  вариантов;
- в 3% случаев – при рассмотрении от  $10^8$  до  $10^9$  вариантов распределения деталей.



Для решения использовался персональный компьютер без распараллеливания процесса вычислений, алгоритм подбора деталей был реализован на интерпретируемом языке программирования, при этом в 80% случаев решение было найдено за несколько минут, в 3% случаев для поиска решения понадобилось более 8 часов.

Для оценки влияния индивидуального подбора деталей на управляемые параметры ЭГС была смоделирована сборка 992 приводов из деталей, случайные реализации параметров которых имеют нормальные законы распределения, усечённые в пределах полей допусков. Была рассмотрена сборка приводов партиями по 2, 4, и 8 изделий. Детали подбирались в сборочные комплекты случайным образом и путём индивидуального подбора в соответствии с предложенным алгоритмом. Во всех случаях для изделий устанавливались оптимальные параметры регулировок. В результате были получены диаграммы распределения единичных показателей качества сборочных комплектов (2) при случайном и индивидуальном подборе деталей (рис. 3).

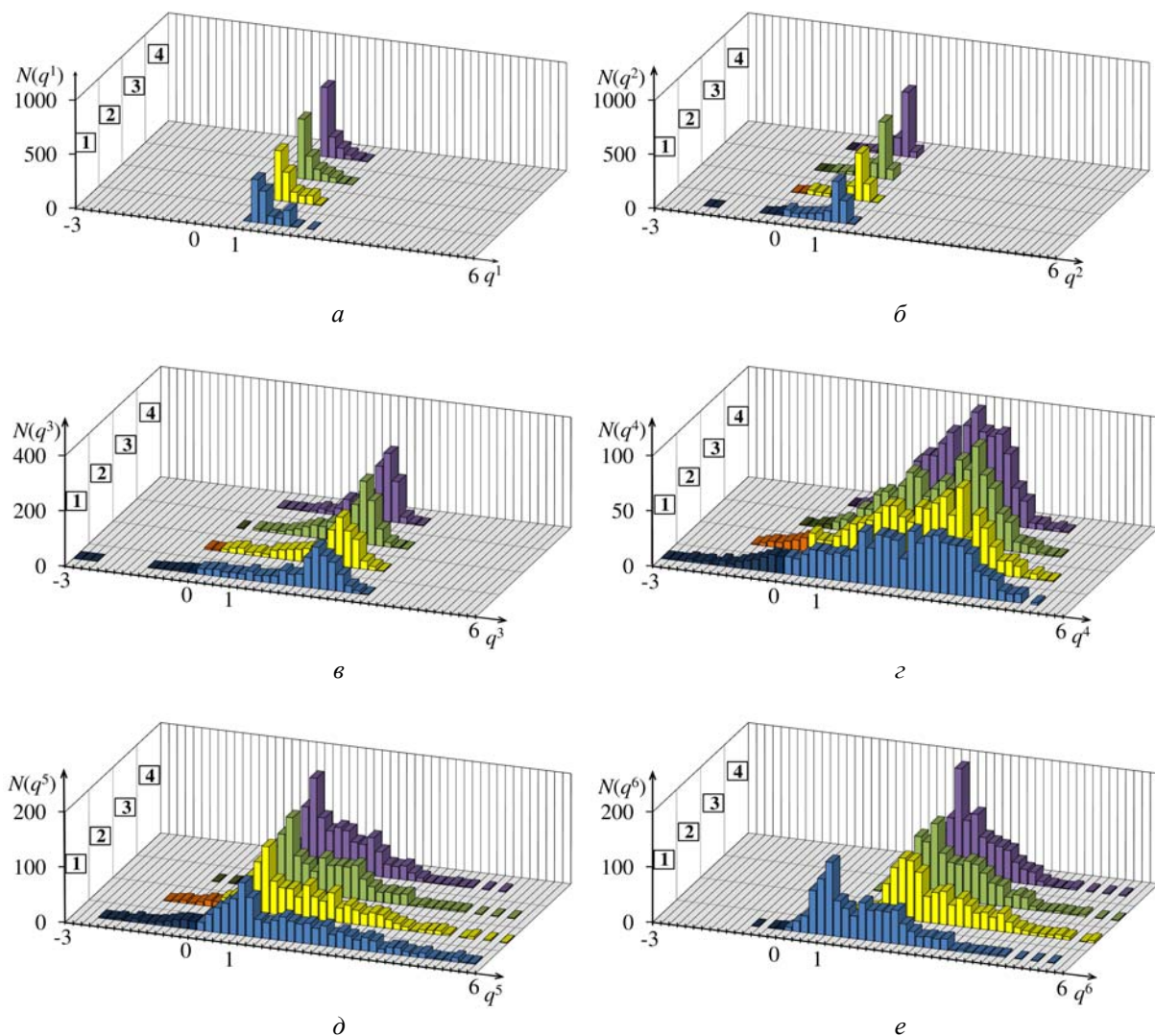


Рис. 3. Диаграммы распределений единичных показателей качества сборочных комплектов: (а) – (е) – соответственно для показателей качества  $q^1 - q^6$ ; отмечены распределения:

