

**А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ**

**СИСТЕМОЛОГИЯ СПОСОБОВ  
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Новополоцк  
2017**

УДК 621.9.04:530.1(035.3)  
ББК 34.63-5  
Г60

Рекомендовано к изданию советом  
Полоцкого государственного университета в качестве монографии

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология и оборудование  
машиностроительного производства»  
Полоцкого государственного университета В.А. ДАНИЛОВ

доктор технических наук, профессор,  
заместитель академика-секретаря Физико-технического отделения  
Национальной академии наук Беларуси М.Л. ХЕЙФЕЦ

**Голембиевский, А.И.**

Г60 Системология способов формообразующей обработки в машиностроении  
/ А.И. Голембиевский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.  
ISBN 978-985-531-454-8.

В монографии на основе синергетики излагаются наиболее общие принципы формообразования реальных поверхностей в машиностроении. Предложены принципы представления способов формообразующей обработки в виде формализованных моделей и с этих позиций проведен их системно-структурный анализ. Сформулированы на основе понятия способа формообразующей обработки основные принципы их синтеза. Рассмотрены примеры реализации ряда относительно новых способов зубообработки, признанных изобретениями, в кинематической структуре и цикловых автоматах соответствующих зуборезных станков с электронными связями.

Предназначена для научно-технических работников, занимающихся систематизацией и разработкой объектов технологического оборудования. Будет полезна аспирантам, магистрантам, студентам старших курсов машиностроительных специальностей высших учебных заведений.

УДК 621.9.04:530.1(035.3)  
ББК 34.63-5

ISBN 978-985-531-454-8

© Голембиевский А.И., 2017  
© Полоцкий государственный университет, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМОЛОГИЮ .....	5
1 СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ.....	10
1.1 Определение понятия способа формообразующей обработки .....	10
1.2 Способ формообразующей обработки как целенаправленная техническая система.....	17
1.3 Цель как критерий целесообразности развития многообразия $S$ -систем .....	23
1.4 Способ формообразующей обработки как объединение кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие подсистем .....	26
1.5 Многообразие способов формообразующей обработки как большая развивающаяся система .....	29
2 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	33
2.1 Понятие о характеристическом образе инструмента .....	33
2.2 Геометрические классы воспроизведения поверхностей.....	38
2.3 Осуществимость геометрических классов при образовании реальных поверхностей .....	43
2.4 Комбинированные подклассы образования реальных поверхностей.....	46
2.5 Влияние характеристического образа инструмента на формирование поверхности .....	51
3 МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ .....	54
3.1 Постановка задачи.....	54
3.2 Методика системного описания кинематической подсистемы.....	59
3.3 Методика системного описания базирующей подсистемы .....	69
3.4 Методика системного описания энергетической подсистемы .....	74
3.5 Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия .....	83
3.6 Примеры системного описания способов формообразующей обработки .....	86
4 МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ НОВЫХ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ .....	104
4.1 Общие принципы создания новых способов .....	104
4.2 Принцип совмещения обработки нескольких заготовок .....	108
4.3 Принцип совмещения формообразующей обработки с транспортированием .....	113
4.4 Принцип изменения правил выполнения приемов.....	116
4.5 Принцип совмещения исполнительных движений .....	119
4.6 Принцип согласования ритмов физического воздействия на заготовку .....	122
4.7 Различимость способов формообразующей обработки.....	124

5	КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ .....	133
5.1	Методика классификации .....	133
5.2	Структурный анализ и классификация пионерных способов обработки резанием прямозубых цилиндрических колес .....	138
5.3	Синергетическая модель эволюции способов обработки резанием цилиндрических зубчатых колес .....	143
5.4	Критерии сравнительной оценки способов формообразующей обработки .....	147
6	ЭВОЛЮЦИЯ СПОСОБОВ ОБКАТНОГО ДОЛБЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС .....	149
6.1	Системный анализ пионерного способа зубодолбления .....	149
6.2	Способы зубодолбления, обеспечивающие устранение явления затирания .....	153
6.3	Способы зубодолбления, изменяющие характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками .....	157
6.4	Способы зубодолбления, обеспечивающие повышение производительности при касательном врезании .....	164
6.5	Синергетическая модель целенаправленного развития открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес .....	170
7	РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН .....	172
7.1	Парадигма познания кинематической структуры технологических машин .....	172
7.2	Зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями .....	181
7.3	Зубофрезерные станки для нарезания цилиндрических колес с наклонными зубьями .....	185
7.4	Зубодолбежный станок с адаптивным управлением для многопроходной обработки зубчатых колес .....	190
7.5	Зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес .....	195
7.6	Двухстоловые зубодолбежные станки-полуавтоматы для обработки зубчатых колес .....	201
7.7	Роторный зубодолбежный станок .....	217
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	227
	СЛОВАРЬ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ .....	229
	ЛИТЕРАТУРА .....	231

## ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМОЛОГИЮ

С точки зрения науки принципиальной особенностью ее развития в 30-е годы второй половины XX столетия выступает общая теория систем. Автор этой теории, биолог Л. Берталанфи, так определил ее сущность [1]: «Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще». Наука о системах занимается свойствами отношений исследуемых системных объектов, а не их экспериментальными свойствами, и ее интеграцией с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. Закономерность возникновения науки о системах можно объяснить тем, что к моменту ее появления в различных областях теории и практики, основанных на экспериментальных исследованиях, сложился значительный массив совокупностей операций теоретического и практического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи. Эта наука содержит минимальное количество допущений, а ее основы базируются на логике, что позволяет отнести данную научную дисциплину к точным наукам.

Общая теория систем стала исходной базой синергетики – нового объединяющего направления в современной науке, возникшей в конце 70-х годов XX столетия. Предложенный физиком Г. Хакеном, профессором Штутгартского университета и создателем синергетического направления, термин «синергетика» (Sinergeia) происходит от греческих слов («син» – совместный; «эргос» – действовать) [2]. Поэтому синергетика – это наука о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы [3]. Синергетика занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем самой различной природы, таких как электроны, атомы, молекулы, клетки, механические элементы и т.п. А синергетическая концепция – это по существу фундамент эволюционного естествознания, который позволяет говорить о возникновении единого языка инженера, естествоведника и гуманитария. Язык синергетики базируется на современных физико-математических подходах.

Наряду с приведенным наиболее общим определением синергетики справедливы также ее частные определения [4; 5 и др.], используемые при изучении конкретных многообразий реально существующих систем. Например, при исследовании технологии получения и свойств металлических материалов [6] синергетика – это пограничная область знания, занимающаяся выявлением общих закономерностей в процессах образования,

устойчивости и распада упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах разнообразной природы.

