

УДК 621:65.011

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПАКТНОГО ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

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

Исследуется проблема создания ресурсосберегающего производства машиностроительной продукции на основе компактных производственных систем. Предложена методика их организационно-технологического проектирования, предусматривающая использование компьютерных методов распознавания образов и комбинаторной оптимизации. Представлены этапы макроструктурирования компактной производственной системы, стадии оптимизационного структурного синтеза и адаптивной структурной настройки. Показана главная процедура на стадии макроструктурирования – выделение конструктивного инварианта номенклатуры потенциально конкурентоспособной продукции. Предлагается подход к формализации выделения конструктивного инварианта продукции, базирующийся на рассматриваемых в статье положениях.

Введение. Производственный процесс на любом машиностроительном предприятии осуществляется в результате организационно-технического взаимодействия *технологической системы* (ГОСТ 22954-78) основного производства с другими подразделениями и заводскими службами. Образующую основу технологической системы составляет *технологический процесс*, содержащий действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства (ГОСТ 3.1109-82), т.е. представляющий собой организационную структуру управления потоками производственных ресурсов. Таким образом, организационный аспект имеет определяющее значение для успешного создания новой и реструктуризации существующей производственных систем предприятия. Мировым тенденциям к ресурсосбережению и интеллектуализации машиностроительного производства в полной мере отвечает концепция компактного интеллектуального производства [1]. Организационно-технологическое проектирование компактной производственной системы главным образом проводится на стадии ее макроструктурирования (рис. 1). Его результаты используются на последующих стадиях оптимизационного структурного синтеза и адаптивной структурной настройки [2].

