

УДК 621.9:658.512

**РЕКУРСИВНАЯ ИЕРАРХИЯ В СТРУКТУРЕ КОМПАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ**

**канд. техн. наук, доц. Д.Н. СВИРСКИЙ**  
(Витебский государственный технологический университет)

*Рассматривается компактный подход к решению проблемы комплексного ресурсосбережения на машиностроительных предприятиях. Структура компактной производственной системы представлена в виде рекурсивной иерархии. Выделены и исследованы основные структурные уровни компактного производства. Предложены пути снижения ресурсоемкости производственной системы на каждом из уровней путем выделения соответствующих инвариантных и адаптивных компонентов. На верхнем уровне анализ системы производства машиностроительной продукции на предприятии в целом предлагаемый подход позволяет оптимизировать станочный парк вспомогательного производства. На уровне подсистемы основного производства возможна оптимизация состава и структуры комплекса технологического оборудования на основе выделения в инвариантной и адаптивной частях взаимодополняющих и взаимозаменяемых станков, а также применения прогрессивного компьютеризированного оборудования. На уровне отдельного станка модель рекурсивной иерархии позволила упростить его конструкцию без сужения технологических возможностей.*

**Введение.** Актуальная проблема комплексного ресурсосбережения на отечественных предприятиях машиностроительной отрасли может быть разрешена с помощью организации систем компактного интеллектуального производства [1]. Компактная производственная система (КПС) определена как эргатический комплекс, сочетающий свернутость в пространстве и времени с минимальным уровнем функциональной и ресурсной избыточности, поддерживаемый высокоинтеллектуальными средствами компьютерного проектирования, мониторинга и управления [2]. Компактный (минималистский) подход к созданию конкурентоспособного промышленного предприятия предполагает выделение и совершенствование инвариантных и адаптивных компонентов в его организационно-технологической и производственно-технической структуре. Эта процедура осуществляется в три этапа:

- 1) макроструктурирование;
- 2) оптимизационный структурный синтез;
- 3) адаптивная структурная настройка КПС.

Важнейший, второй этап проектирования КПС осуществляется на основе следующих принципов ее построения:

- строгое соответствие структуры КПС цели ее создания;
- рекурсивная декомпозиция иерархической структуры КПС;
- локализация функциональных инвариантов;
- функциональная достаточность компонентов КПС;
- оптимальное соотношение затрат на функциональный инвариант и лабильный компенсатор на каждом уровне иерархии КПС;
- эволюционный подход к решению задач развития и модернизации КПС;
- отображение этапов развития КПС в ее структуре.

*Принцип соответствия структуры системы ее цели* в концентрированной форме выражает, во-первых, то, что цель является системообразующим фактором; во-вторых, поставленная цель может быть достигнута в той или иной степени созданием и (или) использованием множества структур КПС; в-третьих, достижение цели осуществляется выбранной структурой КПС посредством выполнения иерархически организованных функций.

*Принцип рекурсивной декомпозиции иерархической структуры КПС* предусматривает наличие инвариантного и адаптивного модулей на каждом уровне иерархии декомпозиционной структуры системы.

*Принцип локализации функционального инварианта* позволяет на основе первого принципа выделить общие существенные (т.е. инвариантные) элементы множеств целей, функций и структур многоцелевых КПС.

*Принцип функциональной достаточности* регламентирует степень параметрической реализации функций любого уровня иерархии не выше минимального необходимого значения для достижения цели КПС, так как любое превышение этого значения ведет к неоправданному увеличению затрат на создание и эксплуатацию КПС.

Принцип оптимального соотношения затрат на функциональный инвариант и лабильный адаптер (компенсатор) указывает на существование наилучшего варианта распределения взаимозамещаемых ресурсов на реализацию постоянной и переменной частей КПС в соответствии с их функциональной значимостью (важностью).

Принцип эволюционного подхода к решению задач развития и модернизации КПС позволяет осуществлять перманентную структурную адаптацию КПС к изменяющимся внешним условиям. Важно особо отметить, что адаптивная структурная настройка КПС в ходе ее функционирования происходит за счет изменения (замены) адаптера самого нижнего структурного уровня КПС.