Синергетику, по Г. Хакену, можно рассматривать как часть общего системного анализа, поскольку и в синергетике, и в системном анализе основной интерес представляют общие принципы, лежащие в основе функционирования системы. При этом синергетика, сосредотачивая внимание на ситуациях, в которых макроскопическое поведение систем претерпевает качественные изменения, позволяет высказывать общие утверждения, относящиеся к широким классам систем.

В 1970-е годы в науке о системах выделяется теория технических систем как база для систематизации знаний в теоретической технологии, объединяющая в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования объектов техники – технических систем.

В соответствии с названной областью применения различают общую теорию технических систем, справедливую для всех видов технических систем, и частные теории, конкретизирующие общую теорию для отдельных конкретных многообразий технических систем, объединенных общей целью. Систематизацию знаний о конкретном многообразии технических систем называют *системологией* [7].

Ниже излагается частная теория технических систем – системология многообразия как известных, так и возможных новых способов формообразующей обработки поверхностей в машиностроении, выделенных в класс *S*-систем, с единых позиций независимо от вида используемого инструмента или объекта, его заменяющего, вида обрабатываемой заготовки и принципа воздействия на нее, вида используемой для этого энергии. При этом наиболее общие системные принципы, приближающиеся по уровню обобщения к категориям диалектики, сформулированные в общей теории технических систем, включены в предлагаемую частную теорию без изменений и дополняются специфическими понятиями и принципами, характерными только для способов формообразующей обработки.

В основу любой технологической машины, используемой для формообразования реальных поверхностей деталей машин, положен один или несколько вполне определенных способов обработки. Их разнообразие является следствием множества технологических задач, решаемых в машиностроении, размеров и форм обрабатываемых изделий (деталей). Ранее других появились способы формообразующей обработки, основанные на использовании механической энергии. Это объясняется многообразием

возможных вариантов движений заготовки и инструмента, составляющих движения формообразования. В последние десятилетия в технологии металлообработки классические способы, основанные на механическом воздействии на твердое тело, дополняются способами, основанными на других физических явлениях. К настоящему времени в технологии машиностроения сформировался значительный массив способов формообразующей обработки, отдельные группы которых можно использовать для решения одной и той же технологической задачи.

Можно считать, что выбор способа решения конкретной технологической задачи из известных способов формообразующей обработки выявил тенденцию к общему анализу внутренних связей и закономерностей различных принципов, видов и способов обработки и на этой основе к их систематизации. В ряде научных школ предлагались разнообразные принципы систематизации, базирующиеся на анализе частных факторов, присущих отдельным видам обработки. Эти принципы включены в учебники и учебные пособия соответствующих инженерных дисциплин. Однако, как представляется, обобщающая теоретическая концепция системологии способов обработки независимо от формы инструмента, вида используемой энергии и характера воздействия на заготовку возможна только на основе фундаментального системного анализа всего комплекса понятий в данном научном направлении. Частный пересмотр отдельных положений, замена одних неприемлемых понятий другими, механическое введение новых понятий без переосмысливания всей системы существующих воззрений не может дать объективно правильных результатов.

Руководствуясь именно этими соображениями, в настоящей работе приведено одно из возможных решений указанной задачи. В предлагаемой работе дано однозначное определение способа формообразующей обработки, адекватное понятию способа, принятому в научно-технической экспертизе изобретений, показан системный характер способов формообразующей обработки. Предложен язык системно-структурного описания способов формообразующей обработки. Сформулированы принципы представления способов обработки (*S*-систем) в виде логико-математических моделей (системное описание) с выделением критериев сложности и с этих позиций проведен системный анализ некоторого множества способов формообразующей обработки. Предложена концепция системологической классификации способов обработки.

Всеобщий критерий сложности сформулирован на основе структурных (морфологических) свойств способов формообразующей обработки.

Этот критерий позволяет оценивать структурную (конструктивную) сложность различных классов, видов и способов обработки и сравнивать их между собой по этому показателю.

В данной работе рассмотрены также критерии, основанные на экспериментальных свойствах способов формообразующей обработки – виртуальных технических систем. Эти критерии – энергоемкость, технологическая наследственность, относительная производительность по основному и по штучному времени – носят также всеобщий характер. При этом последние два критерия проработаны достаточно подробно и могут быть использованы при практической оценке способов обработки.

Большинство примеров, использованных в предлагаемой работе, заимствованы из патентных источников, так как способы обработки, являясь объектами интеллектуальной собственности, защищаются охраняемыми документами (патентами). Это позволяет дополнительно познакомиться с основными направлениями дальнейшего развития с позиций синергетики конкретной области технологии формообразующей обработки и возможностями патентной защиты соответствующих способов обработки.

Следует отметить, что не каждый вновь предлагаемый способ, в том числе и формообразующей обработки, может быть защищен патентом. Такая защита предоставляется только способам, подпадающим под понятие «изобретение». В соответствии с действующим законодательством в Республике Беларусь [8], адекватным соответствующим законодательствам стран с высоким уровнем развития машиностроительного комплекса, данное понятие раскрывается следующим образом: «Изобретением, которому предоставляется правовая охрана, признается техническое решение, являющееся новым, имеющее изобретательский уровень и промышленное применение».

Так, технический объект, в том числе виртуальная техническая идея в виде способа формообразующей обработки (*S*-системы) решения какой-то задачи, для признания его изобретением должен обладать тремя названными свойствами. В указанном источнике раскрывается сущность свойств, характеризующих изобретение.

«Изобретение признается новым, если оно не является частью уровня техники, который определяется по общедоступным в Республике Беларусь и зарубежных странах сведениям до даты приоритета изобретения.

Изобретение имеет изобретательский уровень, если оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники.

Изобретение является промышленно применимым, если оно может быть изготовлено или использовано в промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и других отраслях деятельности».



В СССР основным охранным документом было Авторское свидетельство, введенное в 1919 году. Согласно этому охранным документу изобретение принадлежало государству.

В настоящее время в Республике Беларусь, как и в государствах ближнего и дальнего зарубежья, изобретения защищаются патентами. По патенту изобретение принадлежит заявителю, то есть юридическому лицу (университету, промышленному предприятию и т.п.) или физическому (автору, авторам или его (их) правопреемникам).

В большинстве стран срок действия патента – 20 лет с правом продления этого срока еще на пять лет. Выдача патента и его поддержание обеспечивается государственной пошлиной, выплачиваемой патентообладателем.