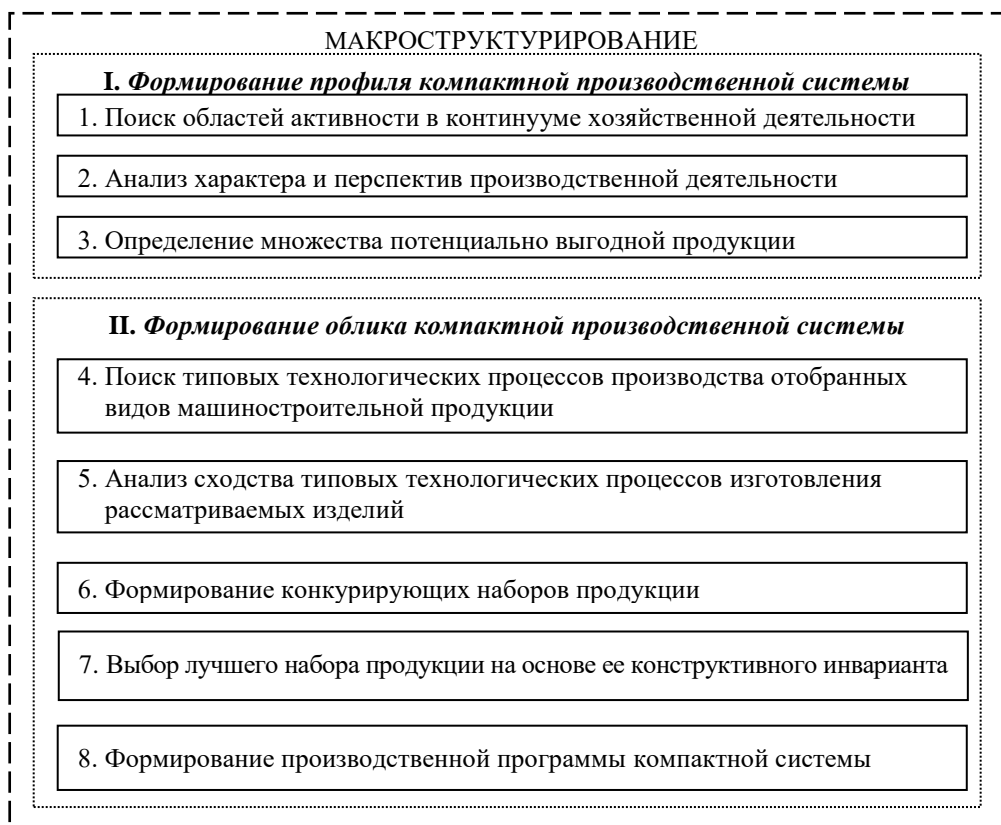


Рис. 1. Этапы макроструктурирования компактной производственной системы

Теоретические предпосылки выделения инвариантов компактного производства. Организация и функционирование компактного производства предполагает выделение и последовательное преобразование в жизненном цикле конструктивного, технологического и т.д. инвариантов выпускаемой наукоемкой продукции. Главной процедурой на стадии макроструктурирования (см. рис. 1) является выделение конструктивного инварианта номенклатуры потенциально конкурентоспособной продукции. Ранее [3] показана необходимость анализа служебного назначения изделий (деталей) для корректной локализации конструктивного инварианта компактного производства. Нами предлагается подход к формализации выделения конструктивного инварианта продукции, базирующийся на следующих положениях.

Утверждение 1. Номинальная поверхность конкретной детали как твердого объемного тела представляет собой сочетание ее основной формы и особенностей. Термин «основная форма» введен в свое время разработчиками ГОСТа 14.417-81. Согласно указанному стандарту основную форму, например, осесимметричных деталей составляют элементы цилиндрических, конических, а также соосных с ними криволинейных поверхностей и поверхностей, имеющих квадратную, шестигранную и т.п. форму плоских торцевых поверхностей.

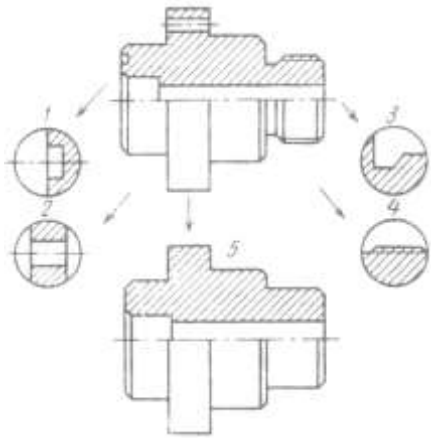


Рис. 2. Конструктивные элементы детали: 1 – торцовая канавка; 2 – группа отверстий во фланце; 3 – резьбовая канавка; 4 – резьба; 5 – элемент основной формы [5]

Пример основной геометрической формы (контура, обвода) показан на рисунке 2. Дополнительные элементы – пазы, канавки для уплотнения и т.п., улучшающие условия контакта с другими деталями; галтели, канавки для выхода инструмента, повышающие технологичность конструкции; окна, карманы, сокращающие массу детали – рассматриваются в качестве «специфики» («features» [4]) конструкции каждой детали.

Утверждение 2. Деталь выполняет служебное назначение благодаря наличию рабочих участков своей поверхности, имеющих определенную (заданную) топологию. Здесь под топологией понимается пространственное взаиморасположение, конфигурация и требуемая микрогеометрия данных участков поверхности.

Следует отметить, что разработку конструкции любой детали всегда начинают с проектирования рабочих участков ее поверхности, постепенно оформляя объем, занимаемый ею в пространстве, с помощью так называемых «свободных поверхностей», непосредственно не участвующих в выполнении служебного назначения.

Из утверждений 1 и 2 следует утверждение 3.

Утверждение 3. Основную форму детали определяет топология рабочих участков ее поверхности. Именно топология рабочих участков, понимаемая в указанном смысле, превращает кусок конструкционного материала в общественно необходимый технический объект. Из утверждений 1, 2 и 3 следует утверждение 4.