Принцип отображения этапов развития КПС в ее структуре определяет стратегию модернизации КПС.

**Кибернетическая модель КПС.** Рассматривая машиностроительное производство как систему управления, традиционный кибернетический подход к ее оптимизации долгое время основывался на принципе Ползунова – Уатта – «управлению (точнее регулированию) по отклонению». В последнее время все больше внимания стало уделяться другому способу построения систем оптимального управления, основанному на принципе Понселе – «управлению по возмущению» [3]. Еще в 1930-х годах проф. Г.В. Щипанов нашел достаточные математические соотношения, обеспечивающие компенсацию возмущений в прецизионных системах управления. Этот факт стал основой построения теории инвариантности.

Одно из основных требований к современным инвариантным системам управления – наличие двух каналов передачи возмущений (принцип «двухканальности», предложенный Б.Н. Петровым).

На схеме (рис. 1) изменения потока заказов (возмущения) воспринимаются адаптивным компонентом организационно-технологической структуры КПС и компенсируются в нем:  $f - f = 0$ , так что основная (инвариантная) часть производства ритмично функционирует в нормальном заданном режиме.

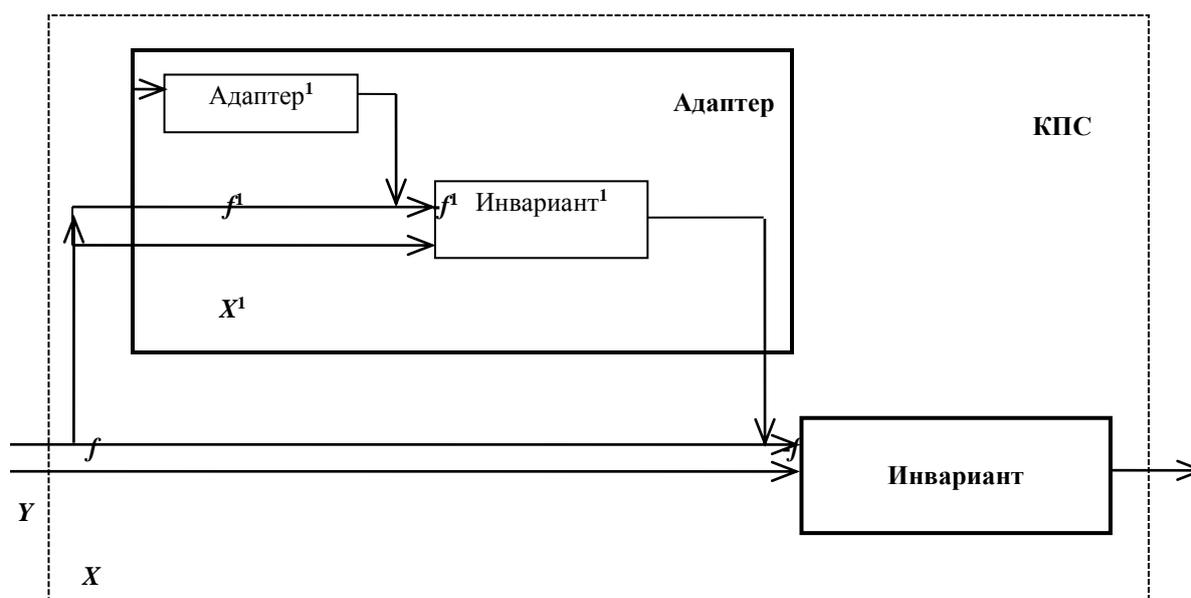


Рис. 1. Кибернетическая модель КПС

Разработанная в соответствии с принципом Понселе и достижениями современной теории инвариантных систем автоматического управления/регулирования по возмущению структура КПС содержит инвариантный и адаптивный блоки. Последний играет роль компенсатора, в котором возмущающие воздействия  $f$  инвертируются в  $-f$  таким образом, что основная (инвариантная) часть КПС всегда функционирует в нормальном (заданном) режиме (см. рис. 1).

