

УДК 658.51:621.81

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

д-р техн. наук, доц. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет);

Н.В. БЕЛЯКОВ
(Витебский государственный технологический университет)

Показана актуальность разработки методов и моделей для автоматизации проектирования корпусных деталей в единичном производстве. Проанализированы существующие системы автоматизированного проектирования технологических процессов. Приведена модель корпусной детали на основе функциональных модулей и дана классификация модулей. Предложена методика формирования информационной модели производства и алгоритмы определения комплектов баз ориентации, выбора оборудования, конструктивных элементов и смены баз при синтезе технологических процессов механической обработки заготовок корпусных деталей. Описана структура разработанного пакета компьютерных программ реализации методик и алгоритмов.

Введение. В настоящее время в машиностроении находят применение системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) двух видов: 1) системы адресации (УП «Институт Белорганкинпром» (САПР ТП), СПРУТ (GTP, САПР ТП), T-FLEX (ТЕХНОПРО) и др.); 2) диалоговые системы («Интермех» (Techcard), КОМПАС (АВТОПРОЕКТ, Вертикаль), Consistent Software (TechnologiCS, FOBOS) и др.). Первые разработаны для деталей типа тел вращения и планок на базе комплексного технологического процесса (ТП) на типовые детали. Вторые могут быть использованы и для нетипизированных деталей, но только достаточно опытным технологом. С их помощью технолог, используя опыт и интуицию, может выбрать из базы данных текст переходов, оборудование и т.д., нормировать расход времени и материала, рассчитать режимы резания. Однако эти системы не позволяют для указанных деталей в автоматизированном режиме назначить технологические базы, порядок обработки поверхностей, порядок смены баз внутри этапов типовой схемы механической обработки, выдавать задание на проектирование (выбор) станочных приспособлений. По оценкам экспертов, 80 % нетипизированных деталей относится к классам «корпус» и «некруглые стержни».

Таким образом, целью работы явилась формализация и автоматизация процедур проектирования индивидуальных технологических процессов механической обработки заготовок нетипизированных деталей классов «корпус» и «некруглые стержни». Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи: 1) формирование информационной модели заготовки в задаче синтеза технологического процесса механической обработки; 2) разработка алгоритма определения комплектов баз ориентации; 3) разработка алгоритма выбора необходимого оборудования, определения порядка обработки поверхностей и смены баз; 4) создание компьютерных моделей реализации алгоритмов.

Результаты исследований. Для решения задачи компьютерного проектирования технологии изготовления нетипизированных деталей необходимо создать информационную *конструктивно-технологическую модель* заготовки. Для этого предлагается оперировать с моделью геометрических отношений между конструктивными элементами детали (функциональными модулями (ФМ)) *разных уровней сложности и служебного назначения*, причем с учетом особенностей обработки конструктивных элементов и заготовки.

Классификатор ФМ деталей *по сложности* ФМ-*ip* построен иерархически [1]. Функциональные модули нулевого ФМ-0_p и второго ФМ-2_p рангов сложности делятся на технологические и исполнительские. Модули нулевого ранга ФМ-0_p представляют собой элементарные поверхности, из которых строятся ФМ остальных уровней классификации. Деталь, таким образом, является функциональным модулем шестого и выше рангов сложности. Каждому элементу множества модулей каждого ранга в зависимости от главных поверхностей ставится в соответствие совокупность ряда признаков: ФМ-*ip* → кспкспгсвст, где к – класс ФМ (плоские ФМ, ФМ вращения, винтовые ФМ); пк – подкласс ФМ (плоский ФМ, ФМ-паз, ФМ-окно, ФМ-направляющая, ФМ-элементарный вращения, ФМ-канавки продольные, ФМ-канавки торцовые, ФМ-резьбы) и т.д. Используя такую классификационную сетку, несложно каждому компоненту поставить в соответствие определенный идентификатор (код), отражающий ранг ФМ и определяющий его на множестве признаков. Классификационное множество модулей по служебному назначению предлагается представлять в виде выражения:

$$ФМ = (ОВБ) \cup (КР) \cup (КМ) \cup (ОБН),$$

где ОВБ – множество функциональных модулей, образующих основные и вспомогательные сборочные базы; КР – множество крепежных функциональных модулей; КМ – множество модулей коммуникаций; ОБН – множество объединительных модулей.