Таким образом, цель предлагаемой работы – дать с позиций синергетики системное представление о многообразии технических решений (виртуальных технических идей) на уровне способов формообразующей обработки (S-систем), то есть искусственно создаваемых технических решений (идей), обеспечивающих достижение конкретных технических эффектов при их реализации в технологических операциях и технологических машинах. В работе рассматриваются преимущественно способы формообразующей обработки, основанные на механическом резании. Однако изложенные в нем методологические основы системологии способов обработки носят всеобщий характер. Поэтому фундаментальные положения, приведенные в данной работе, могут быть распространены и на способы, основанные на иных физических явлениях.

# 1 СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

## 1.1 Определение понятия способа формообразующей обработки

Сущность любого технологического процесса изготовления деталей машин заключается в получении на твердом теле (заготовке) поверхностей заданных геометрических форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами. Для проведения таких технологических процессов в машиностроении используются различные технологические машины: металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, машины для наплавки, станки для электрофизической обработки и другие объекты техники, в основу конструкций которых положены различные способы формообразующей обработки. В технологии обработки материалов понятие способа обработки часто отождествляется с понятием метода обработки. Причем содержание этих понятий в технической литературе часто предполагается как аксиома.

В работе [9] дано следующее определение метода: «Метод (от греческого *methodos* – путь исследования или познания, теория, учение), совокупность приемов, способов, правил познавательной, теоретической и практической преобразующей деятельности людей. Эти приемы, правила, в конечном счете, устанавливаются не произвольно, а разрабатываются исходя из закономерностей самих изучаемых объектов. Поэтому методы познания столь же многообразны, как и сама действительность».

Из приведенного определения следует, что метод и способ не тождественны. Метод – это философская, или общенаучная, категория. Причем метод и способ входят в известную методологическую триаду:

*«принцип – метод – способ».*

Данная триада представляет собой иерархический треугольник, в котором минимум объема информации о решении конкретной задачи раскрывается в вершине треугольника, соответствующей принципу, а максимум – в противоположащей стороне этого треугольника, соответствующей способу или некоторому развивающемуся множеству способов, объединенных общей пионерной или первообразной целью. Например, пионерная цель для развивающегося множества способов нарезания зубчатых колес – получение зубчатых поверхностей изделий механическим резанием. Следовательно, метод – это в данном случае «путь исследования или позна-

ния» способов формообразующей обработки (виртуальных технических идей), являющихся объектами патентного права.

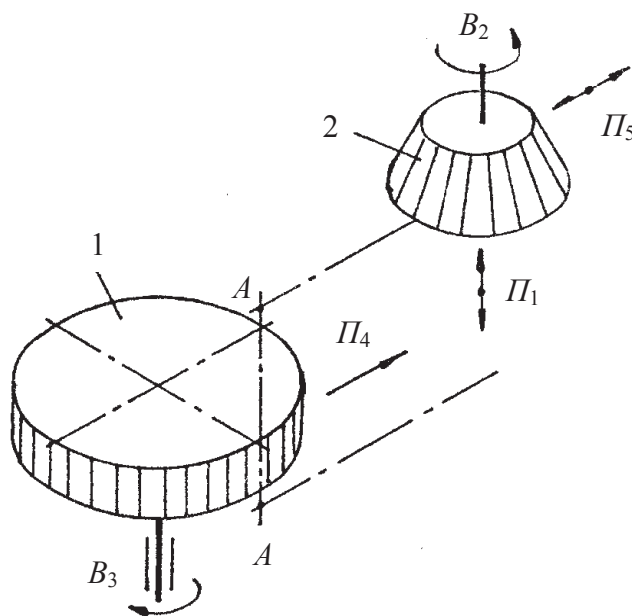
В более ранних энциклопедических изданиях, например [10], приводится следующее дополнительное определение: «В качестве метода может выступать система операций при работе на определенном оборудовании». Такое определение метода некорректно, так как в действительности «система операций при работе на определенном оборудовании» определяет производственный процесс, управляемый по вполне определенному алгоритму, заданному, как правило, технологией обработки, являющейся вторичным источником информации. В синергетике, являющейся частью общего системного анализа, такое смешение понятий не допустимо. Поэтому в данной работе в качестве метода будет пониматься только «путь исследования или познания...».

В нормативной, патентной литературе [11] периода возрождения в Советском Союзе Комитета по делам изобретений способ определяется как процесс выполнения взаимосвязанных действий, необходимых для достижения поставленной цели. Согласно этому определению, в практике патентоведения способ не может содержать несколько несвязанных между собой совокупностей взаимосвязанных действий, имеющих различное отношение к решаемой задаче. Это позволяет различать способы формообразования, термообработки, управления технологическими машинами, способы уборки стружки, охлаждения зоны обработки и т.п. Таким образом, можно утверждать, что способ – одна из частных конкретных совокупностей приемов взаимосвязанных действий, наделенных собственной целью.

Приведенное нормативное определение способа не в полной мере соответствует практике научно-технической экспертизы изобретений, так как учитывает только совокупность взаимосвязанных действий, то есть структуру способа. Данный тезис подтверждается структурным анализом произвольно выбранных способов формообразующей обработки, признанных в разное время изобретениями и защищенных соответствующими охраняемыми документами.

В основу большинства зубодолбежных станков для обработки цилиндрических зубчатых колес положен пионерный способ обкатного зубодолбления, предложенный в конце XIX столетия Феллоу Гир-Шепером [12]. По этому способу (рисунок 1.1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости *A-A*, совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомо-

гательных движений. Образующая зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным формообразующим поступательно-возвратным движением  $\Pi_1$  долбяка, а направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, – сложным движением обката  $B_2B_3$ , состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения  $B_2$  долбяка и вращения  $B_3$  заготовки.



**Рисунок 1.1. – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес при радиальном врезании**

На начальном этапе одновременно с указанными движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение  $\Pi_4$  радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку (или заготовке) сообщается движение  $\Pi_5$  «отскока», синхронизированное с движением  $\Pi_1$  долбяка. Движение отскока предназначено для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе с целью устранения скольжения зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса. Уместно отметить, что скольжение зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса, характерное для обкатного зубодолбления, называют явлением затирания.

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью  $P$  приемов, то есть целенаправленных действий, совершаемых над материальными объектами – заготовкой и долбяком, для достижения конкретной цели – получения прямозубого колеса внешнего зацепления. Наряду с приемами целенаправленных действий в качестве признаков способа выступают последовательность прие-

мов и правила выполнения отдельных приемов – определенность установки заготовки относительно направления движения врезания и существенно меньшей скорости движения врезания и скорости обката по сравнению со скоростью резания. Следует отметить, что выполнение отдельных приемов не имеет причинной связи с технологическими режимами выполнения операции зубодолбления.

