

*Предлагаются критерии для оценки альтернатив при решении задачи структурной оптимизации. Рассматривается применение теоремы Карлина для формирования обобщенного критерия с целью определения компромиссного варианта технологической схемы сборки. Описываемый подход может использоваться при разработке систем автоматизированного проектирования технологических процессов сборки в рамках интегрированного производственного комплекса.*

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НА МНОЖЕСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СБОРКИ

*И.П. Гамаюн*

*Кандидат технических наук, доцент кафедры АСУ*

*И.С. Ямшанов*

*аспирант кафедры АСУ*

*Национальный Технический Университет  
"Харьковский Политехнический Институт", 61002,  
Харьков, ул. Фрунзе, 21  
Контактный тел.: +38(0572) 40-04-74, 40-01-08  
E-mail: yam@kpi.kharkov.ua.*

### Введение

В машиностроении на сборочное производство приходится значительная часть трудоемкости. В силу ряда причин, основной из которых является сложность формализации, проектирование сборочного производства автоматизировано в меньшей степени, чем прочие составные части производственного процесса, например металлообработка. Как следствие, обоснованность принимаемых на этом этапе решений достаточно низка и во многом зависит от опыта и интуиции технолога. Таким образом, оптимизация проектирования сборочного производства могла бы дать значительный экономический эффект.

В качестве объекта сборки рассматривается изделие машиностроения или приборостроения, называемое системным техническим объектом сборки (СТОС). Под структурой понимается распределение элементов СТОС - деталей - и подсистем СТОС - технологических сборочных единиц - по уровням иерархии такое, что подсистема любого уровня может включать в свой состав элементы структуры СТОС с любых предшествующих уровней и как минимум один элемент с предыдущего уровня.

Решение описанной проблемы может быть получено путем разработки информационных ресурсов и инструментальных средств для системы интегрированного производственного комплекса, позволяющих, в частности, решать задачи структурной оптимизации на этапе проектирования сборочного производства. Это позволит произвести отработку изделия на технологичность с целью формирования оптимальной технологической схемы сборки (ТСС) – описания последовательности ввода в сборочных процесс отдельных деталей и сборочных единиц, определяемого отношениями предшествования на основе конструктивно-технологических требований доступа и базирования. Обеспечение выполнения указанных требований достигается за счет применения алгоритма разборки-сборки к вариантам структуры

изделия [1].

Решение задачи структурной оптимизации может быть разделено на следующие **этапы**: построение математической модели анализируемой системы, выделение генерального множества подсистем, формирование множества структур и соответствующего ему множества ТСС, многокритериальная оптимизация на множестве ТСС.

В работе [1] предложена модель описания технической системы, основанная на бинарных связях типа фиксированное и нефиксированное сопряжение. Связи представляются в виде матриц по одной каждого типа на каждое координатное направление. Размерность матриц определяется количеством деталей в изделии. В работах [2-4] приведены методы, позволяющие сформировать генеральное множество подсистем с лучшей эффективностью, чем полный перебор.

В данной работе предлагается проанализировать последний этап решения задачи структурной оптимизации - многокритериальную оптимизацию на множестве ТСС. Отличительными особенностями множества ТСС являются дискретность и относительно малая размерность, что необходимо учитывать при выборе подхода к проведению многокритериальной оптимизации.

Для оценки качества вариантов ТСС могут быть использованы критерии двух типов: прямые и косвенные. К прямым критериям могут быть отнесены критерии, непосредственно вычисляющие трудоемкость реализации конкретной схемы сборки, точное время, затрачиваемое на ее реализацию, затраты на требуемое оборудование и т.п. В случаях, когда применение прямых критериев ограничено используемой моделью изделия, могут быть применены косвенные критерии. Благодаря этому удастся избежать чрезмерного усложнения системы и в то же время ответить на вопрос о качестве разработанной ТСС. Все рассматриваемые далее критерии относятся к косвенным, поскольку используемая модель изделия не содержит информацию, которую можно было бы применить для

вычисления значений прямых критериев.

В работе [5] приводятся два косвенных критерия оценки ТСС:

1. Количество уровней в ТСС –  $T(k)$ . При допущении, что присоединение каждой детали происходит в течение одного такта времени, позволяет оценить продолжительность сборочного цикла для изделия. Является основой для разработки календарных планов доставки элементов структуры на сборку. Меньшее значение критерия будет соответствовать лучшему варианту.

2. Общее количество элементов структуры (деталей и сборочных единиц), непосредственно задействованных в общей и узловых сборках рассматриваемого изделия –  $R(k)$ . Позволяет косвенно оценить степень распараллеливания сборочного процесса, потребность в соответствующем оборудовании и связанные с этим затраты. Большее значение соответствует лучшему варианту.