Деталь можно представить выражением следующего вида:

$$КД = \Phi M_1 \cup \Phi M_2 \cup \Phi M_{j-1} \dots \cup \Phi M_j \dots \cup \Phi M_n.$$

Причем под множеством ΦM_i подразумевается комплексный ФМ – структурно максимально сложный, имеющий наивысшие показатели качества, все поверхности которого возможно обработать с одного станова: $\Phi M_j = (n_1, n_2, \dots, \bar{n}_m, \dots, n_{i-1}, \dots, n_i)$, где $n_i \in \Phi M\text{-ip}$, \bar{n}_m – главные поверхности модуля. Структурный состав частного модуля формируется методом адресации из комплексного ФМ: $\Phi M_1 = (n_1, n_3 \dots n_6)$; $\Phi M_5 = (n_1, n_2 \dots n_9)$ и т.д.

На основе проведенного анализа чертежей деталей, а также технологических процессов их механической обработки в конструкторских и технологических бюро станкостроительных заводов Витебской области: ОАО «ВИЗАС»; РУП «ВИСТАН» (г. Витебск); РУПП «Красный борец» (г. Орша), определено 1100 частных функциональных модулей различных классификационных множеств. Комплексование частных ФМ по конструктивному и технологическому признаку позволило разработать иллюстрированный классификатор комплексных ФМ деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» по служебному назначению.

Увеличение параметров точности ФМ и детали в целом при механической обработке происходит последовательно за несколько ступеней (этапов: з – заготовительный, п – предварительный, ч – чистовой, о – отделочный). Это вызвано наследованием погрешности обработки и введением химико-термической обработки. Поэтому деталь предлагается представлять не просто набором ФМ и геометрических связей между ними, а моделями состояний ФМ на этапах обработки.

Определение состояния ФМ ΦM_j^3 , ΦM_j^II , ΦM_j^I , ΦM_j^O и маршрута его обработки на этапах предлагается осуществлять двумя способами:

- 1) с помощью стандартных маршрутов, применяемых на том или ином предприятии для ФМ различного служебного назначения;
- 2) с помощью синтеза возможных вариантов маршрута ФМ низкого ранга на основе моделирования состояния показателей его качества.

Для формализации назначения маршрута по первому методу предлагается использовать понятие технологического регламента (ТР) обработки ФМ – совокупности упорядоченной технологической информации о ФМ: $\Phi M_j \rightarrow TP_j = \{n_i^{нач}, пер_{y,i}, Pu, Un, \mathcal{E}\}$, где $n_i^{нач}$ – совокупность обрабатываемых ФМ нулевого ранга; $пер_{y,i}$ – переходы обработки и их точность; Pu – виды режущего инструмента и их размерные характеристики; Un – фрагменты управляющей программы для станков с числовым программным управлением; \mathcal{E} – этап типовой схемы обработки, в который распределяется переход.

Разработаны технологические регламенты и схемы распределения припусков по этапам типовой схемы для наиболее распространенных комплексных ФМ.

Исходными данными для моделирования по второму методу являются:

- 1) $Пер = (пер_1, пер_2, \dots, пер_i)$ – множество переходов механической обработки деталей;
- 2) ФМ-ip – классификатор ФМ по степени сложности;
- 3) массив соответствия – набор кортежей вида $\{\Phi M\text{-ip}=n_i=k \rightarrow pk \rightarrow \gamma \rightarrow v \rightarrow t\} \rightarrow \{пер_1 \dots пер_m\}$, где $k \rightarrow pk \rightarrow \gamma \rightarrow v \rightarrow t$ – идентификационный код ФМ; $пер_1 \dots пер_m$ – набор кодов возможных переходов;
- 4) $Пер_y = (пер_y^n, пер_y^1, пер_y^o, \dots, пер_y^{нач})$ – множество уточненных переходов (под $пер_y^i$ понимается кортеж вида $\{IT_{вх}, IT_{вых}, Ra, HRC, P_{3M}\}$, где $IT_{вх}$ – квалитет точности поверхности на «входе», т.е. до обработки; $IT_{вых}$ – квалитет точности поверхности на «выходе», т.е. после обработки; Ra – параметр шероховатости; HRC, P_{3M} – условия выбора по твердости и размерному параметру).