Таким образом, целенаправленная совокупность приемов, осуществляющихся в заданной последовательности с определенными правилами выполнения отдельных приемов, характеризует данный способ зубодолбления как законченный целостный объект реальной действительности.

До изобретения описанного способа обработка зубчатых колес осуществлялась на различных этапах развития техники и технологии иными способами, например, сверлением на диске отверстий с требуемым шагом и запрессовки в эти отверстия цилиндрических пальцев, свободной ковкой с контролем посредством шаблона, строганием по копиру или разметке, фрезерованием фасонной, а затем модульной фрезой и т.п. Общими недостатками данных способов являются невысокая производительность и низкое качество получаемых зубчатых колес, что по существу и привело к изобретению способа обкатного зубодолбления. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что цель создания этого способа – повышение производительности и качества получаемых зубчатых колес. Следует также отметить, что в конце XIX столетия был изобретен еще один пионерный способ обкатной обработки зубчатых колес, в котором в качестве инструмента используется червячная фреза.

Изобретение способов (виртуальных технических идей) обкатного зубодолбления и обкатного зубофрезерования сопровождалось разработкой зуборезного долбяка, червячной фрезы и соответствующих станков для нарезания зубчатых колес. Эти технические объекты, то есть режущие инструменты и металлорежущие станки, также являются изобретениями. Можно утверждать, что изобретение обкатного зубодолбления и обкатного зубофрезерования совершило в XX столетии революционные преобразования в сфере производства зубчатых колес, реек и подобных им деталей.

Приведенный способ зубодолбления имеет ряд классических модификаций, признанных в разное время изобретениями, в частности для обработки косозубых колес. В этой модификации для получения образующей зубчатого колеса – прямой, наклоненной к оси заготовки, – движение  $B_2$  долбяка преобразуют из вращательного во вращательно-возвратное, которое функционально связывают с поступательно-возвратным движением  $П_1$

долбяка. Таким образом, при обработке косозубых колес линия зуба (образующая) воспроизводится сложным винтовым движением долбяка  $\Pi_1 B_2$ . Правила выполнения остальных движений ( $B_2 B_3$ ,  $\Pi_4 \Pi_5$ ) остаются неизменными. По существу в данной модификации движение  $B_2$  долбяка входит в два сложных формообразующих движения, что равнозначно алгебраическому суммированию двух независимых движений: вращательно-возвратного  $B_2^1$  и вращательного  $B_2^2$ . При долблении колес внутреннего зацепления, как прямозубых, так и косозубых, модификация сводится к тому, что долбяку и заготовке в сложном движении обката  $B_2 B_3$  элементарные вращательные движения сообщают в одну и ту же сторону.

При описании пионерного способа предполагалось, что процесс зубодолбления осуществляется за один проход заготовки после прекращения врезания (однопроходная обработка). В соответствии с общеизвестной нормативной классической рекомендацией эта схема используется также при зубодолблении за два или три прохода (многопроходная обработка). Каждому проходу предшествует врезание на часть припуска. При этом наибольший припуск срезается на первом проходе.

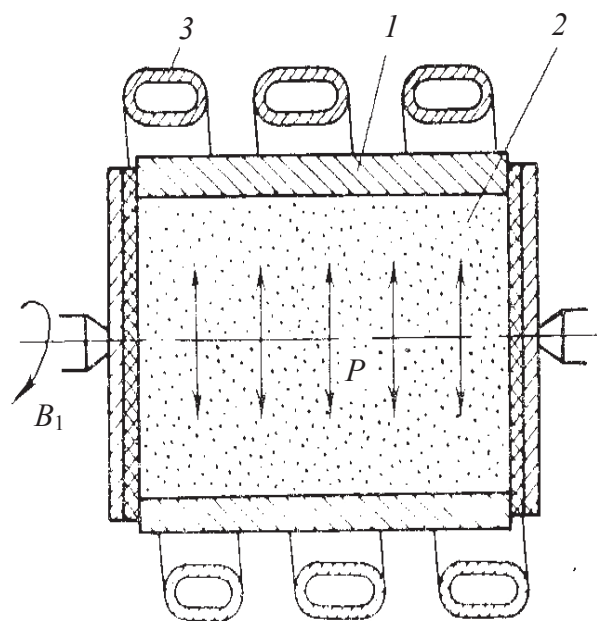
Заметим, что приведенные модификации пионерного способа зубодолбления по существу являются производными способами, обеспечивающими достижение как пионерной цели (получение цилиндрического зубчатого колеса), так и дополнительных целей (соответственно получение винтового зуба, получение зубчатого венца внутреннего зацепления, снижение усилия резания при обработке зубчатых колес с большим модулем).

При изготовлении деталей с износостойким поверхностным слоем заготовку 1 (рисунок 1.2) с запрессованной шихтой 2 вводят в индуктор 3 токов высокой частоты и нагревают в течение времени, необходимого для полного равномерного прогрева шихты и начала ее спекания. После этого, не прекращая нагревания, заготовке сообщают вращение  $B_1$  вокруг оси, необходимое для окончательного формирования поверхностного слоя.

В результате нагрева и действия центробежных сил  $P$  шихта, спекаясь, уплотняется и припекается к внутренней поверхности заготовки, образуя полую деталь с износостойким поверхностным слоем. Затем нагревание прекращают, а через определенное время, необходимое для полного затвердевания поверхностного слоя, выключают вращение заготовки.

Данный способ формообразующей обработки, основанный на приращении вещества к твердому телу, также характеризуется целенаправленной совокупностью приемов, их последовательностью и некоторыми обязательными правилами выполнения. К ним относятся: определенность

размещения шихты (исходного материала наплавленного слоя); определенность установки заготовки с запрессованной шихтой; время прогрева



**Рисунок 1.2. – Способ получения внутренних поверхностей**

заклучаются также в использовании двух энергетических источников (теплого и силового полей), воздействующих на шихту.

При чистовой упрочняющей обработке конических поверхностей (рисунок 1.3) деталь *1* закрепляют в патроне или в центрах токарного станка и сообщают ей вращательное движение  $B_1$ . Затем движением  $P_3$  подводят к детали накатной ролик *2*, создавая определенный натяг, необходимый для формирования поверхности детали. Вследствие фрикционного контакта поверхностей накатной ролик получает вращательное движение  $B_2$ . После чего ему сообщают движение подачи  $P_4$  вдоль направляющей обкатываемой поверхности. В результате такого воздействия накатным роликом на деталь происходит обработка ее конической поверхности. Данный способ основан на пластическом деформировании поверхностного слоя детали, то есть на перераспределении материала поверхностного слоя заготовки. Целесообразно организованная совокупность приемов воздействия на обкатываемую поверхность характеризует его как целенаправленный технический объект.