- 1 – при случайном подборе ДСЕ; 2 – при индивидуальном подборе ДСЕ и сборке приводов партиями по 2 изделия; 3 – при индивидуальном подборе ДСЕ и сборке приводов партиями по 4 изделия; 4 – при индивидуальном подборе ДСЕ и сборке приводов партиями по 8 изделий

Распределения показаны в диапазоне значений единичных показателей качества от минус 3 до 6:

- если  $q^i < 0$  – прогнозируемое значение соответствующего параметра изделия выходит за границы поля допуска, высока вероятность сборки негодного изделия;

- если  $0 \leq q^i < 1$  – прогнозируемый запас по значению соответствующего параметра меньше желаемого значения;

- если  $q^i > 1$  – прогнозируемый запас по значению соответствующего параметра изделия больше желаемого значения.

Сравнение распределений демонстрирует, что индивидуальный подбор деталей позволяет сместить значения параметров изделий, по которым имеют место наименьшие запасы, вглубь полей допусков, сократить разброс значений параметров. Благодаря индивидуальному подбору деталей достигается снижение вероятности сборки негодных ЭГС с 8,4% – при случайном подборе деталей, до 0,1% – при индивидуальном подборе и сборке изделий партиями по 8 изделий.

Представленная методика индивидуального подбора деталей, включающая в себя систему показателей качества (2), (3), математическую формулировку задачи (4), алгоритм распределения деталей по сборочным комплектам, может быть применена как с целью обеспечения сборки годных изделий, так и с целью улучшения параметров изделий. На практическом примере показано, что методика позволяет найти оптимальное распределение деталей по сборочным комплектам, исходя из их параметров, при сравнительно небольшом количестве вычислений. Для сокращения количества вычислений не используются особенности конструкции изделия, не предъявляются требования к функциональной связи параметров деталей и параметров готовых изделий, поэтому методика может быть применена при сборке различных изделий.

В качестве продолжения работы планируется разработка программного комплекса, реализующего предложенную методику подбора деталей для сборки произвольного изделия.

### **Библиографический список**

1. Задорина Н.А., Непомилуев В.В. Обеспечение качества сборки высокоточных изделий на основе метода индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 4. С. 152-157.

2. Matthias Hwai Yong Tan. Contributions to quality improvement methodologies and computer experiments: Diss., Georgia Institute of Technology, 2013. 263 p.

3. Петрухин А.В., Москвичева Н.П., Санинский В.А., Кочкин М.В. Алгоритмы работы элементов автоматизированного подбора комплектующих деталей при сборке многоопорного подшипникового узла ДВС // Вестник машиностроения. 2016. № 5. С. 38-42.

4. Герасимов Д.Г. Сборка с применением автоматизированной базы данных в атомном машиностроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 7. С. 12-16.

5. Задорина Н.А., Непомилуев В.В., Олейникова Е.В. Индивидуальный подбор деталей при сборке как альтернатива необходимости повышения точности их обработки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 5. С. 225-230.

6. Liu Weidong, Liu Haiming, Guo Jinhui. Multi-object selective assembly based on hybrid particle swarm algorithm // Proceedings of the 37th Chinese Control Conference (July, 25-27, 2018, Wuhan, China). P. 2506-2511. DOI: 10.23919/ChiCC.2018.8484030

7. Kannan R., Selladurai V. Optimization of characteristic parameters of turbocharger assembly using GA // Manufacturing and industrial engineering. 2011. Iss 1. P. 39-43.