**Рекурсивная декомпозиция КПС.** Как было отмечено ранее, принцип рекурсивной декомпозиции иерархической структуры КПС предусматривает наличие инвариантного и адаптивного модулей на каждом уровне иерархии декомпозиционной структуры системы:

$$St(KPC) = \bigcup_{i=1}^N Inv_i \cup Adp_N,$$

а принцип отображения этапов развития КПС в ее структуре определяет стратегию модернизации КПС:

$$f: [St(KPC)_{T=0} \Rightarrow \dots \Rightarrow St(KPC)_{T=T}] \rightarrow St(KPC)_{T=T}.$$

Таким образом, более или менее устойчивое состояние рыночной конъюнктуры в любой текущий момент делает возможным выделение инвариантной части адаптера (см. рис. 1), т.е. появление адаптивного компонента на еще более низком уровне. В то же время относительно долговременная устойчивость номенклатуры выпускаемой продукции позволяет «отбросить» длительно неиспользуемые кластеры «инвариант + адаптер» на любом уровне иерархической структуры КПС. Тогда развитие КПС, изменение ее структуры и производственного профиля на фоне ассортиментно-валового пространства рынка напоминает поведение потока жидкости, растекающейся по неровной поверхности, но при этом «рельеф рыночной конъюнктуры» перманентно изменяется. Структура компактного производства в целом имеет вид многоуровневой рекурсивной иерархии (рис. 2). Тем самым удается локализовать структурную и ресурсную избыточность всей производственной системы предприятия в пределах адаптирующего компонента самого нижнего уровня.

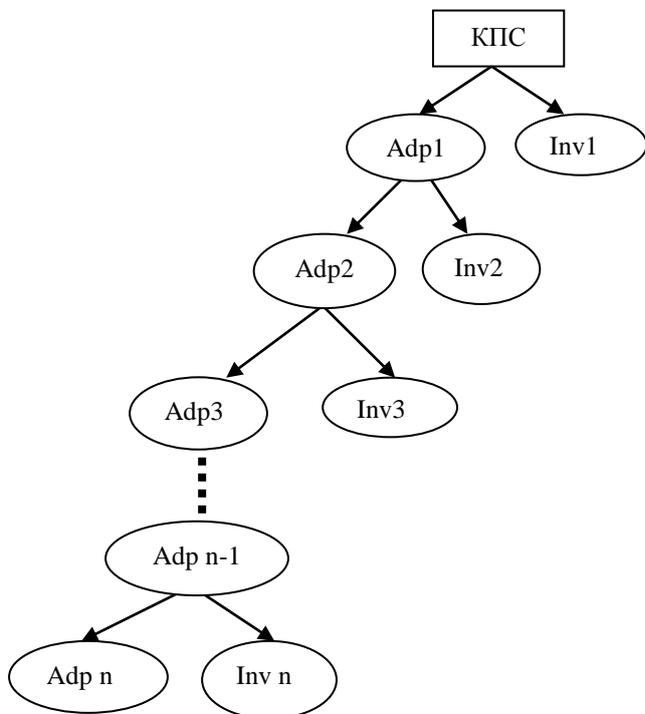


Рис. 2. Рекурсивная декомпозиция структуры КПС

**Уровни рекурсивной декомпозиции КПС.** На обычном машиностроительном предприятии с достаточно развитой производственной структурой роль инварианта играет основное производство ( $П_1$ ), а в качестве адаптивного компонента выступают обеспечивающие его бесперебойную работу, т.е. «вспомогательные»: опытное ( $П_0$ ), инструментальное ( $П_2$ ), ремонтное ( $П_3$ ) производства с соответствующими технологиями  $T_i$  и продукцией  $Q_i$ .