Утверждение 4. Основная форма детали вообще и топология рабочих участков ее поверхности в частности могут быть выбраны в качестве конструктивного инварианта продукции компактного производства деталей машин. На рисунке 3 показан пример конструктивного инварианта условной совокупности параметрически различающихся между собой деталей «тождественной конфигурации» [6], представляющий в этом случае направляющий паз с отверстием.

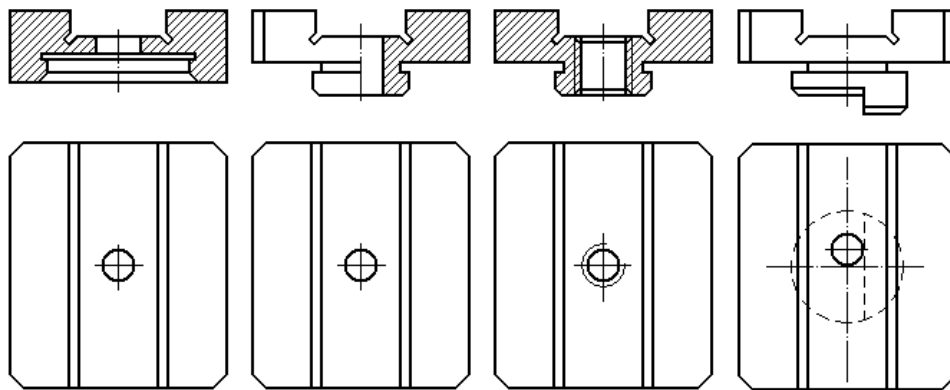


Рис. 3. Направляющий паз с отверстием как конструктивный инвариант условной совокупности деталей

Для сравнения и анализа подобия основных форм изделий (деталей) можно использовать метод, предложенный в работе [7] и проиллюстрированный на примере осесимметричных деталей (рис. 4).

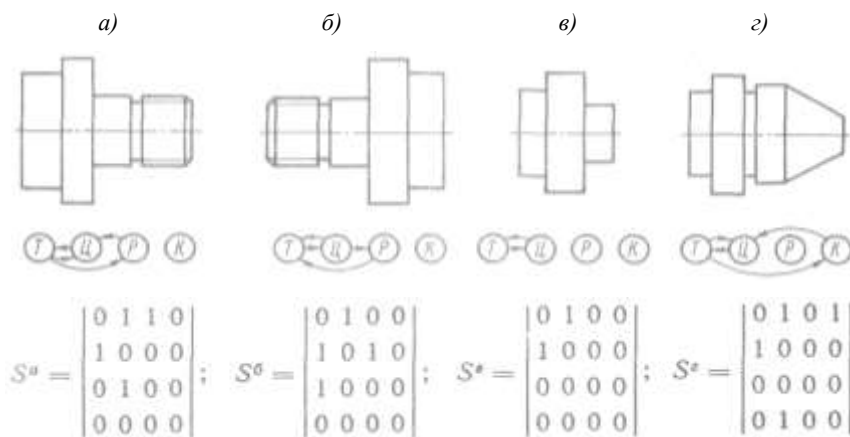


Рис. 4. Пример сравнения основных форм деталей $a - z$ ($T, Ц, P, K$ – соответственно торцовая, цилиндрическая, резьбовая и конусная поверхности [7])

Каждой детали ставится в соответствие граф, в котором множество вершин соответствует множеству типов поверхностей, образующих основную форму детали. Граф строится по правилу: «между вершинами m и n существует дуга (m, n) , если поверхность n следует за поверхностью m при заданном направлении обхода поверхностей детали». Каждый из построенных графов представляется матрицей смежности S . Тогда, если провести дизъюнктивное сложение матриц S^u и S^z по правилу $s_{ij}^u \oplus s_{ij}^z$ и результат будет равен нулевой матрице, то основные формы деталей совпадают. Если результат – ненулевая матрица, то может быть три случая:

