

## CAD/CAM SYSTEM FOR GEAR DRIVES IN HEAVY MACHINEBUILDING

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В ТЯЖЕЛОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Eng. Brulinsky V.V., Dr-Eng. Lagutin S.A.,  
Dr-Eng. Lunev V.N., Dr-Eng. Usachev V.N.  
JSC<sup>o</sup> EZTM, Electrostal, 144005, RUSSIA  
E-mail: lagutin@elsite.ru

#### Abstract/ Резюме

*The paper describes the integrated system for computer-aided design and technological preparation of gears manufacturing on Electrostal plant of heavy machinebuilding. This system includes three program packages for spur, helical and herringbone gears, as well as for worm and spiral bevel gears. It allows executing geometric design and loading rating of gear units, to choose the type of heat and diffusion heat treatment, to assign the tools and machines for gear cutting and grinding, to determine the machining time. The system can be used on other plants with an individual type of production.*

**KEYWORDS:** SPUR, HELICAL, HERRIGBONE, SPIRAL BEVEL, WORM GEARS.

#### 1. Введение. Цель работы

Уменьшение общего времени изготовления продукции связано с сокращением сроков технической подготовки производства (ТПП) и одной из ее главных составляющих - технологической подготовки производства. Актуальной становится и проблема перехода от последовательной системы ТПП (конструирование детали - проектирование заготовки - проектирование технологии механообработки) к параллельной.

Особую актуальность эта проблема приобретает для таких сложных и ответственных изделий машиностроения, как детали зубчатых передач, которые выделяются из общего набора деталей машин значительным объемом расчетных работ, связанных с их конструированием и изготовлением, сложностью и многообразием используемого оборудования и инструмента, а также дискретностью и стандартизацией основных конструктивно-технологических параметров.

Кроме этого зубообработка в тяжелом машиностроении имеет ряд особенностей, присущих единичному и мелкосерийному производству: изготовление деталей мелкими партиями, а часто и единичных деталей, с неопределенным периодом повторяемости; высокая квалификация производственных рабочих, что позволяет несколько снизить требования к степени конкретизации описания технологических процессов (используется в основном маршрутно-операционное описание); использование в большинстве случаев универсальной оснастки.

Целью данной работы являлось сокращение сроков технической подготовки производства и повышения качества разрабатываемых технологических процессов путем разработки системы автоматизированного проектирования (САПР ТП) зубообработки в тяжелом машиностроении и интеграции этой системы в САПР К (конструирования зубчатых передач).

#### 2. Объект предназначения системы.

Рассматриваемая комплексная система была разработана в 1993-95 г.г. для подготовки производства в специализированном редукторном цехе Электростальского завода тяжелого машиностроения (ЭЗТМ). Этот цех изготавливает специальные цилиндрические, конические, червячные, глобоидные и спироидные редукторы массой от 10 кг до 90 тонн, а также зубчатые муфты и звездочки цепных передач для приводов прокатного, металлургического, горно-обогатительного и другого тяжелого оборудования.

В тяжелом машиностроении используются, в основном, силовые

передачи при относительно невысоких угловых скоростях вращения, что требует изготовления деталей по 6 - 10 степени точности. С учетом этого в течение многих лет отрабатывались технологические процессы изготовления зубчатых деталей, формировался парк станков и инструментальное обеспечение.

Зуборезное оборудование цеха позволяет изготавливать цилиндрические, в том числе шевронные, вал-шестерни и колеса с модулем от 1 до 50 мм и диаметром колеса до 7000 мм; конические передачи с прямыми зубьями при модуле до 6 мм и круговыми зубьями при модуле до 22 мм и диаметре колес до 1500 мм, червячные передачи с модулем до 20 мм, глобоидные передачи с межосевым расстоянием от 120 до 435 мм и т.д.

В качестве материала зубчатых колес и червяков, как правило, используются легированные стали марок 38ХА, 35ХМ, 20ХН3А и др. Термоотдел цеха обеспечивает три основных вида термической и химико-термической обработки: объемную закалку до твердости 269...302 НВ, поверхностную закалку зубьев токами высокой частоты (ТВЧ) до твердости 42...55 HRC<sub>Э</sub> для передач с диаметром колес до 1500 мм и цементацию зубьев с последующей закалкой до твердости 54...62 HRC<sub>Э</sub> для колес диаметром до 800 мм. Зубошлифовальное и зубоизмерительное оборудование позволяет получать передачи 6-7 степеней точности.