При рассмотрении задачи оценивания ТСС в работе [6] наряду с другими критериями, которые не могут быть рассмотренными в рамках используемой модели, предлагается коэффициент прогрессивности структуры изделия: отношение разности числа уровней в рассматриваемой ТСС и числа уровней в максимально параллельном варианте ТСС к числу элементов в изделии:

$$\alpha = \frac{2 * (L_{\text{факт}} - L_{\text{теор}})}{N}$$

$$L_{\text{теор}} = [\log_2 N] + 1$$

где  $N$  – количество деталей в изделии,  $L$  – число уровней.

Критерий может принимать значение в пределах от 0 до 2. Меньшее значение соответствует более предпочтительному варианту. Диапазон значений  $\alpha$  -

Оценка прогрессивности.

Интервал $\alpha$	0..0,5	0,5..1,0	1,0..1,5	1,5..2,0
Оценка ТСС	высокая прогрессивность	средняя прогрессивность	низкая прогрессивность	не прогрессивно

критерия разделен на зоны прогрессивности, представленные в таблице 1.

Анализ определений критериев  $T(k)$  и  $\alpha$  позволяет утверждать, что фактически они характеризуют одну и ту же величину – число уровней в ТСС. Следовательно, их совместное использование не оправдано.  $\alpha$ -критерий предпочтителен, если требуется четко предопределенная интерпретация значений критерия.

В работе [6] также приводятся общие рекомендации по формированию ТСС, среди которых в рамках используемой модели изделия интересно рассмотреть следующие:

1. сборочная единица не должна содержать слишком большое или слишком малое число деталей.
2. трудоемкость сборки большинства сборочных единиц должна быть примерно одинакова.
3. большинство деталей, за исключением главных базовых и деталей крепления, должна быть объединена в сборочные единицы, с целью сокращения числа деталей, непосредственно участвующих в общей сборке.

На основании этих рекомендаций в данной работе предлагаются такие критерии оценки альтернатив:

1. Количество деталей, непосредственно участвующих в общей сборке, за исключением базовых деталей и изделия в целом. Значение критерия -  $N_{\text{фин}}(k)$  - можно определить по структуре изделия или по ТСС. Критерий основывается на рекомендации 3 и будет характеризовать качество распределения деталей по

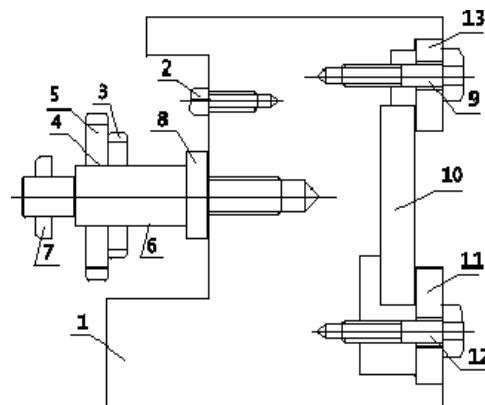


Рисунок 1. Условное изделие

сборочным единицам.

Меньшее значение критерия будет соответствовать лучшему варианту. Детали крепления в рамках используемой модели не формализуются и поэтому при вычислении критерия не учитываются.

2. Дисперсия количества элементов в сборочных единицах для каждой альтернативы -  $\sigma^2$ . Критерий основывается на рекомендациях 1 и 2. Исходя из предположения, что трудоемкость сборки пропорциональна числу участвующих в сборке элементов, критерий позволяет определить равномерность

распределения деталей по сборочным единицам и разброс трудоемкости формирования каждой из них. Меньшее значение критерия будет соответствовать лучшему варианту.

Проведем оценку альтернативных вариантов

ТСС условного изделия, представленного на рисунке 1, по каждому из описанных критериев:  $T$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $N_{\text{фин}}$ ,  $\sigma^2$ .

В работе [3] для рассматриваемого изделия было сформировано генеральное множество подсистем, содержащее две сборочные единицы  $S = \{3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  и  $S = \{3, 4, 5, 6\}$  с базовыми деталями 8<sup>1</sup> и 6 соответственно. Для формирования множества вариантов структуры производится полный перебор возможных вариантов выборки из генерального множества подсистем. Таким образом, могут быть сформировано четыре варианта структуры (рис. 2).

Для рассматриваемого изделия каждому варианту структуры соответствует один вариант ТСС. Результаты оценки вариантов по каждому из критериев представлены в таблице 2.

