

УДК 621:681.5

**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ**

д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, канд. техн. наук В.А. ГАЙКО
(Президиум НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. Е.З. ЗЕВЕЛЕВА
(Полоцкий государственный университет);
В.И. БОРОДАВКО
(ГНПО «Центр», Минск)

Рассмотрена структура технологических комплексов комбинированной обработки. Описаны межуровневые связи элементов комплекса. Предложено для определения связей между составляющими элементами, функциональными системами, функциональными подсистемами и функциональными элементами строить графы кортежей. Показано, что анализ графов кортежей позволяет установить количество взаимосвязей между различными уровнями составляющих. Рекомендовано для выяснения целесообразности создания технологического комплекса комбинированной обработки кортежи объединять и определять совпадающие связи и функциональные элементы комплекса. Предложено структурный синтез технологических комплексов проводить на основании статистического анализа связей по топологической модели, сформированной совмещением трех нижних уровней графов кортежей технологических модулей из пяти для различных видов обработки, а параметрическую оптимизацию связей комплекса – ребер графов – рекомендовано проводить, используя ортогональное планирование экспериментов. Показано, что компоновка комплекса объединяет рабочие поля, которые формируются в результате пересечений полей детали, инструмента и потока энергии в рабочей зоне технологической системы.

Введение. Сокращение сроков проектирования новых перспективных комбинированных технологических процессов, оснащенных инструментами (агрегатными блоками и системами) и установками (станками и модулями), образующими единый технологический комплекс (ТК) – одна из актуальных проблем современного производства.

Ключевой задачей проектирования ТК является разработка структуры, обеспечивающей бесперебойную работу и гибкую переналадку комплекса комбинированной обработки. Рациональные надежность и адаптивность обеспечиваются при синтезе структуры, основанном на анализе элементов и исследовании кортежей ТК [1 – 4].

Структурный синтез технологических комплексов. Технологический комплекс в общем случае рассматривается как иерархически построенная система «человек – машина» [1, 3], включающая следующие уровни: I – функциональные элементы (ФЭ), такие как главное движение, движение подачи, движение инструмента и перемещение потока энергии; II – функциональные подсистемы (ФПС) в виде агрегатных блоков и установок; III – функциональные системы (ФС), обеспечивающие рабочие, транспортные движения, питание и удаление, а также обслуживание; IV – технологические модули (ТМ) или агрегатные станки, энергетические и информационные машины; V – автоматические и полуавтоматические линии и участки, образующие ТК.

Каждая подсистема n -го уровня является элементом подсистемы $(n+1)$ -го уровня. Состав ТК, каждой ФС и ФПС, входящих в ТМ, а также функции составляющих их ФЭ соответствуют содержанию тех технологических операций, для которых создается данный технологический комплекс.

Каждая ФПС состоит в общем случае из нескольких ФЭ, в названии которых фигурируют названия выполняемых ими функций (движений). Функциональная подсистема данного вида в ходе технологического процесса выполняет определенную типовую функцию, т.е. типовую технологическую операцию.

Технологические комплексы комбинированной обработки представляют собой функциональные системы с набором различных подсистем (табл. 1).

Для анализа состава и количества межуровневых связей элементов технологических комплексов обработки используем двухзначную нумерацию составляющих систем и элементов:

- первая цифра номера соответствует уровню составляющих: 1 – функциональные элементы; 2 – функциональные подсистемы; 3 – функциональные системы; 4 – технологическая машина; 5 – технологический комплекс;

- вторая цифра – порядковый номер каждой составляющей данного уровня. Таким образом, получаем следующую кодовую нумерацию составляющих: 51 – технологический комплекс для обработки поверхностей вращения; 52 – технологический комплекс для обработки торцевых поверхностей; 53 – технологический комплекс для обработки плоских поверхностей или другие.