- 1) одинаковые детали ориентированы в разных направлениях (см. рис. 4, а, б), в этом случае дизъюнктивное сложение матриц S^u и S^z по правилу $s_{ij}^u \oplus s_{ji}^z$ устраняет это несоответствие;
- 2) форма одной детали является составной частью формы другой детали (см. рис. 4, а, в), в этом случае при выполнении операций над матрицами S^u и S^z по правилам $(s_{ij}^u \otimes s_{ij}^z) \oplus s_{ij}^z$ или $(s_{ij}^u \otimes s_{ij}^z) \oplus s_{ij}^u$, или $(s_{ij}^u \otimes s_{ji}^z) \oplus s_{ji}^z$ или $(s_{ij}^u \otimes s_{ji}^z) \oplus s_{ij}^u$, где \otimes – поэлементное логическое умножение, результат хотя бы в одном случае должен быть равен нулевой матрице;
- 3) формы деталей различаются по составу или последовательности (см. рис. 4, а, г), тогда выполнение поэлементного логического умножения и дизъюнктивного сложения над матрицами не дает нулевой матрицы.

Для примера (см. рис. 4) матрицы смежности построены так, чтобы первые строка и столбец соответствовали торцу; вторые – цилиндру; третьи – резьбе; четвертые – конусу.

Когда детали имеют одинаковые формы, например, случай a , то $S^a \oplus S^a = 0$, где 0 – нулевая матрица. При сравнении форм деталей a и b $S^a \oplus S^b \neq 0$, но $S^a \oplus (S^b)' = 0$, где S' – транспонированная матрица S . При сравнении форм деталей a и v , a и z соответственно $S^a \oplus S^v \neq 0$ и $S^a \oplus (S^v)' \neq 0$, $S^a \oplus S^z \neq 0$ и $S^a \oplus (S^z)' \neq 0$. Но если воспользоваться правилами, описанными для определения включаемости формы одной детали в другую, то для деталей a и v $(S^a \otimes S^v) \oplus S^v = 0$, а для деталей a и z $(S^a \otimes S^z) \oplus S^z \neq 0$ и т.д.

Как отмечали сами авторы предлагаемого формализма, «этот метод не единственный, он может развиваться» [7]. Например, в форму экспресс-анализа технологического подобия деталей [8] путем сравнения их «главных» [9] (т.е. основных) форм.

Использование интеллектуальных информационных технологий. Анализ сходства и различия объектов лежит в основе решения задачи классификации, которая в свою очередь представляет одну из проблем, рассматриваемых современной теорией распознавания образов.

В настоящее время компьютерную поддержку решения классификационной проблемы методами распознавания образов нередко осуществляют на основе нейросетевых технологий искусственного интеллекта. Поэтому для эффективной компьютеризации процедуры выделения конструктивного инварианта при макроструктурировании компактной производственной системы автор предлагает использовать программное обеспечение, имитирующее работу сети искусственных (формальных) нейронов.

Функционирование формального нейрона (рис. 5, а), состоящего из взвешенного сумматора и нелинейного элемента, определяется формулами:

$$NET = \sum_i w_i x_i;$$

$$OUT = F(NET - \theta),$$

где x_i – входные сигналы, совокупность всех входных сигналов нейрона образует вектор x ; w_i – весовые коэффициенты, совокупность весовых коэффициентов образует вектор весов w ; NET – взвешенная сумма входных сигналов, значение NET передается на нелинейный элемент; θ – пороговый уровень данного нейрона; F – нелинейная функция, называемая функцией активации.

Нейрон имеет несколько входных сигналов x и один выходной сигнал OUT . Параметрами нейрона, определяющими его работу, являются: вектор весов w , пороговый уровень θ и вид функции активации F . Формальные нейроны объединяются в сеть различным образом. Самым распространенным видом нейросети в последнее время стал «многослойный персептрон» (рис. 5, б), состоящий из произвольного количества слоев нейронов.

