

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е.В. ПОЛЕТАЕВА, канд. техн. наук, И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: epolet2010@mail.ru

© Полетаева Е.В., Горлов И.В., 2022

В условиях мелкосерийного машиностроительного производства частая смена номенклатуры выпускаемых изделий диктует необходимость ускорения технологического проектирования и повышения его качества за счет оптимизации инженерных решений с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства. В статье рассмотрена одна из важных задач оптимизации структуры производственной системы, основой которой является станочная система. Представлены модели, описывающие производственную систему на разных этапах проектирования. Разработан оптимизационный алгоритм, позволяющий объединить несколько моделей в одну систему. Этот алгоритм может применяться в современных прогрессивных технологиях. Приведен пример построения моделей структуры производственной станочной системы для обработки корпусных деталей при групповой организации машиностроительного производства.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, технологическая подготовка производства, многономенклатурное производство, моделирование, оптимизация, структура производственной системы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-2-77-82

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность современного машиностроительного производства непосредственно связана с применением прогрессивных форм организации всех процессов и их автоматизацией. В условиях мелкосерийного производства прогрессивными в настоящий момент являются типовая, групповая и модульная технологии [1–3]. Все три типа организации производства, определяющие содержание технологической подготовки производства, относятся к унифицированным технологическим процессам [4]. Типовой технологический процесс разрабатывается для изготовления деталей с общими конструктивными и технологическими признаками. Групповой отличается от типового в основном организацией производственного процесса. Модульный принцип предполагает проектирование технологического процесса обработки конструкторско-технологических модулей, сочетающих типовые элементарные поверхности, и включает в структуру типовые и групповые технологии. Унификация и типизация предусматривают классификацию деталей, элементов деталей, сходных по форме, размерам, точностным и прочностным характеристикам, качеству поверхностей. Обязательным также является описание сочетаний поверхностей, характеризующихся единством баз, станочного оборудования, последовательности операций, установов и переходов. Структуру производства в первую очередь определяет станочное оборудование. При многономенклатурном производстве это, как правило, станки с числовым программным управлением, позволяющие значительно сократить время,

затрачиваемое на переналадку, сконцентрировать несколько операций без перемены базирования детали. Выбор станочного оборудования зависит как от структуры обрабатываемых деталей, так и от возможностей производства.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Производственные машиностроительные системы являются системами большими и сложными, поэтому для формализации и оптимизации элементов такой системы используются разные модели в зависимости от цели исследования. Задача оптимизации структуры производственной системы сводится к выбору, интерпретации и модификации существующих моделей в предметной области машиностроения.

Рассмотрим основные этапы построения моделей деталей и производственной системы на примере группы корпусных деталей [5]. Корпусные детали представляют собой базовые детали машин, предназначенные для установки в них присоединяемых деталей и сборочных единиц. Для группы, состоящей из шести деталей типа *корпус*, построим обобщенную деталь (N), в состав которой будут входить все поверхности деталей группы (рис. 1).