Таблица 1

Описание межуровневых связей элементов технологического комплекса

Технологический комплекс (уровень V)			Технологические модули (уровень IV)				
			ТМ ₁	ТМ ₂	...	ТМ _s	
			Функциональные элементы (уровень I)				
Функциональные системы (уровень III)	рабочая	Функциональные подсистемы (уровень II)	движения заготовки	тип реализации			
			движения инструмента	то же	то же	то же	то же
			движения источника энергии	– " –	– " –	– " –	– " –
			...	– " –	– " –	– " –	– " –
	вспомогательная		установочные движения инструмента	тип или способ реализации			
			установочные движения источника энергии	то же	то же	то же	то же
			...	– " –	– " –	– " –	– " –
	обслуживающая		движения смены детали	способ реализации			
			...	то же	то же	то же	то же

Четвертый уровень ТК составляют технологические модули по методу обработки, например: 41 – токарной обработки; 42 – круглого шлифования; 43 – полирования; 44 – горизонтального фрезерования; 45 – вертикального фрезерования; 46 – плоского шлифования и другие.

Третий уровень – функциональные системы: 31 – рабочая, включающая элементы, необходимые для выполнения прямого назначения ФС; 32 – вспомогательная, осуществляющая установочные движения инструмента и заготовки; 33 – обслуживающая, обеспечивающая смену заготовки, инструмента, заполнение устройств подачи расходных материалов и т.п.

Второй уровень – функциональные подсистемы: 21 – движения заготовки; 22 – движения инструмента; 23 – движения подачи; 24 – движения источника энергии; 25 – регулирования интенсивности источника; 26 – подачи расходных материалов; 27 – установочных движений инструмента, которые могут совпадать с основными движениями; 28 – установочных движений заготовки; 29 – смены детали и инструмента.