В последние годы цех все чаще используется в качестве регионального центра по изготовлению и ремонту запасных частей к самому различному оборудованию, и это резко повышает требования к ускорению процесса подготовки производства.

#### 3. Концепция построения системы

В общем случае проектирование технологических процессов зубообработки выполняется в следующей последовательности: назначение маршрута обработки; выбор металлорежущего оборудования; выбор или проектирование режущего инструмента; назначение межоперационных припусков, режимов резания, техническое нормирование; расчет карт наладок, гитар сменных шестерен; оформление технологического процесса.

Различные виды зубчатых деталей характеризуются однотипными дискретными конструктивными параметрами: модуль зацепления (в различных вариантах - нормальный, осевой, торцевой); число зубьев; угол наклона зубьев, исходный производящий контур, его модификация; степень точности; механические свойства материала детали, габариты.

Концепцию САПР ТП зубообработки в тяжелом машиностроении (единичное и мелкосерийное производство) можно

сформулировать следующим образом: детали зубчатых передач классифицируются по видам; каждому конкретному виду соответствует устойчивый на уровне маршрута и выбора оборудования групповой или типовой технологический процесс, основные параметры которого (выбор станков, инструмента, режимов резания) зависят от доминирующего конструктивно-технологического параметра - модуля зацепления [1.2].

Предложенная концепция соответствует методу унифицированного технологического процесса. Ее можно рассматривать как важный частный случай этого метода, в котором значительно упрощаются многие этапы технологического проектирования. На основе концепции выявлены и формализованы действующие взаимосвязи и предложены алгоритмы по автоматизации разработки технологических процессов на наиболее распространенные зубчатые детали.

#### **4. Возможности и структура системы.**

Разработанная система охватывает подготовку производства цилиндрических, в том числе с открытым и закрытым шевроном, передач наружного зацепления, червячных передач с цилиндрическими червяками и конических передач с круговым зубом.

Система работает в интерактивном режиме и позволяет:

- выполнять геометрический расчет передач, расчет допусков и измерительных размеров зубьев, выдавать на печать таблицы параметров зацепления для рабочего чертежа;
- проверять возможность механической обработки зубьев, закалки ТВЧ и/или цементации на имеющейся оборудовании с учетом марки стали, модуля и габаритов детали;
- выполнять поверочный прочностной расчет для заданных режима и ресурса работы передачи;
- оптимальным образом выбирать зубообрабатывающие станки и режущий инструмент;
- разрабатывать и выдавать твердые копии маршрутных карт на зуборезные и шлифовальные операции с назначением режимов резания, норм времени и разряда работ;
- рассчитывать карты наладки зубообрабатывающих станков с расчетом сменных шестерен гитар обкатки и деления, в том числе, для конических передач с круговым зубом;
- выдавать службе маркетинга рекомендации для оперативного решения вопроса о целесообразности принятия заказа с учетом трудоемкости зубообработки и загрузки оборудования цеха.

Укрупненная блок-схема системы показана на рис. 1.

Система была реализована на IBM PC 386/387 в среде MS DOS. Она состоит из трех (по одному на каждый вид передач) пакетов. Каждый из них включает в себя разнородные модули, написанные на разных языках программирования и объединенные путем выполнения *bat*-файла с бесконечным циклом, в котором запускается программа управления русскоязычным меню.

Структуру этого интегрированного пакета рассмотрим на примере конических передач с круговыми зубьями. Объединяющей частью подсистемы расчета конических передач является электронная таблица, созданная в среде табличного редактора SuperCalc-5. Она предназначена для ввода и корректировки исходных данных и вывода некоторых укрупненных результатов расчетов о принципиальной возможности изготовления данной передачи и о трудоемкости ее изготовления (маркетинговые данные). Ввод исходных данных производится в интерактивном режиме путем заполнения столбца "задано". Одновременно подсистема формирует столбец "рекомендуется", используя заложенный в электронную таблицу алгоритм.