8. Медведев А.В., Зараменский И.Ю., Халатов Е.М. Управление сборкой изделий на основе данных о параметрах составляющих деталей и сборочных единиц // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2021. № 4. С. 81-87. DOI: 10.31857/S0235711921040088

9. Медведев А.В., Халатов Е.М. Оценка качества сборочных комплектов при направленном подборе деталей // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 2. С. 48-53. DOI: 10.14489/td.2020.02.pp.048-053

## METHOD OF INDIVIDUAL SELECTION OF PARTS FOR SELECTIVE ASSEMBLY OF ELECTROHYDRAULIC SERVO DRIVES

© 2023

**A. V. Medvedev** Design Engineer;  
Design Bureau “Armature” – Branch of Joint Stock Company “Khrunichev State Research and Production Space Center”, Kovrov, Russian Federation;  
[mavrich@mail.ru](mailto:mavrich@mail.ru)

**E. M. Khalatov** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department “Hydraulic and Pneumatic Control Systems and Hydraulic Drive”;  
Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev,  
Kovrov, Russian Federation;  
[halatov@dksta.ru](mailto:halatov@dksta.ru)

A method for selecting parts and assembly units (hereinafter briefly referred to as parts) in sets for assembling a batch of electrohydraulic servo drives is presented, based on the measured (individual) mechanical and hydraulic characteristics of the parts. The preparatory stage is described: construction of a mathematical model of the product, determination of the parameters of parts and adjustments that have the greatest impact on the parameters of end products, formation of a system for assessing the quality of products in the batch, mathematical formulation of the task of selecting parts. The task of selecting parts is formulated as the assignment problem in the maximin formulation. A deterministic algorithm for solving the problem is presented, based on the branch and bound method and taking into account the fact that adjustments are made during the assembly of drives. A significant reduction in the number of steps (iterations) when searching for the optimal distribution of parts across assembly sets achieved due to the chosen mathematical formulation of the task, as well as due to the chosen strategy of selecting parts in the next assembly set. We suggest that an assembly set should include, first of all, the “most troublesome” parts the parameters of which do not allow obtaining a set, the projected quality indicator of which will be higher than the established value. At the same time, the negative impact of these parts on the product parameters is compensated by combining them with other parts in one assembly set. The results of mathematical modeling of assembling 992 drives with random formation of assembly sets and with individual selection of parts are presented. Modeling shows that as a result of implementing individual selection of parts in accordance with the described method, a significant reduction in the spread of parameters of end products within batches can be expected, as well as improvements in functional performance of the products. The presented method of individual selection of parts can be used in the assembly of various products.

*Selective assembly; assembly set; selection of parts; mathematical modeling; optimization*

---

*Citation:* Medvedev A.V., Khalatov E.M. Method of individual selection of parts for selective assembly of electrohydraulic servo drives. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 2. P. 67-78. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-67-78

## References

1. Zadorina N.A., Nepomiluev V.V. Ensuring the quality of assembly of high-precision products based on the method of individual selection of parts. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-making*. 2020. No. 4. P. 152-157. (In Russ.)
2. Matthias Hwai Yong Tan. Contributions to quality improvement methodologies and computer experiments: Diss., Georgia Institute of Technology, 2013. 263 p.
3. Petrukhin A.V., Moskvicheva N.P., Saninskiy V.A., Kochkin M.V. Algorithms of elements operation of automatic selection of component parts at assembly of multiple-seated bearing assembly of internal combustion engine. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2016. No. 5. P. 38-42. (In Russ.)
4. Gerasimov D.G. The assembly using utomated database. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-making*. 2015. No. 7. P. 12-16. (In Russ.)
- 5 Zadorina N.A., Nepomiluev V.V., Oleynikova E.V. Individual selection of parts during assembly as an alternative to the need to improve the accuracy of their processing. *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-making*. 2019. No. 5. P. 225-230. (In Russ.)
6. Liu Weidong, Liu Haiming, Guo Jinhui. Multi-object selective assembly based on hybrid particle swarm algorithm. *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference (July, 25-27, 2018, Wuhan, China)*. P. 2506-2511. DOI: 10.23919/ChiCC.2018.8484030
7. Kannan R., Selladurai V. Optimization of characteristic parameters of turbocharger assembly using GA. *Manufacturing and Industrial Engineering*. 2011. Iss. 1. P. 39-43.
8. Medvedev A.V., Zaramenskii I.Y., Khalatov E.M. Control of product assembly processes using data on the parameters of components and assembly units. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. V. 50, Iss. 4. P. 351-356. DOI: 10.3103/S1052618821040087
9. Medvedev A.V., Khalatov E.M. Quality rating of assembly sets in directional selection of parts. *Testing. Diagnostics*. 2020. No. 2. P. 48-53. (In Russ.). DOI: 10.14489/td.2020.02.pp.048-053