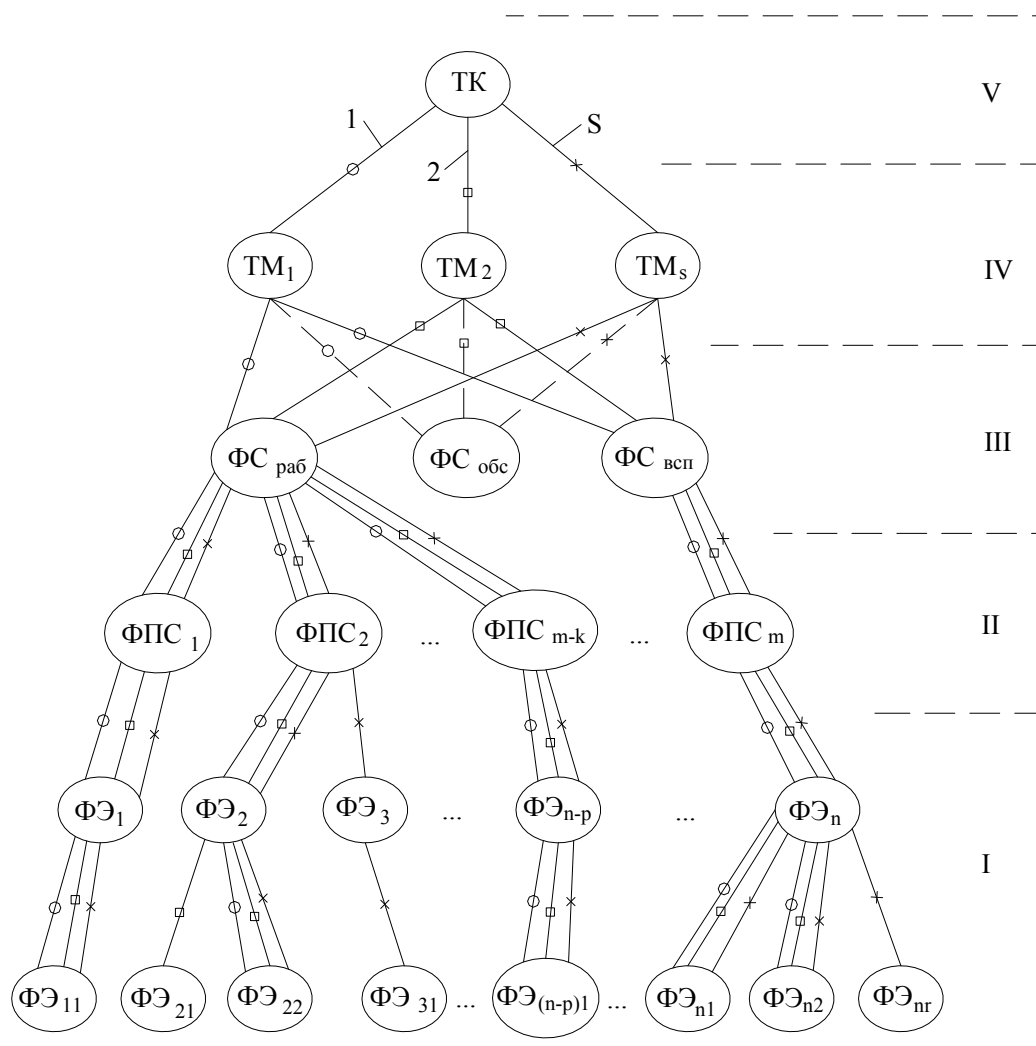
Первый уровень – функциональные элементы, описывающие тип движения или способ его реализации устройствами: 11 – главное движение заготовки (111 – вращательное, 112 – поступательное); 12 – главное движение инструмента (121 – вращательное, 122 – поступательное продольное движение, 123 – поступательное поперечное движение); 13 – дополнительное движение инструмента (131 – вращательное, 132 – поступательное); 14 – движение подачи (врезания) (141 – продольное, 142 – поперечное, 143 – перпендикулярное плоскости поперечного и продольного); 15 – движение источника энергии; 16 – движение устройства подачи расходного материала; 17 – установочное движение заготовки (171 – продольное, 172 – поперечное, 173 – перпендикулярное плоскости поперечного и продольного движений); 18 – установочное движение инструмента (181 – продольное, 182 – поперечное, 183 – вращательное).

Для определения связей между составляющими элементами ФС, ФПС и ФЭ по таблице 1 строятся графы кортежей (рисунок). Графы кортежей строятся отдельно для каждого технологического модуля, входящего в данный технологический комплекс.

Анализ графов кортежей позволяет установить количество взаимосвязей между различными уровнями составляющих. Для выяснения целесообразности создания универсального технологического комплекса комбинированной обработки кортежи объединяются и определяются совпадающие связи и функциональные элементы комплекса.

Параметрическая оптимизация технологических комплексов. Проектирование технологических комплексов, реализующих процессы комбинированной обработки, их оснащение инструментами, установками, устройствами автоматизации – сложная и комплексная проблема производства, имеющая различные решения и широкие диапазоны возможных альтернатив. Решается она структурным синтезом компактных технологических комплексов, использующих источники энергии на основе параметрической оптимизации производственных модулей, реализующих комбинированные методы обработки [1, 5]. Технологические основы проектирования ТК обеспечивают разработчика информацией, необходимой для создания технологических процессов, средств их оснащения и автоматизации. Они содержат рациональные режимы обработки по всем операциям технологического процесса, сведения о конструкции приспособлений, рабочих органов оборудования, установок, программное обеспечение и схемы сопряжения

рабочих, обслуживающих, информационных машин и агрегатов технологической системы. Рациональные режимы и конструкции получают путем оптимизации основных параметров, которые описываются аналитическими и статистическими моделями [6]. В статистических моделях используют многофакторное планирование экспериментов [7], дисперсионный, регрессионный и ковариационный анализ.