Очевидно, что в данном случае нет альтернативы, которая была бы оптимальна с точки зрения всех используемых критериев. Для первых трех альтернатив можно указать, по крайней мере, один критерий, по которому на альтернативе достигается оптимальное

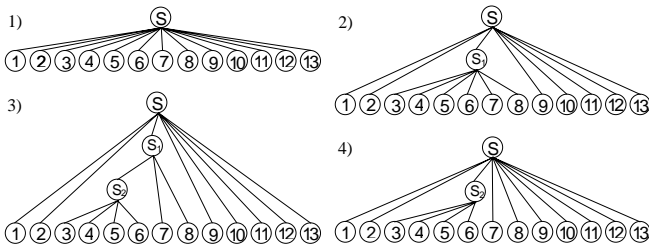


Рисунок 2. Варианты структур

Таблица 2.

Оценки вариантов структур.

Вариант	T	R	$\alpha$	$N_{\min}$	$\sigma^2$
1	12	13	16/13	12	0
2	7	14	6/13	6	1
3	7	15	6/13	6	14/3
4	9	14	10/13	8	9
минимальное значение	7	13	6/13	6	0
максимальное значение	12	15	16/13	12	9
тип экстремума	минимум	максимум	минимум	минимум	минимум

значение.

В теории принятия решений в таком случае рекомендуется сформировать обобщенный критерий. Для этого каждый из рассматриваемых критериев должен быть приведен к безразмерному, нормализованному виду, сохраняющему отношение предпочтения между альтернативами. К преобразованным таким образом критериям применяется одна из существующих схем компромисса, которая позволяет определить компромиссную альтернативу, т.е. такую, которая по каждому из критериев, возможно, не доставляет оптимальное значение, но обеспечивает приемлемые значения для всех критериев множества. Для

$$\omega_i(f_i(k)) = \begin{cases} \frac{f_i^0 - f_i(k)}{f_i^0 - f_i(\min)} \quad \forall i \in I_1 \\ \frac{f_i(k) - f_i^0}{f_i(\max) - f_i^0} \quad \forall i \in I_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_i(f_i(k)) = \begin{cases} \frac{f_i^0 - f_i(k)}{f_i^0} \quad \forall i \in I_1 \\ \frac{f_i(k) - f_i^0}{f_i^0} \quad \forall i \in I_2 \end{cases} \quad (2)$$

преобразования критериев обычно используются соотношения, представленные одной из монотонных функций [7]:

$$\omega_i(f_i(k)) = \omega_i^H(f_i(k)) \quad \forall i \in I \quad (3)$$

где  $f_i(\min)$ ,  $f_i(\max)$  - соответственно наименьшие значения максимизируемых и наибольшие значения минимизируемых критериев, достигаемые ими на множестве допустимых альтернатив;

$f_i^0$  - оптимальное значение i-го критерия на множестве допустимых альтернатив;

$I_1, I_2$  - множество индексов соответственно максимизируемых и минимизируемых критериев;

$I = I_1 \cup I_2$  - множество индексов всех критериев.

Отличительной особенностью первого соотношения является перевод значений критериев в диапазон [0;1], где 0 соответствует наиболее предпочтительной альтернативе, 1 - наименее предпочтительной. Для второго соотношения диапазон значений в общем случае может быть произвольным. Кроме того, если оптимальное значение критерия равно нулю, то при использовании второго соотношения возникает проблема деления на ноль.

Для определения компромиссной альтернативы  $k^*$  может быть использована теорема Карлина [7], которую можно представить в такой форме:

$$\min_k \{ F(k) = \sum_{i \in I} \rho_i \omega_i(k) \} \quad (4)$$

$$\rho = \{ \rho_i : \rho_i > 0 \quad \forall i \in I, \sum_{i \in I} \rho_i = 1 \}$$

где  $F(k)$  - обобщенный критерий;  $\rho_i$  - параметры, определяющие важность каждого из критериев.

Варьируя значения параметров  $\rho_i$  в пределах заданных в (4) ограничений, могут быть получены различные варианты предпочтений критериев: от лексикографического порядка, когда критерии строго ранжированы по важности, до их равнозначности. В случае если все критерии имеют одинаковую важность, то параметры задаются равными  $\rho = \rho_i = 1/N \quad \forall i \in I$ . В другом граничном случае - при лексикографическом порядке - можно вообще обойтись без задания параметров

Преобразования критериев.

Таблица 3.

Вариант	Соотношение 1						Соотношение 2					
	T	R	$\alpha$	$N_{\min}$	$\sigma^2$	$\Sigma$	T	R	$\alpha$	$N_{\min}$	$\sigma^2$	$\Sigma$
1	1,0	1,0	1,0	1,000	0,000	<b>0,800</b>	0,714	0,133	1,667	1,000	-	<b>0,879</b>
2	0,0	0,5	0,0	0,000	0,111	<b>0,122</b>	0,000	0,067	0,000	0,000	-	<b>0,017</b>
3	0,0	0,0	0,0	0,000	0,519	<b>0,104</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	-	<b>0,000</b>
4	0,4	0,5	0,4	0,333	1,000	<b>0,527</b>	0,286	0,067	0,667	0,333	-	<b>0,338</b>

и построения обобщенного критерия. Достаточно последовательно оптимизировать наиболее важные критерии, используя каждый последующий только в том случае, если оптимальные значения по всем предыдущим достигаются более чем на одной альтернативе.