Для синтеза маршрута разработан пошаговый алгоритм на основе моделирования состояния показателей его качества на этапах типовой схемы обработки.

Шаг 1. С помощью ФМ-ip формируется идентификационный код ФМ $k \rightarrow pk \rightarrow \gamma \rightarrow v \rightarrow t$.

Шаг 2. С помощью массива соответствия $\{k \rightarrow nk \rightarrow \gamma \rightarrow v \rightarrow t\} \rightarrow \{пер_1 \dots пер_m\}$ определяются все возможные $пер_i$ для обработки.

Шаг 3. С помощью $Пер_y$ формируется массив $\{ПРМЖ\}$ кортежей вида:

$$Пер_y^{нач} i = IT_{вх}^{\min} \dots IT_{вх}^{\max} \dots IT_{вых}^{\min} \dots IT_{вых}^{\max}.$$

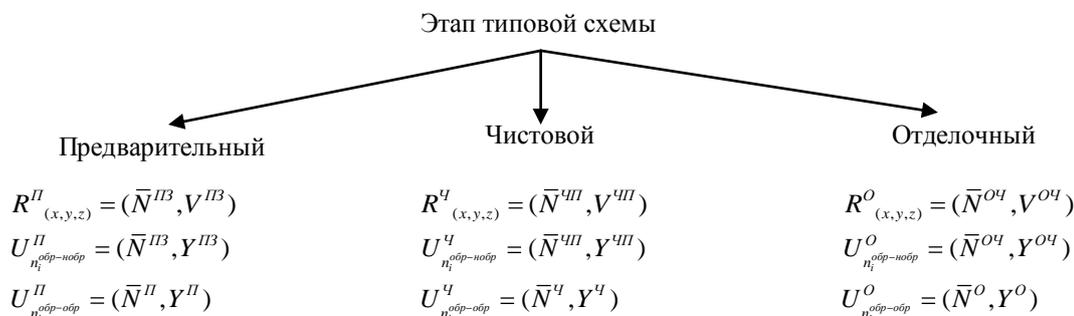
Шаг 4. Сравнение заданного квалитета $IT_{зад}$ с диапазоном $IT_{вых}^{\min} \dots IT_{вых}^{\max}$.

Если $IT_{зад} = IT_{вых}^{\min} \dots IT_{вых}^{\max}$, то формируется запись $IT_{вх} - Пер_1 - IT_{вых}$ в новый массив $\{1РАНГ\}$.

Шаг 5. Сравнение квалитета точности $IT_{вых}$ перехода массива $\{1РАНГ\}$ $Пер_1$ с диапазоном массива $\{ПРМЖ\}$ $IT_{вых}^{\min} \dots IT_{вых}^{\max}$.

Шаг 3. Используя ПК_i, R(x,y,z) и U чертежа детали, формируются модели размерных и угловых связей на этапах.

Графы на этапах строятся по обозначениям размерных связей и допусков относительных поворотов с чертежа детали. Такой подход необходим для того, чтобы уменьшить наследование погрешности обработки и число звеньев технологических размерных цепей, в которых замыкающим звеном является чертежный размер.



Шаг 4. Определяются комплекты баз для обрабатываемых осей (O). Для этого совместно анализируются графы R(x,y,z) и U этапа согласно алгоритму:

$$\bar{n}_i(O) \rightarrow (R^{\text{II}}_X \wedge R^{\text{II}}_Y) \vee (R^{\text{II}}_Y \wedge R^{\text{II}}_Z) \vee (R^{\text{II}}_X \wedge R^{\text{II}}_Z)$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Y\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p$$

$$\{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p$$

$$\{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \wedge \{v_{iZ} = (\bar{n}_i, \bar{n}_p)_Z\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p$$

$$\bar{n}_i(O) \rightarrow U^{\text{II}}_{n_i^{\text{обр-обр}}} \vee U^{\text{II}}_{n_i^{\text{обр-обр}}} \rightarrow y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_l \rangle \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l$$