Электронная таблица содержит также данные о металлорежущих станках, режущем инструменте, режимах резания, возможностях ТО и ХТО предприятия. В этой же электронной таблице формируются исходные данные для геометрического и

прочностного расчета передачи и для расчета наладочных установок для зуборезных станков. Эти данные выдаются в текстовые файлы путем запуска макроса перед завершением сеанса расчета электронной таблицы.

Все программы и редакторы запускаются из русскоязычного меню, управляемого программой, написанной на языке C в среде СУБД "НИКА". Она осуществляет диалог с оператором для указания параметров команды, вызывающей выполнение одной из программ системы, связанной с выбранным пунктом меню. Форма меню аналогична "вертикальному" меню СУБД R:Base. Перечень и взаимосвязь пунктов меню определяются содержанием легко редактируемого "простого" дерева. Сформированная команда записывается в *bat*-файл, вызываемый командой "call" из цикла основного *bat*-файла.

Включенные в систему программы геометрического и прочностного расчета разработаны в ЦНИИТМаш на основе действующих ГОСТов и написаны на языке Fortran [3]. Расчет наладок для обработки конических колес осуществляется по методике ЭНИМС или МГТУ "Станкин".

Алгоритмы проектирования технологических процессов разработаны авторами доклада и описаны ниже.

#### **5. Этапы технологического проектирования.**

Последовательность и взаимосвязи между значимыми параметрами проектирования технологического процесса рассмотрим на примере цилиндрических передач наружного зацепления. Процесс проектируется параллельно для обоих элементов пары: вал-шестерня - колесо. Исходными данными служат основные конструктивные параметры передачи:

1.  $m$  - нормальный модуль,
2.  $z_1, z_2$  - числа зубьев колес,
3. тип и угол наклона зубьев,
4. степень точности передачи,
5. ширина зубчатого венца,
6. габариты и масса детали,
7. материал и термообработка.

##### **5.1. Назначение маршрута обработки.**

Маршруто-образующими факторами являются: степень точности передачи и наличие термической или химико-термической обработки детали. В зависимости от соотношения этих факторов процесс обработки зубьев после предварительной термической и механической обработки заготовки может включать в себя до трех этапов:

1. лезвийная обработка червячными, дисковыми или пальцевыми фрезами, эта операция является окончательной для передач 8-10-й степеней точности при требуемой твердости зубьев не свыше 320 НВ и предварительной в остальных случаях;
2. термическая обработка: поверхностная закалка зубьев ТВЧ либо цементация с последующей закалкой, для 9-10-й степени точности эта операция может быть окончательной (после нее только шлифуются посадочные шейки детали и зачищается поверхность зубьев);
3. отделочная обработка: лезвийная для передач 7-8-й степени точности при твердости зубьев до 47 HRCэ либо зубошлифование для более твердых и точных передач

Для условий ЭЗТМ технические возможности использования различных видов термообработки формализованы в виде таблиц, которые включены в качестве справочных ограничительных параметров в разработанную систему. Производится проверка возможности выполнения заданного вида термообработки для выбранных в исходных данных модуля, габаритов детали и марки стали.

##### **5.2. Выбор металлорежущего оборудования.**

Широкий диапазон значений основных параметров нарезаемых зубчатых колес, необходимость учета выбранного маршрута обработки и наличие большого парка зубообрабатывающего оборудования не позволяют сформулировать критерии однозначного выбора станков. Паспортные данные всех станков в порядке возрастания нарезаемого модуля сведены в единую таблицу, которая в естественном виде введена в систему в форме электронной таблицы и является базой данных зубофрезерных станков.

Наиболее значимыми параметрами для выбора станка являются модуль, степень точности и конструктивное выполнение детали (колесо или вал-шестерня) для назначения типа станка (вертикальный или горизонтальный). Сформирована система неравенств для формализации проверки возможности нарезания конкретной детали на конкретном станке по максимальному модулю, по числу зубьев и по углу наклона зуба, длине зуба, степени точности и т.д. Система неравенств одновременно решается для всех станков базы данных.