Графы кортежей технологического комплекса (ТК) V уровня, включающего на IV уровне технологические модули (ТМ) с порядковыми номерами 1, 2, ..., s и функциональные системы (ФС) на III уровне, функциональные подсистемы (ФПС) на II уровне, функциональные элементы и их составляющие на I уровне

При исследовании комбинированных процессов в рабочей зоне ТК аналитические модели требуют уточнения путем планирования отсеивающих, дискриминирующих экспериментов дисперсионного анализа [6]. Изучение самоорганизации поверхностных явлений по критериям переноса необходимо дополнить статистическим многофакторным анализом процессов и явлений.

Поэтому для изучения комбинированных процессов и технологических средств формирования эксплуатационных характеристик детали применяется многофакторный регрессионный анализ с ортогональным, ротatableльным планированием экспериментов. Последующая оптимизация проводится по полученной поверхности отклика в факторном пространстве, а управление технологическими процессами и средствами осуществляется по критериям с учетом связей между параметрами качества детали.

Общее число опытов в матрице планирования экспериментов при k факторах

$$N = n_1 + 2k + n_0,$$

где n_1 – число опытов ядра плана, представляющего собой полный факторный эксперимент или его дробные реплики; $2k$ – число «звездных» точек; n_0 – число опытов в центре плана.

Число уровней варьирования для каждого фактора равно пяти: $\{-\alpha_0; -1; 0; +1; +\alpha_0\}$.

Для того чтобы параметры модели определялись независимо, план должен быть ортогональным. Это достигается выбором для нормализованных факторов «звездного» плеча по формуле:

$$\alpha_0 = \sqrt{\sqrt{N \cdot n_1 - n_1}} / 2.$$

Недостатком ортогонального планирования является то, что информация о поверхности отклика в разных направлениях факторного пространства различна. Описывать поверхность отклика с одинаковой точностью по всем направлениям позволяет рототабельное планирование, при котором остаточные дисперсии на одинаковых расстояниях от центра плана минимальны и равны. Это обеспечивается выбором «звездного» плеча по формуле:

$$\alpha_0 = \sqrt[4]{n_1}.$$

Для достижения равномерности, обеспечивающей сохранение или минимальное изменение дисперсии предсказания в единичном радиусе от центра плана, должно соблюдаться равенство:

$$n_0 = \lambda_0 (n_1 + 4\sqrt{n_1} + 4) - n_1 - 2k,$$

где λ_0 – коэффициент равномерности, стремящийся к единице с ростом k .

Рототабельный план становится ортогональным при $\lambda_0 = 1$. Вместе с тем расчеты дают дробные значения n_0 , которые приходится округлять до ближайшего целого числа, нарушая при этом условия равномерности. Однако такие отклонения столь незначительны, что ими можно пренебречь.

Так как при равномерном планировании несколько опытов проводится параллельно при основном уровне факторов, то результаты этих экспериментов позволяют оценить дисперсию воспроизводимости S_B^2 . По дисперсии S_B^2 и критерию Стьюдента t_k определяются доверительный интервал значений параметров и значимость коэффициентов регрессии.

Проверка адекватности статистической модели производится с помощью критерия Фишера F_k по соотношению дисперсий адекватности и воспроизводимости: $S_{ад}^2 / S_B^2 = F_H$. Если наблюдаемое значение критерия меньше табличного $F_H < F_k$, то модель адекватна.

Для определения конструкторско-технологических факторов, обеспечивающих рациональные производительность и качество электрофизической обработки, решаются задачи с несколькими параметрами оптимизации [3, 8]. Поэтому оптимизация параметров проводится с использованием комплексного показателя [9], в качестве которого принимается обобщенная функция желательности Харрингтона.