Шаг 5. Определяются комплекты баз для обрабатываемых плоскостей (P). Для этого также совместно анализируются графы R(x, y, z) и U этапа согласно алгоритму:

$$\bar{n}_i(P) \rightarrow R^{\text{II}}_X \vee R^{\text{II}}_Y \vee R^{\text{II}}_Z \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee$$

$$\vee \{v_{iY} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_Y\} \Rightarrow \bar{n}_j \vee \{v_{iX} = (\bar{n}_i, \bar{n}_j)_X\} \Rightarrow \bar{n}_j \bar{n}_i(P) \rightarrow U^{\text{II}}_{n_i^{\text{обр-обр}}} \vee U^{\text{II}}_{n_i^{\text{обр-обр}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \{y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_p \rangle\} \wedge \{y_i = \langle \bar{n}_i, \bar{n}_l \rangle\} \Rightarrow \bar{n}_j - \bar{n}_p - \bar{n}_l$$

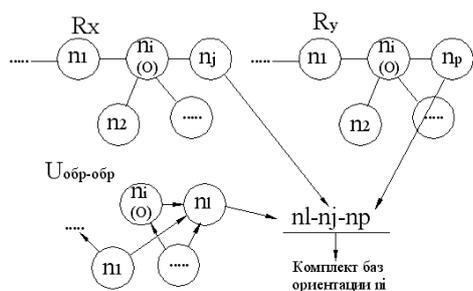


Рис. 1. Иллюстрация работы алгоритма формирования комплекта баз для оси

То есть согласно алгоритмам номер обрабатываемой поверхности (или оси обрабатываемой поверхности) отыскивается на графе (по одной оси для плоской поверхности, по двум координатным осям для оси) размерных связей. Определяется ее связь или связи с другими ближайшими поверхностями на графах размерных связей. (Кратчайшие пути на графе от рассматриваемой поверхности до других поверхностей).

Далее для плоских поверхностей на графах угловых расположений обрабатываемых поверхностей комплект дополняется двумя поверхностями, для оси комплект дополняется одной поверхностью. На рисунке 1 показана иллюстрация работы алгоритма формирования комплекта баз для оси.

Шаг 6. Формирование таблицы комплектов баз на этапе. Для решения задачи **выбора необходимого оборудования, определения порядка обработки поверхностей и смены баз** внутри этапов обработки деталей необходим массив имеющегося оборудования, содержащий следующие сведения: 1) модель станка; 2) размеры рабочей зоны; 3) технологические возможности станка (набор выполняемых на станке переходов и их параметров, координаты доступности режущего инструмента в пространство рабочей зоны); 4) таблицы комплектов баз ориентации.

Ниже приводится пошаговый алгоритм выбора необходимого оборудования, определения порядка обработки поверхностей и смены баз.

Шаг 1. *Распределение переходов по типоразмерам станков.* Предлагается сопоставлять характеристики комплекса поверхность-переход с технологическими возможностями станков, а габариты детали – с габаритами рабочего пространства станка. В результате формируется таблица выбора оборудования, в которой на пересечении строки (поверхность-переход) и столбца (станок) записываются возможные комплекты баз ориентации (табл. 1).

Шаг 2. Выбор комплекта баз и станка для обработки на первой операции этапа. Предлагается в столбцах таблицы выбора оборудования отыскивать ячейки с идентичными комплектами, состоящими из исходных (необрабатываемых) поверхностей этапов. За решение принимается столбец (станок) в котором наибольшее количество ячеек (переходов) с идентичными комплектами. Проверяется возможность обработки от настроенных баз.

Таблица 1

Таблица выбора оборудования

Поверхность-переход i	Номер станка q			
	1	2	q	$N_{ст}$
1	$n_{l_{11}}-n_{j_{11}}-np_{11}...$	$n_{l_{11}}-n_{j_{11}}-np_{11}...$	...	...
2	$n_{l_{21}}-n_{j_{21}}-np_{21}...$	$n_{l_{21}}-n_{j_{21}}-np_{21}...$	...	...
i	$n_{l_{i1}}-n_{j_{i1}}-np_{i1}...$	$n_{l_{i1}}-n_{j_{i1}}-np_{i1}...$	...	...
$N_{пр}$	...	...	...	...

Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, предварительно формируя тем самым первую операцию этапа.