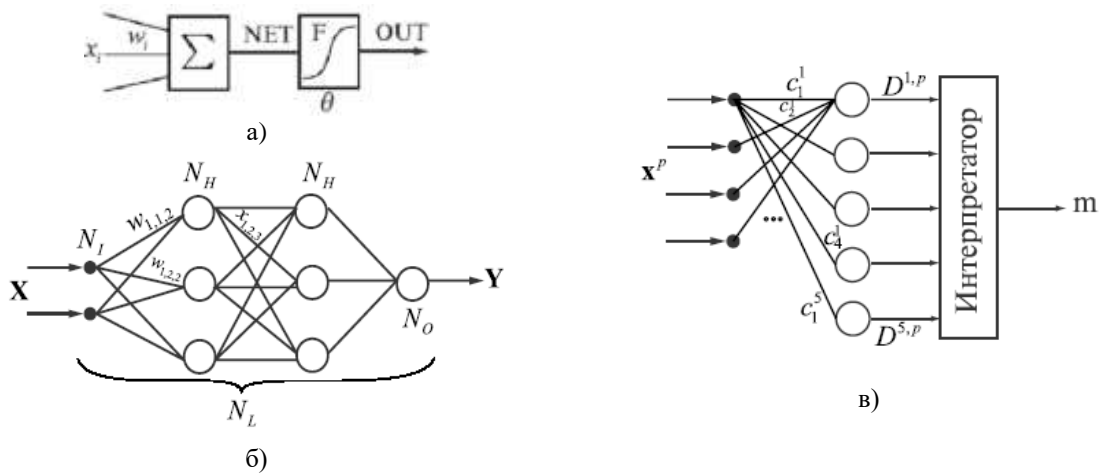


Рис. 5. Искусственные нейроны

Нейроны каждого слоя соединяются с нейронами предыдущего и последующего слоев по принципу «каждый с каждым». Первый слой (слева) с N_1 нейронами называется сенсорным или входным; внутренние слои с нейронами N_H называются скрытыми или ассоциативными; последний (самый правый на рис. 5, б) с одним нейроном N_O – выходным, или результативным, так как в нем формируется вектор выходных сигналов Y . Количество нейронов в слоях может быть произвольным, но обычно во всех скрытых слоях одинаковое количество нейронов.

Сеть нейронов, использующая евклидову меру близости для классификации объектов, называется сетью Кохонена (рис. 5, в). Нейроны слоя Кохонена генерируют сигналы $D^{m,p}$. Интерпретатор выбирает максимальный сигнал слоя и выдает номер класса m , соответствующий номеру входа, по которому интерпретатором получен максимальный сигнал. Это соответствует номеру класса объекта, который был предъявлен на входе, в виде вектора x^p . Ядра c_i^m являются весовыми коэффициентами нейронов. Каждый нейрон Кохонена запоминает одно ядро класса – конструктивный инвариант – и отвечает за определение объектов в своем классе. Таким образом, величина выхода нейрона тем больше, чем ближе объект к данному ядру класса. Общее количество классов совпадает с количеством нейронов Кохонена, имеющих линейную функцию активации. Меняя количество нейронов, можно динамически менять количество классов.

Такую же нейросеть можно использовать и на последующем этапе макроструктурирования при анализе типовых маршрутов изготовления рассматриваемых изделий для оценки существенности их технологического подobia.

В работе [2] предлагалось оценивать существенность технологической общности разных видов продукции с помощью следующих критериев:

- абсолютная длительность операции: $K1 = t$ (мин);
- относительная длительность операции: $K2 = t_i / \sum t_i$;
- абсолютные приведенные затраты на операцию: $K3 = C_M t$ (руб.), где C_M – приведенные минутные затраты на операции (руб./ мин);
- относительные приведенные затраты на операцию: $K4 = C_{Mi} t_i / \sum (C_{Mi} t_i)$.

Таким образом, используя, например, критерий K_4 , путем анализа структур типовых технологических процессов производства изделий 1, 2 и 3 (рис. 6) осуществляется предварительное организационно-технологическое группирование продукции.