На рисунке 1.4 приведена схема способа резания струей жидкости [13]. При осуществлении данного способа заготовку *1* устанавливают под соплом *2*. Затем через него в направлении резания  $P_1$  подают струю жидкости диаметром 0,12...0,29 мм под давлением свыше 100 МПа со скоро-

сти шихты до начала ее спекания; время вращения детали после выключения нагревания для полного затвердевания прибавленного вещества.

Как и в примере, приведенном для зубообработки, правила выполнения отдельных приемов способа также не имеют причинной связи с технологическим режимом проведения операции наплавки.

Специфическая особенность рассматриваемого способа – отсутствие инструмента и передача его функции объекту, выполняющему функцию инструмента (полю центробежных сил), основанному на физическом явлении. Особенность способа

стью около 1500 м/с, а заготовке – движение  $\Pi_2$  в направлении подачи. При таких характеристиках струи жидкости ее воздействие на твердое тело обеспечивает качественную и производительную обработку деталей со сложным контуром.

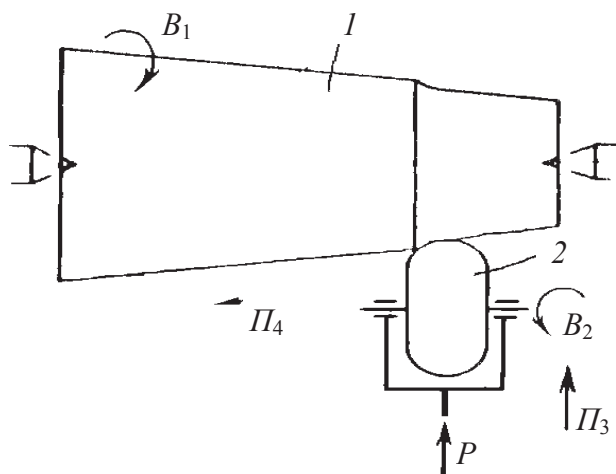


Рисунок 1.3. – Способ обкатки конической поверхности

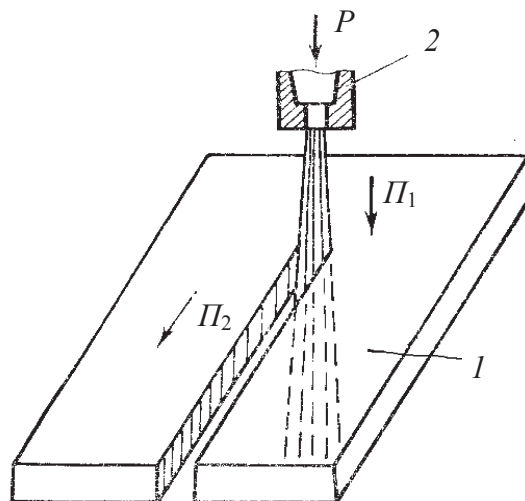


Рисунок 1.4. – Способ резания струей жидкости

Данный способ основан на механическом резании. Однако в отличие от традиционных способов резания в нем в качестве инструмента используется струя жидкости. В то же время способ резания струей жидкости, как и рассмотренные выше, представляет собой вполне определенный целенаправленный объект.

При рассмотрении конкретных способов формообразующей обработки были установлены некоторые правила выполнения отдельных приемов. Дополнительными правилами, характеризующими те или иные приемы, составляющие различные способы, могут быть: температура; усилие резания; стойкость инструмента; вектор направления воздействия энергетического поля; состояние среды, в которой осуществляется способ; и т.д. Главная особенность правил выполнения отдельных приемов – отсутствие причинной связи между ними и технологическими режимами выполнения конкретных операций. Правила выполнения отдельных приемов объединены с совокупностью приемов лишь общей решаемой задачей. В этом заключается принципиальная сущность отличия способов формообразующей обработки от технологических операций.

Возвращаясь вновь к рассмотренным примерам, замечаем, что при формообразующей обработке воздействовать на твердое тело можно не



только непосредственно инструментом, но и передавая его функцию объекту, основанному на каком-либо физическом явлении. Вместе с тем целевое назначение различных способов формообразующей обработки – получение на твердом теле поверхностей заданных геометрических форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами. Это позволяет рассматривать и анализировать различные на первый взгляд способы формообразующей обработки совместно с единых позиций.

На основании изложенного в [14] сформулировано понятие способа формообразующей обработки. *Способ формообразующей обработки* – это целенаправленная совокупность (множество) приемов воздействия посредством инструмента или объекта, выполняющего его функцию, на твердое тело, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил, например, в течение некоторого времени, при определенном соотношении воздействий приемов, определенной температуре, определенном состоянии среды, в которой происходит процесс.

Данное определение способа формообразующей обработки, опубликованное в 1986 году, адекватно следующему определению, используемому в настоящее время в патентном законодательстве Республики Беларусь [15]. «К способам как объектам изобретения относятся процессы выполнения действий (операций, приемов), приводящих к созданию новых или изменению известных материальных объектов, или процессы исследования материальных объектов. Для характеристики способа могут быть использованы следующие признаки: выполняемые действия (операции); последовательность выполняемых действий; условия осуществления действий (операций), ...».

## **1.2 Способ формообразующей обработки как целенаправленная техническая система**

Известны многочисленные попытки дать четкое определение системы. Как правило, они не альтернативны, а взаимно дополняют друг друга. Вместе с тем все известные определения понятия системы можно разделить на две принципиально различные группы. *Первую* составляют определения, в которых предпринимается попытка унифицировать всю системную концепцию путем формулирования некоторого единого всеобщего определения системы на основе общих законов, граничащих с философскими. Во *вторую* входят определения, характеризующие систему как некоторый фрагмент объективной реальности существующей действительно-

сти, вычлененной для достижения заданной цели. При этом само вычленение зависит как от характера реальности, так и от познавательных или практических потребностей. Понятия второй группы включают субъективный фактор. Тем не менее применительно к конкретному исследованию в области естественных наук более правильны определения понятия системы, составляющие именно эту группу, так как в данном случае теория систем имеет свою сферу применения, в то время как определения первой группы фактически приводят к утрате качественной специфики этого понятия.