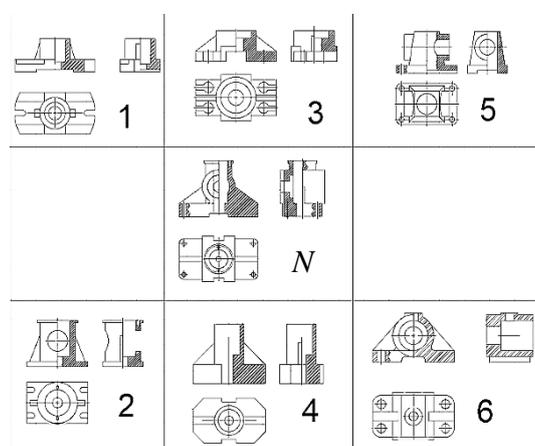


Рис. 1. Группа из шести деталей и обобщенная деталь N

Используя аппарат структурного моделирования, опишем обобщенную деталь вектором составляющих ее поверхностей, упорядоченных в соответствии с последовательностью их обработки: F_1 – нижняя плоскость корпуса; F_2 – верхняя плоскость корпуса; F_3, F_4 – боковые плоскости корпуса; F_5, F_6 – передняя и задняя плоскости корпуса; F_7, F_8 – плоскости торцов цилиндра; $F_9–F_{11}$ – пазы; $F_{12}–F_{16}$ – отверстия в корпусе; F_{17} – внешняя поверхность фланца; F_{18} – отверстие с резьбой в торце фланца [6]. Соответственно, каждая деталь группы моделируется вектором $F_1–F_{18}$. Так формируется булева матрица деталей группы (рис. 2). Здесь \bullet означает, что элемент F_j принадлежит i -й детали ($j = 1…18, i = 1…6$).

№ детали	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	F_{16}	F_{17}	F_{18}
1	•	•	•	•					•			•	•	•			•	
2	•	•	•	•	•	•			•			•	•	•	•		•	•
3	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•			•	
4	•	•	•	•	•	•					•		•	•			•	
5	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•		•			
6	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	

Рис. 2. Матрица состава элементов деталей группы

Вектор $F1-F18$ можно использовать при построении матрицы станочного оборудования (рис. 3). Здесь \bullet означает, что элемент F_j может быть получен в результате обработки на соответствующем станке ($j = 1 \dots 18$).

Станок/контур	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	$F5$	$F6$	$F7$	$F8$	$F9$	$F10$	$F11$	$F12$	$F13$	$F14$	$F15$	$F16$	$F17$	$F18$
6P10	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•						
2P614									•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
2A622F4	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•	•
2620	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
Skoda W100	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		
DMU 50 ecoline	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Рис. 3. Матрица станочного оборудования

Матрица станочного оборудования описывает двудольный граф, в котором множество вершин состоит из двух подмножеств (множества элементов обобщенной детали и множества станков), а ребра – возможность получения элемента детали на соответствующем станке (рис. 4) [7].