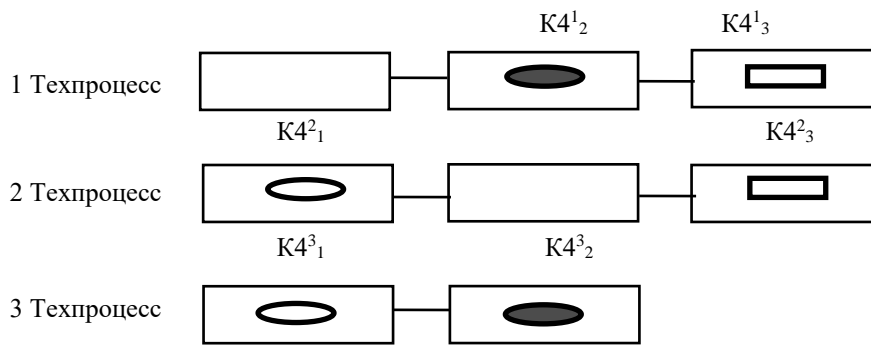


Рис. 6. Характеристики подобия элементов технологических процессов изготовления разных изделий

Стадия макроструктурирования компактной производственной системы завершается этапом формирования ее производственной программы и выбора наилучшего ассортимента выпускаемой продукции на основе ее конструктивного инварианта. Такое оптимальное объемное планирование дискретного многономенклатурного машиностроительного производства в математической постановке является экспоненциально сложной для вычисления задачей комбинаторного программирования ранцевого (рюкзачного) типа. По нашему мнению, наиболее эффективным способом компьютерной поддержки ее решения следует считать генетическое программирование.

Генетические алгоритмы являются разновидностью эволюционных вычислений. Это поисковые алгоритмы, основанные на механизмах натуральной селекции и генетики. В отличие от эволюционного программирования основная их цель состоит в оптимизации структуры отдельного объекта, а не поведения целого семейства («популяции») [10]. Они реализуют стратегию «выживание сильнейших» среди рассматриваемых вариантов структуры объекта, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования естественной эволюции. В каждой генерации новое множество вариантов структуры (как последовательностей элементов) создается, используя части старых и добавляя новые части с «хорошими» свойствами. Использование информации, накопленной в процессе эволюции, отличает генетическое программирование от компьютерных методов случайного поиска.

Применяемый в настоящем исследовании стандартный генетический алгоритм представлял собой метод решения задачи комбинаторной оптимизации вида: «максимизировать $f(s)$ при условии, что $s \in \Omega = \{0, 1\}^n$ ». Здесь функция $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ называется функцией пригодности («fitness function»); $s \in \Omega$ – n -мерный двоичный вектор из дискретного множества Ω -хромосомой длины n . Множество $\Omega = \{0, 1\}^n$ представляет собой множество вершин n -мерного гиперкуба с ребром, равным 1; $\mathbb{R} = (-\infty, +\infty)$ – множество действительных чисел.

Вначале на основе априорной информации создавалась исходная популяция $S(0)$ из M двоичных хромосом: $S(0) = \{s_1, s_2, \dots, s_M\} \in \Omega$, каждая из которых содержала n битов с кодированными значениями интересующего параметра в виде «1» или «0». Вычислялось начальное значение функции пригодности $f(s)$ или ее нормированного представления $f_H(s) : \Omega \rightarrow [0, 1]$, полученное из исходной функции $f(s)$ путем линейного масштабирования:

$$f_H(s) = (f(s) - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}),$$

где f_{\max} и f_{\min} – соответственно максимально и минимально возможные значения функции $f(s)$ (истинные значения которых, впрочем, были точно неизвестны).