Если для модели этапа нет комплектов, состоящих только из исходных поверхностей, то принимается комплект, состоящий из максимального их количества.

Если исходных (необрабатываемых) поверхностей на этапе нет, то в качестве комплекта баз на первой операции этапа следует использовать комплект для выполнения максимального количества переходов.

Шаг 3. Выбор станка и комплекта баз для второй операции. Для этого в столбцах «отсеченной» таблицы выбора оборудования отыскивается максимальное количество ячеек (поверхностей-переходов) с идентичными комплектами, состоящими из обработанных на предыдущих (первой) операции поверхностей. «Отсеченная» таблица получается отбрасыванием из начальной таблицы строк, соответствующих обработанным поверхностям. Переходы с одинаковыми типоразмерами станков и технологических баз объединяются в группу, формируя тем самым вторую операцию.

Шаг 4. Выбор станка и комплекта баз для второй операции. Повторяется шаг 3.

Шаг 5. Анализ возможности совмещения переходов, отобранных для данного типоразмера станка. Анализ заключается: а) в сравнении векторов доступности обрабатываемых функциональных модулей и координат доступности формообразующих элементов в пространстве рабочей зоны (технологические возможности станка); б) в проверке наличия необходимого количества гнезд в револьверной головке или магазине станка.

Если установлено, что несколько переходов нельзя выполнить при использовании одного комплекта баз или за один установ, то в таких случаях уменьшается число переходов в операции вплоть до одного (увеличивается число операций, выполняемых на одном и том же станке).

В результате работы алгоритма формируется несколько вариантов маршрута обработки (табл. 2) с различными структурами операций.

Таблица 2

Структура выходных параметров работы алгоритма

Обрабатываемые поверхности	$i \ i-1 \ i-3$	$i-2 \ i-4$	$i+1 \ i+2$	...
Комплект баз	$n_{l_{i1}}-n_{j_{i1}}-np_{i1}$	$n_{l_{i-13}}-n_{j_{i-13}}-np_{i-13}$	$n_{l_{i+12}}-n_{j_{i+12}}-np_{i+12}$	...
Станок	q	$q+1$	$q-1$	...

Окончательный выбор варианта последовательности обработки, содержания и структур входящих в технологический процесс операций можно осуществить на основе результатов технико-экономических расчетов.

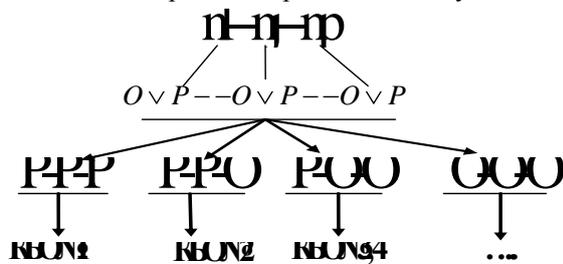
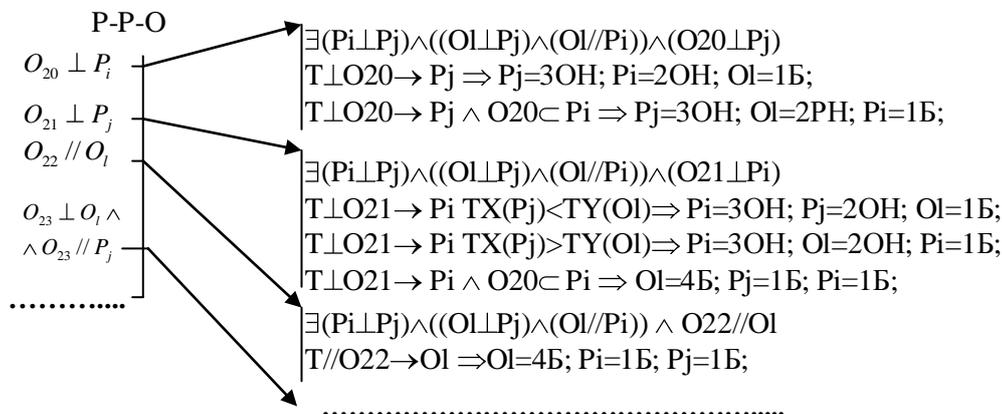


Рис. 2. Модель идентификации комплекта баз

Структура и порядок в операциях внестаночных переходов в большинстве случаев стандартизованы. Переходы термического и контрольного этапов и их выбор зависят от технических требований чертежа детали. Первым шагом решения задачи синтеза задания на проектирование приспособления является идентификация комплекта баз ориентации. Для этого рассматриваются поверхности сформированных комплектов баз и определяется характер поверхности (ось или плоскость). Всего возможно четыре варианта сочетаний поверхностей (рис. 2).