В большинстве случаев, особенно в среднем интервале модулей, задача выбора конкретного станка для данной детали имеет несколько решений. Система информирует оператора (пользователя САПР) обо всех станках, на которых возможна обработка рассматриваемой детали, а также указывает оптимально рекомендуемый станок.

### 5.3. Выбор режущего инструмента.

Для условий конкретного производства используемый режущий инструмент предварительно сгруппирован по модулям и видам: червячные чистовые фрезы для модуля от 1 до 30 мм, червячные под шлифовку - для модуля от 2 до 20 мм, дисковые модульные - для модуля от 12 до 30 мм и пальцевые - для модуля от 14 до 50 мм.

При выбранном маршруте режущий инструмент назначается автоматически, т.к. каждому модулю соответствует единственный индекс режущего инструмента каждого вида (кроме чистовых пальцевых фрез).

### 5.4. Расчет режимов резания и норм времени.

На предприятиях тяжелого машиностроения разработаны табличные нормативы по назначению режимов резания на операции и переходы зубообработки. Наглядность и простота нормативов, возможность проверки назначенных технологом - нормировщиком режимов резания, приводят к необходимости именно их формализации, хотя теоретические аналитические зависимости формализуются на ЭВМ гораздо проще.

Для нормальных условий работы глубина резания ( $t$ ) для разных проходов зависит только от модуля и задается простой для формализации таблицей. Подача ( $S$ ) и скорость резания ( $V$ ) являются функциями нескольких переменных, пределы изменения которых известны. Эта зависимость может быть записана в виде выражения:

$$S; V = f(m, HB, CT, GC, NP),$$

где:  $m$  - модуль, дискретность которого является основой формализации;

$HB$  - твердость заготовки, четыре градации в пределах от 190 до 320 HB;

$CT$  - степень точности, две градации: высокая - 7 или 8-я, которые различаются только классом точности фрезы и точности установки детали на станке, или низкая - 9-я;

$GC$  - номер группы станков, четыре градации по мощности главного привода;

$NP$  - номер прохода, принята обработка в один, два или в три прохода.

Введено понятие "параметра режима резания" -  $P$ , конкретное значение которого в области его существования определяется как функция четырех указанных выше дискретных аргументов. Для

полной формализации выбора  $P$  используется пятизначный внутрисистемный код. Например, код S1H12 обозначает, что рассчитывается подача для заготовки с твердостью 190 - 230 HB, для низкой степени точности, для станков первой группы, второй проход. Для каждого данного модуля максимально возможное число значений  $P$  составляет:  $2 \times 4 \times 2 \times 4 \times 3 = 192$ . Реальное число задаваемых нормативами вариантов гораздо меньше.

После определения режимов резания автоматически производится расчет нормы времени на станочную операцию. Аналогичные зависимости выявлены и формализованы для цилиндрических червячных передач и конических передач с круговыми зубьями.

## 6. Заключение.

Разработанная САПР в течение семи лет используется в Отделах Главного технолога и Главного конструктора ЭЗТМ. Она значительно уменьшает время ТПП на зубчатые передачи, снижает влияние субъективных факторов при проектировании. Годовая экономия фонда рабочего времени инженерно - технических работников составляет 13 500 часов.

В настоящее время, в связи с обновлением вычислительной техники, система адаптируется к операционной системе Windows. Выполнен перевод электронных таблиц SuperCalc-5 в Microsoft Excel 97 (распечатка рабочего окна электронной таблицы для конической передачи с круговыми зубьями приведена на рис.2).

Система может быть использована на других предприятиях с аналогичными условиями производства. Ее конструкторская часть, разработанная на основе общепринятых стандартов, одинакова для всех предприятий, а технологическая часть требует некоторой доработки в соответствии с конкретным набором оборудования и инструмента без изменения самой методологии построения САПР.