Изложенное выше позволяет объяснить такие широко используемые в обработке резанием понятия, как схемы резания [16] и возникновение поверхности в пространстве и времени [17]. Первое характеризует основную сущность процесса резания – процесс образования стружки, а второе – геометрическую интерпретацию получения поверхностей при механической обработке. Следовательно, объекты, определяемые этими понятиями, вычленены из реальной действительности для конкретных исследований – систематизации механического резания с позиций стружкообразования и систематизации схем образования поверхностей с геометрической точки зрения.

Необходимо отметить, что понятия схемы резания и возникновение поверхности в пространстве и времени являются более узкими, чем понятие способа формообразующей обработки, данное в предыдущем разделе.

Таким образом, концептуальную и методологическую разработку системного подхода необязательно начинать с выработки некоторого исчерпывающего  $n + 1$ -го определения системы. Поэтому воспользуемся одним из известных определений, наиболее приемлемым для настоящей работы [14].

Под системой будем понимать совокупность целесообразно организованных, функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающую по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией. Будем понимать под структурой схему связей и отношений между элементами системы, а под функцией – целенаправленное поведение (функционирование) системы [18], или порядок осуществления процесса.

Из приведенного определения системы следует, что любой способ формообразующей обработки может быть отнесен к категории системных в том случае, если он обладает целостностью, а его свойства и функция не сводятся непосредственно к свойствам и функциям составляющих его элементов.

В обработке материалов резанием используется множество различных способов токарной обработки. Простейший и в то же время пионер-

ный способ в этом множестве был изобретен до нашей эры. Так, Архимед, знаменитый ученый древнего мира (3-й век до нашей эры), в описании прибора для астрономических измерений упоминает «...небольшой цилиндр, обточенный на токарном станке».

С тех пор техника обработки резанием, в том числе токарная обработка, прошла длинный и сложный путь развития – от примитивной ручной до сложнейшей автоматизированной механической обработки, уровень которой определяется общим уровнем техники и характеризуется точностью получаемых изделий и производительностью.

На современном языке логическая формула изобретения данного пионерного способа формообразующей обработки может быть представлена как *способ обработки резанием*, заключающийся в том, что заготовке сообщают вращательное движение относительно оси ее вращения, а резцу – подачу параллельно оси заготовки. Схема, иллюстрирующая этот способ, приведена на рисунке 1.5.

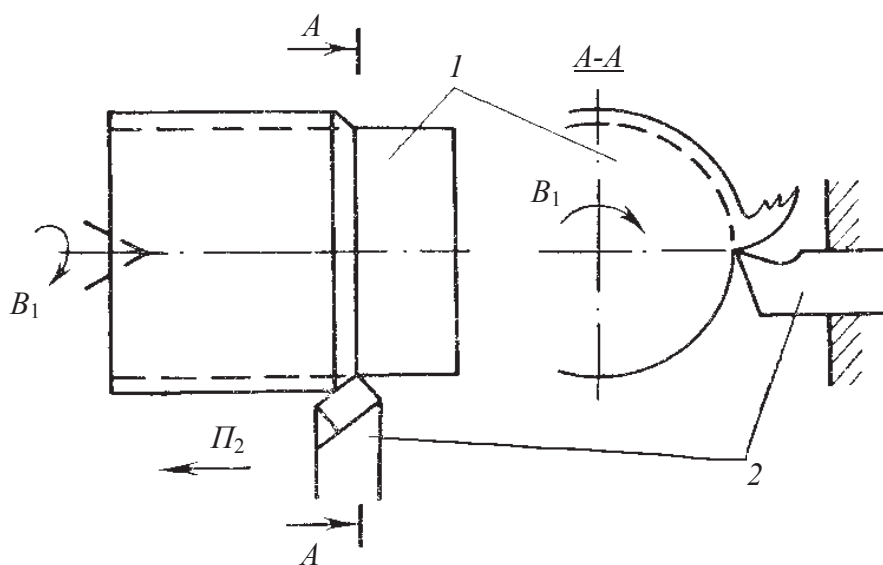


Рисунок 1.5. – Способ токарной обработки

По этому способу заготовке 1, определенным образом ориентированной относительно резца 2, сообщают вращение  $B_1$  вокруг ее оси, а резцу – поступательное перемещение  $\Pi_2$  вдоль оси заготовки. В результате целенаправленного выполнения этих приемов резец 2 срезает с заготовки 1 определенный слой материала, образуя на твердом теле поверхность заданной формы и размеров с физико-механическими свойствами, зависящими от технологических режимов выполнения приемов и свойств материала заготовки.

Анализируя описанный способ токарной обработки, замечаем, что он обеспечивает качественное изменение объекта производства – твердого тела. В этом заключается целостность способа и его функция. Структура способа состоит из следующих целесообразно организованных элементов: приемов (установка заготовки  $I$ , сообщение ей вращения  $B_1$ , сообщение резцу поступательного перемещения  $П_2$ ); последовательности приемов (вначале установка заготовки, а затем сообщение ей и резцу движений); правил выполнения отдельных приемов (определенность базирования заготовки относительно резца или окружающей среды, характеризуемой системой координат пространства и времени, существенно меньшей скорости перемещения резца по сравнению со скоростью вращения заготовки). Отметим, что два последних элемента (правила выполнения отдельных приемов) в практике металлообработки подразумеваются как сами собой разумеющиеся. Поэтому при описании способов формообразующей обработки как патентной, так и в технической литературе они обычно опускаются.

Анализ показывает, что рассмотренный способ токарной обработки может быть отнесен к категории системных. Вместе с тем он подпадает под понятие способа формообразующей обработки, определенное в разделе 1.1.

Пример, раскрывающий системный характер конкретного способа формообразующей обработки, выбран произвольно из множества реально существующих способов. Аналогично можно анализировать и другие способы (например, рассмотренные ранее), независимо от вида энергии, используемой для воздействия на твердое тело. Следовательно, это позволяет утверждать, что любой способ формообразующей обработки одновременно является системой. Можно целенаправленно изменять структуру и функцию исходных способов, называемых в научно-технической экспертизе (НТЭ) изобретений аналогами и прототипами, и тем самым получать качественно новые способы с иной структурой и функцией, обеспечивающие достижение новой конкретной цели. Естественно, структурные изменения могут охватывать не только отдельные структурные элементы, но и значительно преобразовывать структуру и функцию, что влечет за собой появление новых способов, в том числе подлежащих правовой охране. Однако любой новый способ формообразующей обработки будет характеризоваться со стороны целостности как относительно обособленный объект из совокупности всех известных и возможных новых способов, объединенных общей пионерной или первообразной целью; со стороны функции – как процесс формообразования поверхностей заданной формы и размеров с определенными физико-механическими свойствами, то есть как процесс качествен-

ного изменения твердого тела; со стороны структуры – как множество целесообразно связанных элементов (приемов, их последовательности и правил выполнения). Объекты – способы формообразующей обработки, обладающие совокупностью названных свойств, – являются результатом творческого поиска и создаются для решения конкретных задач. Следовательно, они могут быть отнесены к категории технических систем, обозначаемых в дальнейшем как  $S$ -системы.