В таблице 3 приведены преобразованные по соотношениям (1) и (2) значения отдельных критериев для каждой из рассматриваемых альтернатив, а также значение обобщенного критерия для случая равнозначности критериев. Для рассматриваемого условного изделия  $\rho_i = 0.2 \quad \forall i = 1..5$ .

Для критерия  $\sigma^2$  преобразование с использованием соотношения (2) не производилось, т.к. это привело бы к делению на минимальное значение, равное 0. Соответственно, для оставшихся четырех критериев использовались параметры  $\rho = 0.25$ .

Как отмечалось выше, критерии T и  $\alpha$  характеризуют одну и ту же величину, что косвенно подтверждается полным совпадением значений этих критериев после преобразования. Исключение одного из этих критериев из обобщенного критерия не изменит распределения альтернатив.

Наименьшее значение обобщенного критерия при равной важности исходных критериев имеет вариант 3, содержащий обе подсистемы из генерального множества подсистем, что справедливо для обоих соотношений.

Следовательно, на рассматриваемом множестве критериев именно он является компромиссным вариантом.

Рассмотрим второй граничный случай распределения предпочтений критериев – лексикографический порядок. Пусть экспертами задан такой порядок предпочтения:  $T$ ,  $N_{fin}$ ,  $\sigma^2$ ,  $R$ . Как видно из таблицы 2, оптимальное значение по критерию  $T$  имеют альтернативы 2 и 3. Значение критерия  $N_{fin}$  для этих альтернатив совпадает. Критерий  $\sigma^2$  позволяет установить, что при таком порядке предпочтения критериев оптимальной является альтернатива 2. Если третьим по важности критерием был бы  $R$ , то оптимальной стала бы альтернатива 3.

При использовании прочих значений параметров предпочтения критериев могут быть получены другие результаты.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Предложенные критерии расширяют базу определения оптимальной ТСС, что позволит повысить обоснованность принимаемых на этапе проектирования сборочного производства решений и получить экономический эффект от более эффективной реализации сборочного производства.

2. Описанные в литературе критерии  $T$  и  $\alpha$  характеризуют одну и ту же величину - число уровней в ТСС. Они не должны применяться одновременно для построения обобщенного критерия при многокритериальной оптимизации, т.к. это может дать необоснованные преимущества этой характеристике перед прочими.

3. Использование первого соотношения для преобразования критериев является более предпочтительным, поскольку позволяет перевести значения критериев в predetermined диапазон с известной трактовкой значений и избежать проблем при нулевом оптимальном значении.

4. Многокритериальная оптимизация на множестве ТСС с использованием схемы компромисса, основанной на теореме Карлина, может применяться для рассматриваемого типа задач.

5. Как было показано выбор параметров, определяющих важность критериев, оказывает существенное влияние на выбор оптимальной альтернативы. При исследовании реальных изделий выбор значений параметров должен проводить эксперт (эксперты) на основании собственного опыта и интуиции с учетом особенностей конкретной решаемой задачи.

---

### Литература

1. Гамаюн И.П. Эвристический алгоритм сборки-разборки сложной машиностроительной конструкции. //Механика и машиностроение /АН Высшей школы Украины. Отделение механики и машиностроения. -1998. - № 1. С. 146-149.
2. Гамаюн И.П. Комбинаторный алгоритм порождения множества подсистем системного объекта сборки. //Управляющие системы и машины. 2002. №2. С. 12-19.
3. Ямшанов И.С. Алгоритм формирования генерального множества подсистем системного технического объекта сборки. //Вестник НТУ «ХПИ», Сборник научных трудов, Тематический выпуск “Системный анализ, управление и информационные технологии”, № 9, Т. 6, 2002, С. 72-76
4. Ямшанов И.С. Алгоритм порождения подсистем технического объекта на основе бинарных матриц. Радиоелектроніка та інформатика. 2002. № 04. С. 109-114.
5. Гамаюн И.П. Определение компромиссной альтернативы в одной задаче структурного синтеза. //Управляющие системы и машины. 2002. №1. С. 15-22.
6. Захаров М.В., Тимофеев Ю.В. Розробка технологічних процесів складання: Навчальний посібник. - К.: Інститут системних досліджень освіти, 1992. – 156 с.
7. Волкович В.Л., Волошин А.Ф. и др. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления. – Киев, 1984.