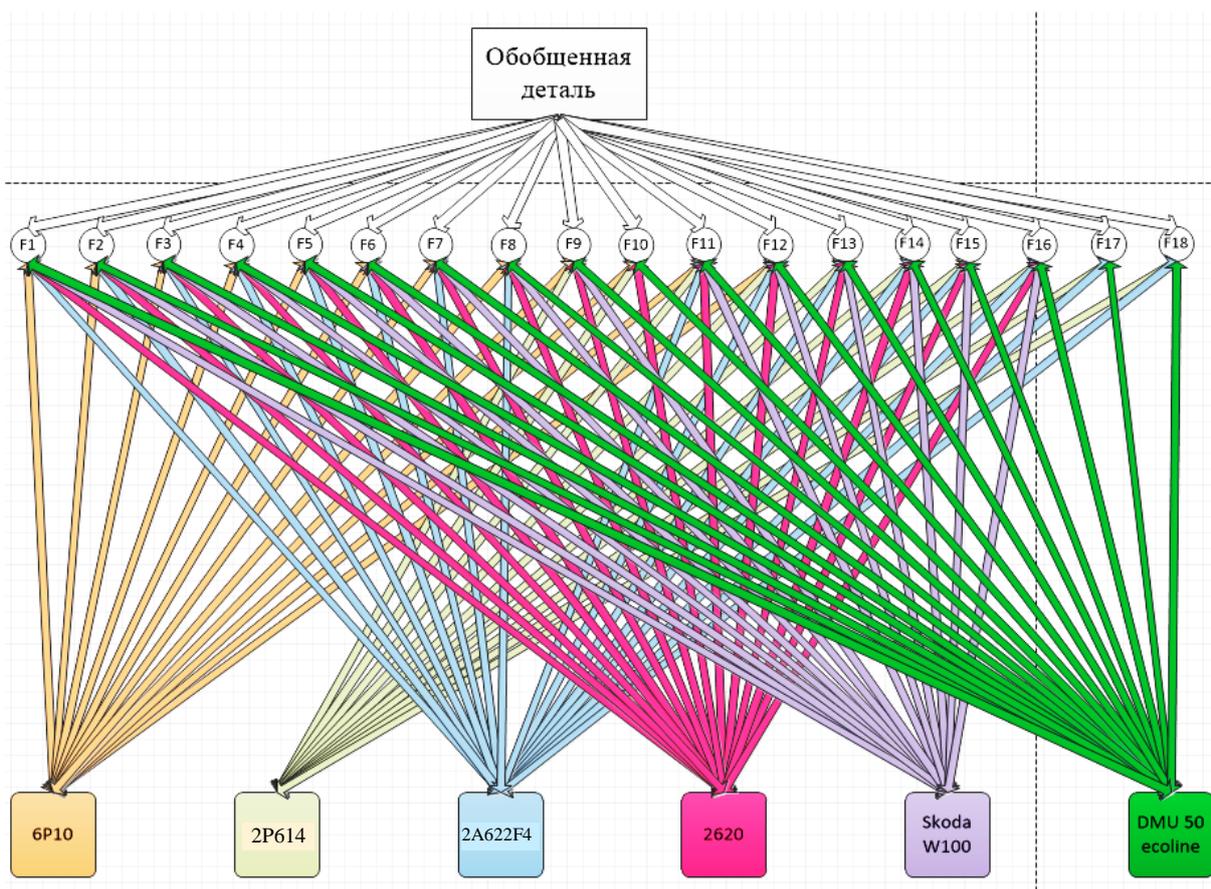


Рис. 4. Двудольный граф, описывающий связь станков и элементов обобщенной детали группы

Чтобы решить задачу минимизации станочного оборудования, необходимо иметь все возможные варианты обработки обобщенной детали, используя приведенный выше двудольный граф [8]. Нужно построить взвешенный орграф с истоком s , стоком t

и вершинами O_{ij} для каждого элемента детали F_j и каждого станка C_i , на котором можно обработать этот элемент (рис. 5). Все дуги вида $O_{ij} \rightarrow O_{i,j+1}$ нагрузим нулем, остальные – единицей.