На рисунке 3 схематично показана тесная «генетическая» связь ( $\Omega_{ij}$ ) перечисленных структурных подразделений. Анализ схемы позволяет получить следующие формальные зависимости:

$$Q_2 = \Omega_{20}^{-1} Q_0 \text{ и } Q_3 = \Omega_{30}^{-1} Q_0, \text{ где } Q_0 = T_0 (П_0). \tag{1}$$

Выражение (1) представляет собой самостоятельную иллюстрацию известного положения о существенном подобии опытного образца продукции ее серийному экземпляру и об опосредованном (технологическом) отображении этого подобия в формообразующей оснастке и оборудовании. Тогда для совокупной продукции  $Q_\Sigma$  всех видов производств рассматриваемого предприятия справедливо формальное выражение:

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_0 + \Omega_{20}^{-1} Q_0 + \Omega_{30}^{-1} Q_0,$$

или

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + (1 + \Omega_{20}^{-1} + \Omega_{30}^{-1}) \cdot (T_0(P_0)). \quad (2)$$

Согласно выражению (2) выделение организационно-технического инварианта единичного (опытного) производства  $P_0$  дает возможность «свернуть» опытное, инструментальное и ремонтное производства в единую компактную систему обслуживающего хозяйства на базе парка универсального оборудования, тем самым резко сократив ресурсную избыточность предприятия в целом.

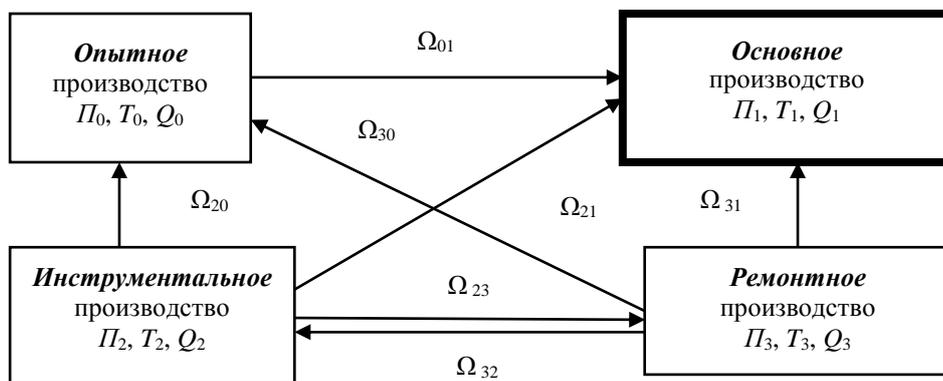


Рис. 3. Обобщенная структура компактного машиностроительного производства

Структура комплекса технических средств КПС на следующем уровне рассмотрения тоже состоит всего из двух компонентов: инвариантного и адаптивного.

В ходе макроструктурирования КПС выделенный технологический инвариант трансформируется в технический инвариант комплекса станочного оборудования [4]. В идеале весь технологический инвариант полностью реализуется одной единицей оборудования. При этом операции (переходы) технологического адаптера осуществляются на другом оборудовании. Эти виды станков можно назвать независимыми друг от друга (рис. 4). Обычно же для реализации технологического инварианта или адаптера требуется не по одному станку, а несколько взаимодополняющих станков, на каждом из которых выполняется часть соответствующих переходов. Для увеличения программы выпуска в станочную систему могут вводиться взаимозаменяемые станки. В процессе выбора технических средств КПС решается задача параметрического синтеза, т.е. определяются оптимальные значения номиналов параметров структурных компонентов при условии обеспечения требуемых функционально-стоимостных показателей системы в целом.