Под желательностью d_i для функции Харрингтона понимают определенный уровень оптимизируемого i -го параметра по специально разработанной шкале желательности для определенного j -го технологического процесса. Величина d_i изменяется от 0 до 1. При этом значениям $d_i = 1$ соответствует максимально благоприятный уровень параметра оптимизации, а значениям $d_i = 0$ – наименее желательный. Функция желательности i -го параметра описывается выражением:

$$d_i = \exp(-\exp(-y_j')),$$

где y_j' – безразмерное значение параметра оптимизации, в которое его переводят в соответствии со шкалой желательности для j -го процесса.

Обобщенная функция желательности рассматривается как среднегеометрическое желательностей d_i для n отдельных параметров оптимизации:

$$D_0 = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i \cdot \dots \cdot d_{n-1} \cdot d_n}.$$

Оптимизация конструкторско-технологических факторов статистических моделей проводится по обобщенной функции желательности. Так как анализируемые функции отклика унимодельны, экстремум определяется по поверхности отклика функции $D_c = 1/D_0$ методом спирального координатного спуска. После вычислений на режимах для конструкций, обеспечивающих оптимальные значения параметров, расчетные результаты сравниваются с полученными экспериментально.

Компоновка технологического комплекса. Структурный синтез и параметрическая оптимизация завершаются пространственно-временным совмещением требуемого сочетания функциональных элементов на множестве компоновок технологического комплекса [10].

Для основных движений введем обозначения осей координат: X – поступательное движение по оси x ; Y – поступательное движение по оси y ; Z – поступательное движение по оси z ; C – вращательное движение вокруг оси z ; h – горизонтальное расположение оси вращения; O – стационарный блок.

Структурная формула компоновки состоит из трех зон: *центральная* – стационарный блок; *левая* – движение детали; *правая* – движение инструмента и установки [10].

Рассмотрим компоновку при главном вращательном движении детали (горизонтальная компоновка).

Структурная формула базовой системы компоновки имеет вид: (Г1) – C_h0XYZ – вращение детали относительно горизонтальной оси, движение инструмента или установки поступательное относительно трех координатных осей.

При осуществлении ряда поступательных движений блоком, обеспечивающим вращательное движение, получаем следующие разновидности компоновок: (Г2) – ZC_h0XY – деталь совершает вращательное движение и поступательное вдоль оси вращения; (Г3) – XZC_h0Y – кроме движений в компоновке Г2; блок, осуществляющий движение детали, производит врезание (подачу); (Г4) – $XYZC_h0$ – инструмент жестко связан со стационарным блоком.

При главном вращательном движении инструмента (вертикальная компоновка) структурная формула базовой системы компоновки имеет вид: (В1) – $XYZ0C_h$ – вращение инструмента относительно горизонтальной оси; движение детали поступательное относительно трех координатных осей.

Часть поступательных движений можно передать блоку инструмента, и тогда получаем еще три разновидности компоновок: (В2) – $XY0C_hZ$ – инструмент совершает вращательное движение и поступательное вдоль оси вращения; (В3) – $X0C_hZY$ – деталь совершает только поперечное поступательное движение; (В4) – $0C_hXYZ$ – все движения технологического процесса, включая и установочные, осуществляются блоком инструмента.

Влияние компоновки на качество обработки проявляется через структуру и выбор рациональных конструктивных исполнений технологического комплекса, размерных пропорций, взаиморасположения узлов и расположения технологической среды в пространстве [10, 11].

Нагружение конструкции при формообразовании поверхности происходит в пределах некоторой области пространства, которая называется рабочим полем компоновки. В пределах рабочего поля проявляются качественные характеристики ТК – точность, жесткость, виброустойчивость и др.

Поскольку формообразование выполняется путем относительных перемещений детали, инструмента и источника энергии, то рабочее поле компоновки (РП) образуется в результате взаимодействия поля детали (ПД), поля инструмента (ПИ) и поля распределения энергии (ПЭ), из чего следует способ определения пространственных границ РП как области пересечения ПД, ПИ и ПЭ:

$$РП = ПД \cap ПИ \cap ПЭ,$$

где ПД – область пространства, которую может занимать деталь наибольших размеров при всех ее координатных перемещениях; ПИ – область пространства, которую может занимать режущая часть инструмента наибольшего размера при его координатных перемещениях; ПЭ – область пространства, на которую может воздействовать поток энергии.