При реализации рассмотренных в настоящем разделе способов формообразующей обработки в виде технологических операций на соответствующих технологических машинах режимы обработки устанавливаются до начала процесса формообразования, что по существу является статической настройкой и соответствует известному в области систем управления принципу «как сделать». По этому принципу при формообразующей обработке не учитывается информация о динамике процесса резания. В итоге возникают отклонения от заданной при статической настройке точности относительного положения и движения инструмента, и обрабатываемой заготовки. Эти отклонения носят переменный характер и изменяются случайно или по определенному закону в функции времени, в функции координат. Исходя из этого, достижение повышенной точности возможно посредством непрерывной во времени регистрации информации о процессе резания, например, о силе резания и синхронное внесение соответствующей поправки в правило выполнения одного из приемов, например, подачи. Такое регулирование процесса резания при формообразующей обработке принято называть адаптивным предельным регулированием. В этом случае принцип «как сделать» приобретает характер задания типа «что сделать» для обеспечения более высокой точности, чем при статической настройке.

Из множества факторов, искажающих точность обработки на технологических машинах, назовем два, имеющих непосредственное отношение к способам формообразующей обработки резанием, – неравномерность припуска и микротвердости материала обрабатываемых заготовок от сечения к сечению, изменяющиеся случайно.

Вернемся к способу токарной обработки по рисунку 1.5. Воздействие инструмента на заготовку внешне проявляется в виде силы резания. Сила резания зависит от многих факторов: скорости резания, подачи, геометрии вспомогательного элемента инструмента, припуска на обработку, твердости материала заготовки и т.п. Следует отметить, что припуск и твердость являются усредненными параметрами. При обработке сила резания непрерывно изменяется в большую и меньшую стороны от номинального

(усредненного) значения. При этом амплитуда ее изменения будет увеличиваться или уменьшаться пропорционально случайному изменению амплитуд припуска и микротвердости заготовки. Такое изменение вызывает пропорциональное изменение упругого отжатия в контакте «заготовка – инструмент». Следствием этого является двухстороннее изменение размера по отношению к номинальному значению.

Сила резания наиболее чувствительно реагирует на изменение подачи при прочих равных условиях. Можно непрерывно регистрировать силу резания и преобразовывать ее значение в сигнал, удобный для пропорционального непрерывного во времени изменения правила выполнения подачи. Таким образом, управляя подачей, заданной статически, можно стабилизировать силу резания и, следовательно, свести к минимуму влияние указанных выше факторов, изменяющихся случайно, на процесс резания. В итоге будет уменьшаться поле рассеяния размера, получаемого в процессе обработки, что соответствует более высокой точности обработки, чем при статической настройке.

Вероятно, именно таким образом в середине XX столетия Б.С. Балакшин (автор рассмотренного способа формообразующей обработки) решал технологическую задачу повышения точности обработки посредством стабилизации силы резания. По существу в данном техническом решении впервые технологическая задача повышения точности обработки пересекается с геометрической задачей формообразования поверхности при резании. Это обстоятельство позволяет рассмотренный способ токарной обработки, учитывающий динамику процесса резания, отнести к пионерным техническим решениям. Цель такого решения – повышение точности обработки посредством стабилизации силы резания за счет устранения влияния случайных факторов – неравномерности припуска на обработку и микротвердости материала заготовки от сечения к сечению.

В качестве стабилизируемого параметра может использоваться также крутящий момент и мощность резания при решении той же технологической задачи, то есть повышения точности обработки. Можно утверждать, что способ токарной обработки с адаптацией по конкретному критерию (критериям) является первой синергетической *S*-системой в области обработки резанием. Названная *S*-система – это начало создания и развития систем адаптивного управления технологическим оборудованием. Наиболее широко эти системы используются в металлорежущих станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

По сложившейся традиции к адаптивному управлению формообразующей обработкой наряду с описанным двухсторонним предельным регулированием статически заданного правила выполнения приема (подачи) относят также оптимальное регулирование. Этот вид регулирования обеспечивает беспойсковое аналитическое или поисковое экспериментальное определение режима обработки по различным критериям, например, минимуму приведенных затрат, максимуму стойкости инструмента и др. При оптимальном регулировании стабилизация силового параметра (силы резания, крутящего момента или мощности резания) не осуществляется. Из этого можно сделать вывод, что оптимальное регулирование не имеет непосредственного отношения к способам формообразующей обработки.

К адаптивному управлению формообразующей обработки очевидно можно отнести также отслеживающую синхронизацию как по схеме *«задающая – ведомая координата»*, так и по схеме *«равнозначных координат»*, обеспечивающую устранение девиации механики приводов исполнительных органов кинематических групп, воспроизводящих сложное формообразующее движение, посредством двухстороннего предельного регулирования. Такую синхронизацию рационально использовать, например, в группах обката зубообрабатывающих станков с числовым программным управлением. Вместе с тем следует отметить, что такой вид адаптивного управления также не имеет непосредственного отношения к способам формообразующей обработки.

Уместно отметить, что системы адаптивного управления с оптимальным регулированием и системы отслеживающей синхронизации также относятся к классу синергетических систем.

### **1.3 Цель как критерий целесообразности развития многообразия S-систем**

В широком смысле функцию системы можно определить как ее способность к целесообразной деятельности в рамках более сложной системы, в состав которой она входит. Целесообразная деятельность S-систем заключается в воздействии на твердое тело в пространстве и времени, то есть внешней среде, характеризуемой системой координат и временем как независимой переменной с целью получения из исходного объекта – заготовки готового изделия с заданными геометрическими формами, размерами и физико-механическими свойствами. Наряду с названной целью, которую

можно рассматривать как первообразную, определяющую основную сущность функционирования всех  $S$ -систем, в соответствии с потребностями практики машиностроения ставится ряд конкретных производных целей при создании таких систем.

Как показывает анализ патентных источников, производной целью может быть повышение точности или производительности обработки, увеличение периода стойкости инструмента, снижение энергоемкости процесса обработки, достижение новых ранее неизвестных совокупностей свойств изделий, исключение из процесса некоторых промежуточных фаз и т.п.