Далее определяется принадлежность рассматриваемого комплекта к одному из четырех. Комплект О-О-О для деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» практически не используется.

Для формального назначения вида компонентов комплекта (проектирования схемы базирования) разработан массив продукционных моделей, элементы которого соответствуют вариантам однозначного задания ориентации ФМ (рис. 3). Задачу структурного синтеза схемы установки предлагается решать в терминах условных установочных элементов, для чего вид компонента КБО заменяется соответствующим условным установочным элементом. После определения точки приложения и направления сил закрепления сформировано задание на проектирование приспособления [2, 3].



Например, алгоритм O_{21} : если существует КБО № 2 и задан допуск перпендикулярности оси O_{21} относительно плоскости P_i , а допуск линейного размера относительно P_j меньше допуска линейного размера относительно O_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, плоскость P_j – двойной однонаправленной (направляющей), ось O_1 – одиночной (опорной). Если допуск линейного размера относительно P_j больше допуска линейного размера относительно O_i , то плоскость P_i назначается тройной однонаправленной (установочной) базой, ось O_1 – двойной однонаправленной (направляющей), плоскость P_j – одиночной (опорной) базами. Если плоскость P_i совпадает с осью O_i , то ось O_1 назначается четверной (двойной направляющей) базой, плоскости P_i и P_j назначаются одиночными (опорными) базами.

Рис. 3. Элементы массива продукционных моделей для КБО № 2

На базе методик, моделей и алгоритмов разработан пакет компьютерных программ автоматизации процедур синтеза индивидуальных ТП механической обработки заготовок оригинальных нетипизированных деталей классов «корпус» и «некруглые стержни» (рис. 4), доказана их работоспособность путем внедрения на ряде машиностроительных предприятий Витебской области и в учебный процесс.