Поля деталей, инструментов, распределения энергии и рабочее поле компоновки в соответствии с вариантами структурных формул компоновок для 4 видов движений исполнительных органов, описываемых функциональными элементами технологического комплекса, показаны в таблице 2.

Таблица 2

Поля компоновки технологических модулей, распределение энергии (ПЭ) в которых принимает форму полей детали (ПД) или инструмента (ПИ) соответственно (←) или (→) для: поля (1), потока (2), луча (3)

		Компоновка		ПД	ПЭ	ПИ
		Обозначение	Структурная формула			
Горизонтальная	Г1	C_h0XYZ		← 1, 2 → ← 3 →		
	Г2	ZC_h0XY		то же		
	Г3	XZC_h0Y		– " –		
	Г4	$XYZC_h0$		– " –		
Вертикальная	В1	$XYZ0C_h$		– " –		
	В2	$XY0C_hZ$		– " –		
	В3	$X0C_hZY$		– " –		
	В4	$0C_hXYZ$		– " –		

В результате анализа простейших компоновок выявляется вид рабочего поля (прямая линия, плоская или объемная фигура), требующего особых свойств технологической среды при использовании источников энергии.

Заключение. Структурный синтез технологических комплексов необходимо проводить на основании статистического анализа связей по топологической модели, а параметрическую оптимизацию связей комплекса – ребер графов – рекомендуется проводить, используя ортогональное планирование экспериментов. Компоновка комплекса объединяет рабочие поля $(PP)_k = (PP)_1 \cup (PP)_2 \cup \dots \cup (PP)_n$, которые формируются в результате пересечений полей детали, инструмента и потока энергии в рабочей зоне технологической системы $PP = PD \cap PI \cap PE$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский, И.И. Основы синтеза систем машин автоматического действия / И.И. Артоболевский, Д.Я. Ильинский. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
2. Кошкин, Л.Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л.Н. Кошкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 236 с.
3. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Л.М. Акулович [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
4. Хейфец, М.Л. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб.-метод. компл. для студентов машиностроительных спец. / М.Л. Хейфец, Л.М. Акулович, Е.З. Зевелева. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 172 с.
5. Артоболевский, И.И. Механизмы в современной технике: справ. пособие: в 7 т. / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1979. – Т.1. – 496 с.
6. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
7. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
8. Хейфец, М.Л. Самоорганизация процессов при высокоэффективных методах обработки деталей / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 1997. – 268 с.
9. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Высш. шк., 1985. – 286 с.
10. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1961. – 296 с.
11. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

Поступила 08.07.2010

STRUCTURAL SYNTHESIS AND PARAMETRICAL OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF THE COMBINED PROCESSING

M. KHEIFETZ, V. GAJKO, E. ZEVELEVA, V. BORODAVKO

The structure of technological complexes of the combined processing is considered. Communications between levels of elements of a complex are described. It is offered for definition of communications between making elements functional systems, functional subsystems and functional elements to build columns of trains. It is shown, that the analysis of counts of trains allows to establish quantity of interrelations between various levels of components. It is recommended to unite and define for finding-out of expediency of creation of a technological complex of the combined processing trains conterminous communications and functional elements of a complex. It is offered to spend structural synthesis of technological complexes on the basis of the statistical analysis of communications on the topological model generated by combination of three bottom levels of counts of trains of technological modules from five for various kinds of processing, and parametrical optimisation of communications of a complex - edges of counts is recommended for spending, using orthogonal planning of experiments. It is shown, that complex configuration unites working fields which are formed as a result of crossings of fields of a detail, tool and an energy stream in a working zone of technological system.