Используя начальную популяцию $S(0)$, последовательно переходили к формированию и анализу характеристик популяций $S(1)$, $S(2)$ и т.д., применяя генетические операторы репродукции (отбора), кроссинговера и мутации. Репродукция – процесс, в котором хромосомы копируются согласно значениям их функции пригодности. Наиболее простой способ копирования (отбора и сохранения) хромосом с «лучшими» значениями $f(s)$ в алгоритмической форме имитирует вращение колеса рулетки, на котором каждый конкурирующий вариант (хромосома) имеет поле площади, пропорциональной значению функции пригодности. Колесо вращалось столько раз, сколько вариантов необходимо для следующей генерации (поколения), всякий раз останавливаясь напротив конкретного варианта.

К отобраным таким образом хромосомам далее применяли генетический оператор кроссинговера (скрещивания). В простейшем случае для случайно выбранной пары назначается случайное число $k \in \{1, 2, \dots, n-1\}$, называемое местом (сайтом) кроссинговера, после которого участки этих двух хромосом с вероятностью $P_{кр}$ меняются местами. Кроссинговер отвечает за смешивание информации, его вероятность обычно принимается $P_{кр} = 0,6$. Процесс повторялся для всех остальных хромосом текущей популяции $S(t)$, пока она не оказывалась пустой.

После кроссинговера к хромосомам-вариантам применялся генетический оператор мутации, состоящий в случайном изменении (на противоположное) значение каждого бита с вероятностью $P_{мут}$.

Таким образом, цель оператора мутации заключается в повышении разнообразия поиска за счет введения новых хромосом в популяцию, поскольку число членов популяции M намного меньше общего числа возможных хромосом (2^n) в пространстве поиска Ω . Применение мутаций обычно осуществляется с вероятностью $0,001 \leq P_{мут} \leq 0,01$, так как слишком частое применение мутации приводит к разрушению хромосом с высокими значениями функции пригодности, что ухудшает сходимость результата.

Заключение. Применение описанного выше генетического алгоритма показало:

- во-первых, его потенциальную эффективность для решения задач макроструктурирования компактных производственных систем;

- во-вторых, необходимость его модификации, в частности использование помехозащищенного кода Грея [11] для кодирования параметров при решении задачи многопараметрического оптимизационного синтеза и многоточечного кроссинговера;

- в-третьих, целесообразность генетического программирования настройки классификационной нейросети (см. рис. 5, в), в частности для выбора в ней количества слоев нейронов.

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: ОИПИ НАН Беларуси, 2000. – 48 с.
3. Свирский, Д.Н. Службное назначение как основа выделения конструктивного инварианта продукции компактного машиностроительного производства / Д.Н. Свирский // Вестн. ВГТУ. – 2005. – Вып. 8. – С. 103 – 109.
4. Artificial intelligence: implication for CIM / ed. A. Kusiak. – Berlin: Springer, 1988. – 556 p.
5. Горнев, В.Ф. и др. Комплексные технологические процессы ГПС / В.Ф. Горнев [и др.]. – М.: Высш. шк., 1989. – 112 с.
6. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении / под общ. ред. О.И. Семенкова. – Минск: Высш. шк., 1977. – Т. 2. – 207 с.
7. Технологическая подготовка гибких производственных систем / под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
8. Кондаков, А.И. Экспресс-оценка возможности изготовления изделий в производственной системе фиксированной структуры / А.И. Кондаков, К.С. Горлышев // Вестн. машиностроения. – 2002 – № 5 – С. 53 – 56.
9. Кондаков, А.И. Геометрическо-технологическое моделирование предметов производства в генеративных САПР ТП / А.И. Кондаков, Д.В. Подгайский // Изв. вузов. Машиностроение. – 1997 – № 4 – 6. – С. 90 – 95.
10. Курейчик, В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы / В.М. Курейчик // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1999. – № 1 – С. 144 – 160.
11. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием генетических алгоритмов / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов // Информационные технологии. – 2000. – № 12. – Приложение. – С. 10.

Поступила 22.01.2007