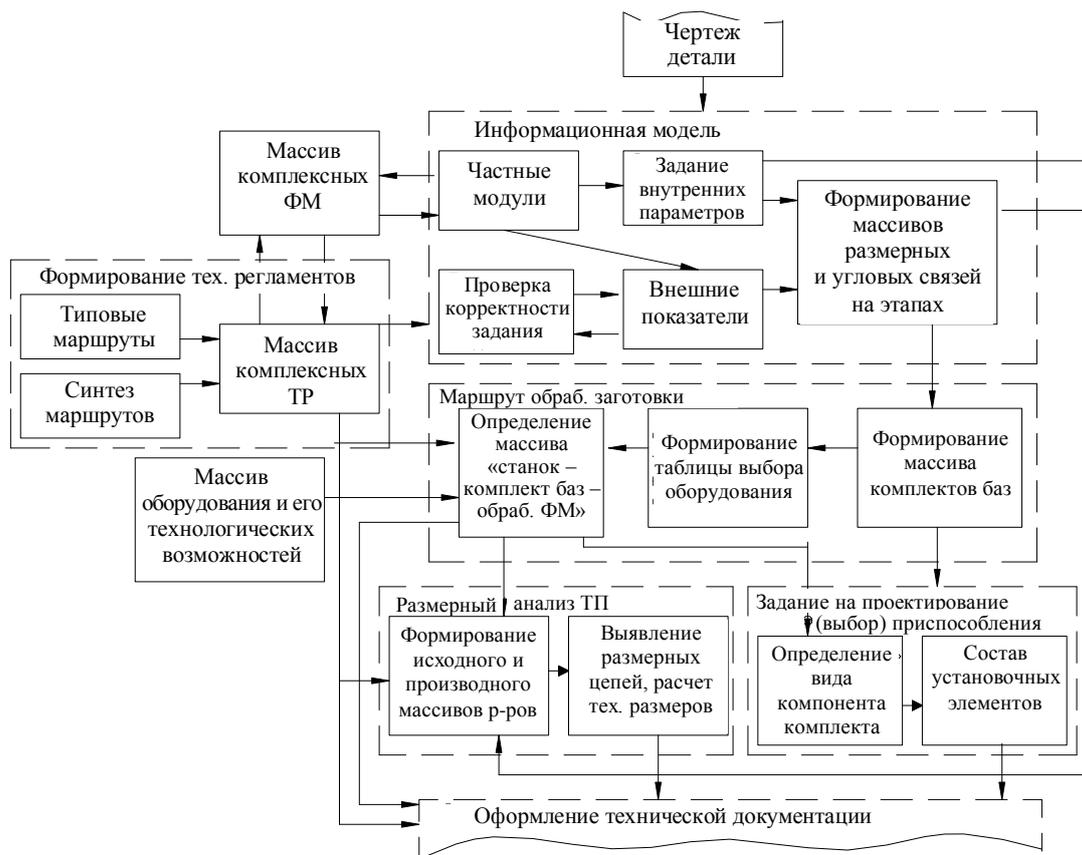


Рис. 4. Структура программно-методического комплекса реализации процедур проектирования механической обработки корпусных деталей

В работе использовались **методы** системно-структурного анализа и моделирования, теории графов, алгебры логики, теории множеств, теории алгоритмов и теории базирования.

Заключение. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- предложен метод синтеза информационной конструкторско-технологической модели нетипизированной детали и ее заготовки из параметризованных комплексных функциональных модулей, структуры размерных и угловых связей между главными поверхностями модулей, а также технологических регламентов обработки, позволяющий представить заготовку для определения порядка обработки и смены баз, синтеза схем базирования и установки;

- описан метод структурного синтеза маршрута обработки заготовок, который на основе определения и анализа таблиц комплектов технологических баз ориентации (отражающих угловую и размерную ориентации обрабатываемых поверхностей) с учетом технологических возможностей оборудования (выполняемые переходы, габариты рабочей зоны, вектор доступности в рабочую зону) позволяет определять порядок обработки поверхностей, комплекты баз для обработки и порядок смены комплектов баз;

- предложен метод структурного синтеза состава установочных элементов станочного приспособления, впервые позволивший для сложных нетипизированных деталей машин внутри каждого этапа механической обработки в автоматическом режиме синтезировать теоретические схемы базирования, определять вид компонента комплекта технологических баз (установочная, направляющая, опорная и т.д.), по схеме базирования в терминах условных элементов синтезировать теоретические схемы установки;

- создан пакет прикладных программ автоматизации процедур синтеза индивидуальных технологических процессов механической обработки оригинальных нетиповых заготовок на основе представления разработанных моделей, методик, алгоритмов, баз данных, баз знаний на языке теории графов, алгебры логики, теории множеств, теории алгоритмов, теории размерных цепей и теории вероятностей и доказана их работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства / Н.Н. Попок. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 396 с.
2. Беляков, Н.В. Формализация проектирования технологических процессов механической обработки корпусных деталей машин / Н.В. Беляков, Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский. – Витебск: ВГТУ, 2006. – 147 с.
3. Махаринский, Е.И. Базирование в задачах создания САПР процессов механической обработки и средств оснащения / Е.И. Махаринский, Н.В. Беляков, Ю.Е. Махаринский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 2. – С. 47 – 56.
4. Беляков, Н.В. Формализация синтеза технологических процессов механической обработки заготовок корпусных деталей машин / Н.В. Беляков // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – № 4. – С. 32 – 38.

Поступила 14.01.2010

METHODS AND MODELS OF COMPUTER DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MANUFACTURE OF CASE DETAILS

N. POPOK, N. BELJKOV

The urgency of working out of methods and models for automation of design of case details in job-lot production is shown. Existing systems of automated design of technological processes are analysed. The model of a case detail on the basis of functional modules is resulted and classification of modules is given. The procedure of forming of an entity set model of manufacture and algorithms of definition of complete sets of baselines of orientation, sampling of the equipment, structural components and change of baselines at synthesis of technological processes of machining of bars of case details is offered. The structure of a designed package of computer programs of implementation of procedures and algorithms is presented.