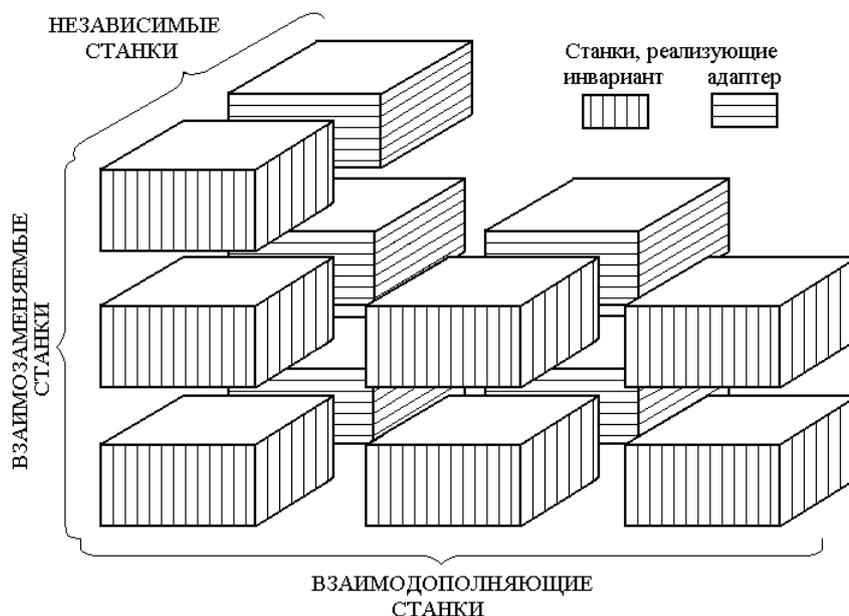


Рис. 4. Структура станочной системы компактного производства

Специально проведенное исследование применяемых технологических процессов и парка станочного оборудования на машиностроительных предприятиях г. Витебска показало, что наряду с традиционным оборудованием в адаптивную часть комплекса технических средств КПС целесообразно ввести компьютеризированные станки для «быстрого изготовления» (Rapid Manufacturing) изделий сложной формы по их электронным моделям без применения формообразующей оснастки. Структурная схема компактного модуля послойного синтеза, реализующего с помощью собственных инварианта и адаптера подобную компьютерную технологию, приведена на рисунке 5.

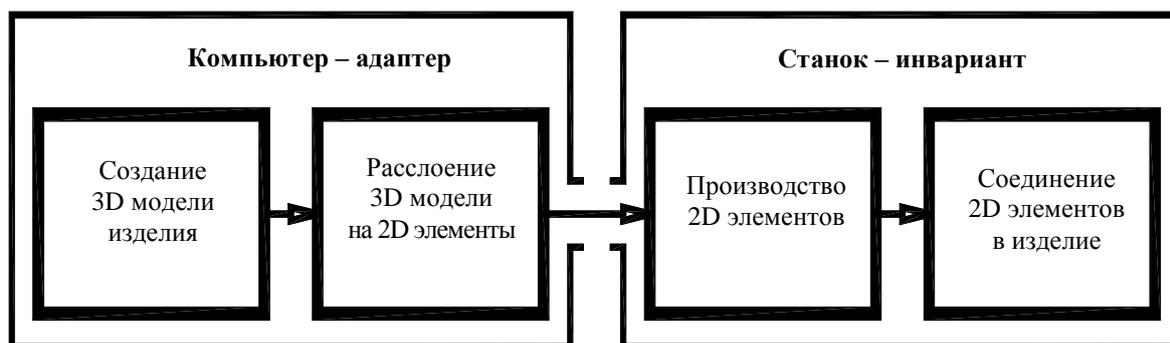


Рис. 5. Функционально-структурная модель компактного производственного модуля

Компактный подход позволяет оптимизировать и структуру единиц универсального металлорежущего оборудования с расширением его технологических возможностей.

Так, при анализе схем заточки разнообразного металлорежущего инструмента был выделен инвариант формообразования его рабочих (режущих) поверхностей, наиболее просто реализованный в универсально-заточном станке модели 3А64 с помощью электромеханического привода главного движения и пяти ручных перемещений исполнительных органов. Однако полный комплект прилагаемых к станку приспособлений включает более тридцати единиц [5]. Рассматривая этот набор как адаптер первого уровня, была выделена инвариантная часть и синтезирована конструктивная схема универсального приспособления (рис. 6). При этом несколько насадных приспособлений (таблица) представляют собой адаптер второго уровня.