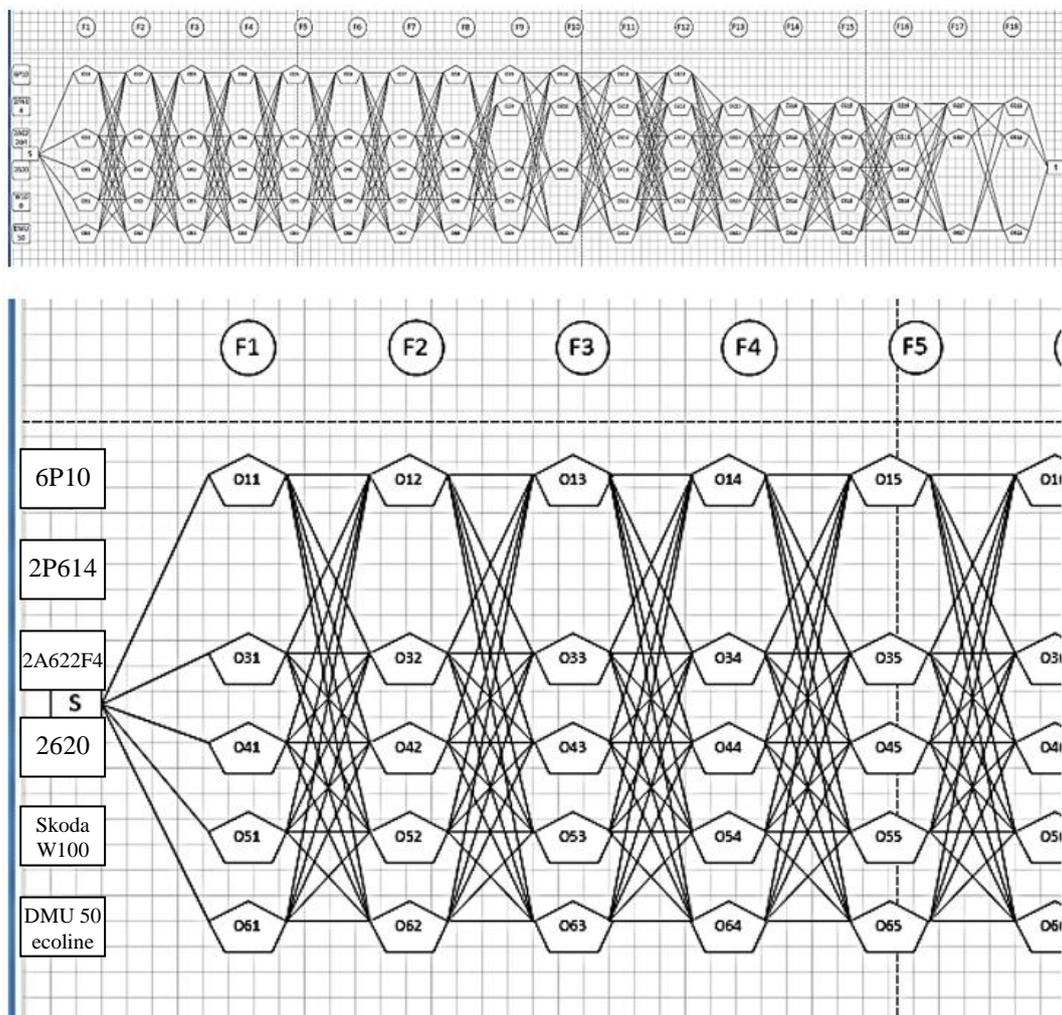


Рис. 5. Формирование маршрутов обработки обобщенной детали для поиска кратчайшего пути в графе

Произвольный путь из истока s в сток t на построенном графе имеет следующие свойства: промежуточные вершины графа определяют разбиение последовательности обработки элементов обобщенной детали на операции, причем при любом варианте существует некоторый путь из s в t ; множество вершин, соответствующее участку пути с нулевой длиной, определяет одну операцию; дуга с единичной длиной определяет смену станка. Таким образом, задача минимизации количества единиц станочного оборудования для обработки группы деталей сводится к определению кратчайшего пути в графе. В качестве оценочной функции при оптимизации структуры станочной системы может быть выбрано суммарное время или стоимость получения деталей. Для этого вершины графа O_{ij} заменим двумя вершинами, соединенными дугой $U_{ij} \rightarrow V_{ij}$, нагруженной временем (стоимостью) обработки элемента детали F_j на соответствующем станке C_i . Все дуги $V_{ij} \rightarrow U_{k,j+1}$ нагружены временем (стоимостью) транспортирования от станка i -го к k -му, а все дуги вида $s \rightarrow U_{i1}$, $V_{i1} \rightarrow t$, $V_{ij} U_{i+1}$ – нулем. Тогда, решив задачу нахождения минимального пути в графе из s в t , можно