## 7. Литература.

1. *Лунев В.Н.* Автоматизированное проектирование технологической операции. // СТИН 2, 1993, с.27 - 29.
2. *Сердечнев В.А., Овумян Г.Г., Лунев В.Н.* Концепция автоматизированного проектирования зубообработки в тяжелом машиностроении. // СТИН, N12, 1994, с.9-12.
3. *Lagutin S.A., Berlin S.L.* Geometric Design and Load Rating of Gear Units with Spur and Helical Involute Gearing. // В сб. "Пространство зацеплений", Ижевск-Электросталь, 2001, с.38-51.

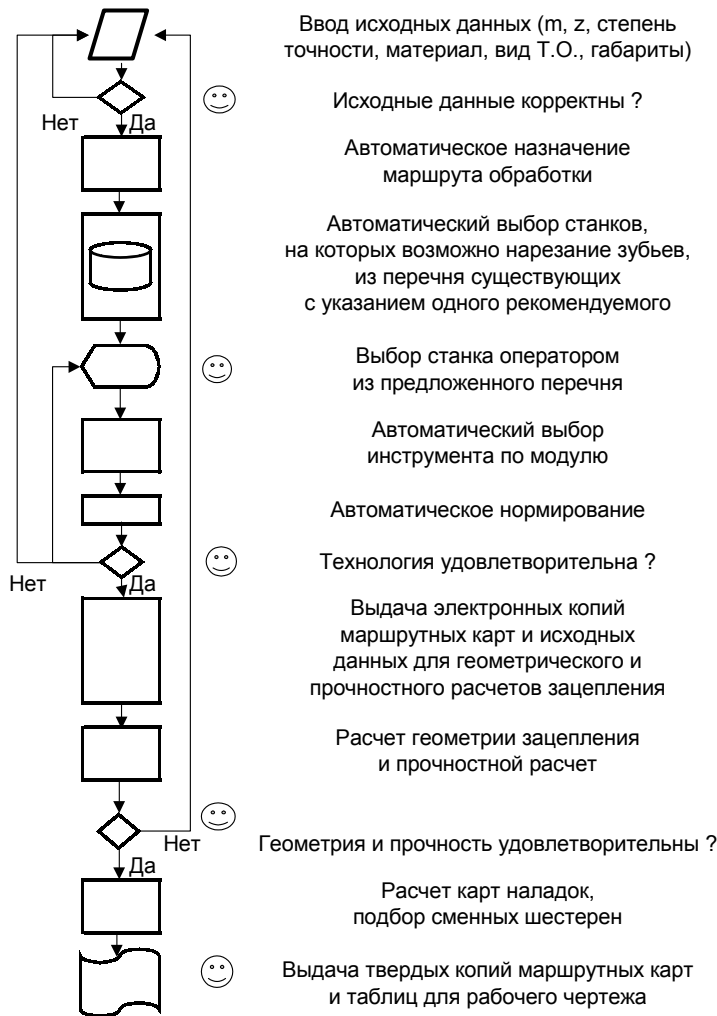


Рис.1. Укрупненная блок-схема САПР зубообработки

.....	.....	.....	.....	.....
.....	$z1 =$	10	10	
.....	$z2 =$	45	45	
.....ий ..ужной	$mte =$	10	10	
.....	$bet =$	37	35	
.....	$SG =$	90	90	
.....атого ..	$B =$	64	64	
.....	$FZ =$	1	1	
.....	$IST =$	7-В	7-В	
.....	$DG =$	304.8	304.8	
Коэффициент смещения	$xn =$	0.37	0.41	
.....ен. ..ины	$xt =$	0.15	0.13	
..... (1-....., 2-.....)		1	1	
..... (1-....., 2-.....)		2	2	
.....	$HV =$	285	285	
.....		540	540	
Припуск на сторону зуба		0.50	0.50	
...../ ..		30	46	
.....		2	2	
Код станка для шестерни		2	2	

.....	.....	.....	.....	.....
.....	3.67	14.07	528•	528•
.....	0.26		5•726	.....
.....	3.67		528•	1 - 525
.....	4.33	15.18	-	2 - 528•
.....	0.26		5•726	3 - 5•280•
.....	2.16		-	4 - 5•284
.....:	14.35	29.25		
.....:		43.60		

.....:	522
--------	-----

Рис. 2. Первая страница электронной таблицы для конической передачи с круговыми зубьями