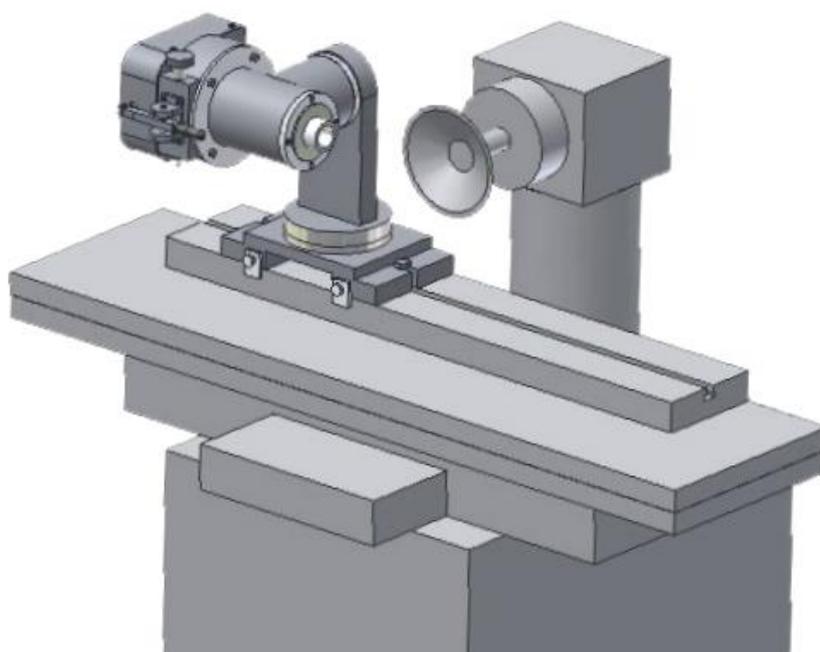
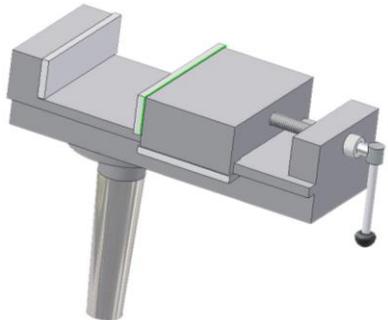
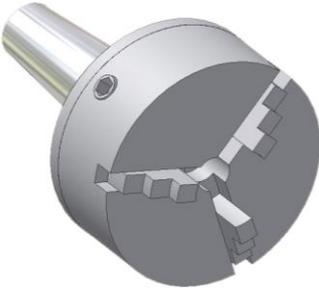
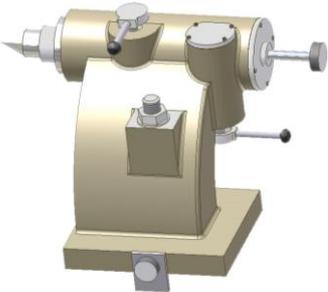


Рис. 6. Общий вид широкоуниверсального заточного станка  
Набор насадных приспособлений и задняя бабка к широкоуниверсальному заточному станку

Трехповоротные тиски	Трехкулачковый патрон	Приспособление для подточки поперечной режущей кромки сверла
		
Приспособление для установки резцовых головок	Передний центр	Задняя центровая бабка
		

**Заключение.** Предлагаемый компактный подход к комплексному ресурсосбережению при производстве машиностроительной продукции предполагает кибернетическое моделирование оптимизируемых технологических систем рекурсивной иерархией. Исследованы возможности такого представления на трех уровнях: предприятия, станочного комплекса основного производства и единицы универсального технологического оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 268 с.
2. Свирский, Д.Н. Компактная производственная система как объект автоматизированного проектирования / Д.Н. Свирский. – Минск: ИТК НАН Беларуси, 2000. – 48 с.
3. Вальков, В.М. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / В.М. Вальков, В.Е. Вершин. – Л.: Политехника, 1991. – 269 с.
4. Свирский, Д.Н. Организация и технология компактного производства / Д.Н. Свирский, Б.Н. Сухиненко. – Витебск: ВГТУ, 2008. – 200 с.
5. Меницкий, И.Д. Универсально-заточные станки / И.Д. Меницкий, Ю.А. Каплан. – М.: Машиностроение, 1967. – 228 с.

Поступила 22.05.2008