определить оптимальную структуру станочной системы для обработки группы деталей с максимальной производительностью (минимальной стоимостью).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вне зависимости от того, для какого типа организации производственного процесса (типового, группового или модульного) производится оптимизационный выбор станочного оборудования, решение задачи оптимизации структуры производственной системы в условиях многономенклатурного производства может осуществляться по одному и тому же алгоритму. Такой алгоритм должен включать следующие шаги: разбиение всех деталей номенклатуры выпускаемых изделий на группы; выявление всех возможных вариантов обработки элементов деталей группы на станках производственной системы; построение структурных моделей станочных систем и (при выборе оценочной функции, соответствующей цели исследования) определение оптимального маршрута обработки (оптимальной структуры станочной системы). Таким образом, весь процесс проектирования разделяется на несколько этапов, на каждом из них используются разные модели, которые должны быть алгоритмически объединены. Такой метод позволяет эффективно решать основные задачи при автоматизации технологического проектирования в машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалевский С.В., Онищук С.Г., Борисенко Ю.Б. Технология обработки типовых деталей и сборки машин. Краматорск: ДГМА. 2015. 119 с.
2. Шабашов А.А. Проектирование машиностроительного производства: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский ун-т. 2016. 75 с.
3. Мартыненко О.В. Применение модульного принципа в конструкторско-технологической подготовке производства // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 12-4. С. 605–608.
4. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Калинин Н.А. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 1 (29). С. 59–65.
5. Sayama H. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. Open SUNY Textbooks. 2015. 498 p.
6. Павлов В.В. CALS-технологии в машиностроении (математические модели). М.: ИЦ МГТУ СТАНКИН. 2002. 238 с.
7. Омельченко А.В. Теория графов. М.: МЦНМО. 2018. 415 с.
8. Тимковский Ю.Г. Дискретная математика в мире станков и деталей: введение в математическое моделирование задач дискретного производства. М.: Наука. 1992. 144 с.

Для цитирования: Полетаева Е.В., Горлов И.В. Оптимизация структуры производственной системы в условиях многономенклатурного машиностроительного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета*. Серия «Технические науки». 2022. № 2 (14). С. 77–82.

OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION SYSTEM STRUCTURE IN A MULTI-NOMENCLATURE MACHINE-BUILDING PRODUCTION

E.V. POLETAEVA, Cand. Sc., I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: epolet2010@mail.ru

In the conditions of small-scale machine-building production, the frequent change in the nomenclature of manufactured products dictates the need to accelerate technological design and improve its quality by optimizing engineering solutions using computer-aided design tools. The article deals with one of the important tasks of optimizing the structure of a production system, the basis of which is a machine tool system. Models describing the production system at different stages of design are presented. An optimization algorithm allowing to combine several models into one system which can be used for modern progressive technologies is developed. An example of model building when optimizing the structure of production machine tool system for machining of case parts at the group organization of machine building production is given.

Keywords: design automation, technological preparation of production, multi-nomenclature production, modeling, optimization, structure of production system.

REFERENCES

1. Kovalevsky S.V., Onishchuk S.G., Borisenko Yu.B. Tekhnologiya obrabotki tipovykh detaley i sborki mashin [Processing technology of standard parts and machine assembly]. Kramatorsk: DGMA. 2015. 119 p.
2. Shabashov A.A. Proyektirovaniye mashinostroitel'nogo proizvodstva [Designing machine-building production]. Ekaterinburg: Uralskiy un-t. 2016. 75 p.
3. Martynenko O.V. Application of the modular principle in the design and technological preparation of production. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovaniy*. 2016. No. 12-4, pp. 605–608. (In Russian).
4. Gorlov I.V. Poletaeva E.V., Kalinin N.A. Group technology as the basis for the automation of wide-range production. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No. 1 (29), pp. 59–65. (In Russian).
5. Sayama H. Introduction to the modeling and analysis of complex systems. Open SUNY Textbooks. 2015. 498 p.
6. Pavlov V.V. CALS-tekhnologii v mashinostroyenii (matematicheskiye modeli) [CALs technologies in mechanical engineering (mathematical models)]. Moscow: MGTU STANKIN. 2002. 238 p.
7. Omelchenko A.V. Teoriya grafov [Graph theory]. Moscow: MTsNMO. 2018. 415 p.
8. Timkovsky Yu.G. Diskretnaya matematika v mire stankov i detaley: vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye zadach diskretnogo proizvodstva [Discrete Mathematics in the World of Machine Tools and Parts: An Introduction to Mathematical Modeling of Discrete Manufacturing Problems]. Moscow: Nauka. 1992. 144 p.

Поступила в редакцию/received: 03.01.2022; после рецензирования/revised: 12.01.2022;
принята/accepted: 14.01.2022