При создании новых  $S$ -систем на уровне изобретений цель при переходе от прототипа к новому техническому решению изменяется скачкообразно как при количественном, так и при качественном ее задании. При материализации новой системы в виде технологической операции цель, заданная количественно, может быть оптимизирована через управляемые независимые параметры процесса обработки. Все это приводит к периодической переоценке места и значимости разных  $S$ -систем и их групп на основе широкого комбинирования различных вариантов структурных элементов, их последовательностей и правил выполнения.

Проиллюстрируем изложенное на конкретном примере.

Первообразным для способа зубодолбления с касательным врезанием [19] является рассмотренный выше пионерный способ по рисунку 1.1. При касательном врезании (рисунок 1.6) заготовку  $1$  устанавливают на расстоянии  $h$  от плоскости движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка  $2$ .

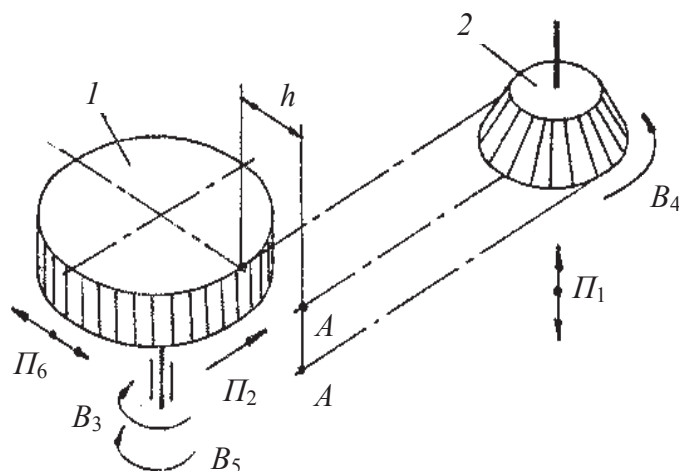


Рисунок 1.6. – Зубодолбление с касательным врезанием



Затем долбяку 2 сообщают поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  скорости резания, и процесс долбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания  $\Pi_2$ , согласованное с ее вращением  $B_3$ , одновременно долбяку и заготовке сообщают движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений  $B_4$  долбяка и  $B_5$  заготовки. Этот этап продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию  $A-A$ , соответствующую окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем движение врезания  $\Pi_2 B_3$  прекращают и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката  $B_4 B_5$ . На обоих этапах обработки заготовке сообщают, как и в прототипе, движение  $\Pi_6$  «отскока» при холостом ходу долбяка.

Цель способа зубодолбления с касательным врезанием автором определена в виде улучшения условий резания и повышения стойкости долбяка. По-видимому, с точки зрения экспертизы изобретений в данном случае было бы более корректно задание цели в виде повышения стойкости долбяка за счет улучшения условий резания на этапе врезания.

В анализируемом примере цель имеет качественную меру. Поэтому ее параметрическая оптимизация (например, максимизация) периода стойкости долбяка вследствие улучшения условий резания в данном случае, видимо, невозможна. Вместе с тем отметим, что переход к касательному врезанию снижает производительность обработки при сохранении традиционных соотношений между подачей врезания и круговой подачей. Объясняется это тем, что при касательном врезании путь движения врезания возрастает пропорционально увеличению модуля и чисел зубьев долбяка и нарезаемого колеса, что ставит под сомнение возможность использования данного способа при проектировании зубодолбежных станков.

Сохраняя преимущество рассматриваемого способа по отношению к прототипу, заданное качественной целью, устраним выявленный недостаток, то есть найдем путь увеличения производительности при зубодолблении с касательным врезанием. Достижение этой цели возможно на основе следующих рассуждений. При зубодолблении сумма скоростей врезания и круговой подачи на этапе врезания лимитирует прочностные возможности долбяка и механики станка. Следовательно, для повышения производительности круговая подача должна быть максимально возможной по сравнению с подачей врезания. Поэтому традиционно подачу врезания назначают равной  $0,1 \dots 0,3$  от круговой подачи. Учитывая это, изменим по-

рядок выполнения приемов врезания и профилирования и одновременно правило выполнения врезания. На первом этапе обработки можно осуществлять только врезание, а на втором – только обкат (профилирование). Подачу врезания назначим из условия предельных прочностных возможностей, то есть равной  $1,1 \dots 1,3$  круговой подачи. Как показывают расчеты, машинное время зубодолбления при таком изменении S-системы скачкообразно уменьшается в  $1,2 \dots 1,7$  раза в зависимости от числа зубьев нарезаемого колеса. В случае материализации полученной таким образом новой (производной) S-системы в соответствующем станке и выполняемой на нем технологической операции в пределах указанного скачкообразного уменьшения машинного времени возможна параметрическая оптимизация цели (повышение производительности), например, при задании максимально допустимой величины огранки зубьев нарезаемого колеса.

#### **1.4 Способ формообразующей обработки как объединение кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие подсистем**

Рассматривая различные S-системы (способы формообразующей обработки), несмотря на их большое многообразие, уровень сложности (развитости), вид используемой энергии и характер функционирования, в их структуре можно выделить некоторые наиболее общие составляющие, присущие всем известным и возможным новым S-системам.

Любая S-системы является прообразом конкретной технологической операции, характеризующейся набором свойств и отношений применительно к конкретному обрабатываемому материалу. Наиболее общая характеристика любой операции – ее повторяемость при условии повторения в определенных задаваемых пределах количественных и качественных характеристик получаемых результатов. Следовательно, можно утверждать, что эта характеристика присуща и S-системам.

Рассмотренные в данном разделе примеры S-систем подтверждают известный тезис о том, что процесс воздействия на твердое тело при формообразующей обработке осуществляется при определенных относительных движениях заготовки и инструмента. Определенность траекторий формообразующих движений обеспечивается схемой формирования поверхности, которая определяет закономерности относительного движения заготовки и инструмента без учета физических явлений, протекающих

в зоне обработки, действующих сил, температур и активных сред. По существу, схема формообразования является графическим представлением соответствующего способа. В научно-технической экспертизе (НТЭ) изобретений схема формообразования является составной частью описания изобретения и используется для детальной конкретизации описания и формулы изобретения, выражаемой на вербальном (словесном) языке в форме одного предложения. Можно утверждать, что схема формообразования характеризует общую составляющую *S*-систем – кинематическую. Она относительно выделена, наделена определенной структурой и функцией. Будем называть ее *кинематической подсистемой S-системы*.

Второй общей составляющей *S*-систем является совокупность элементов, обеспечивающих определенность исходной установки заготовки относительно инструмента или в общем случае относительно объекта, воздействующего на заготовку. Эта составляющая *S*-систем обеспечивается схемой базирования заготовки, реализуемой в конкретных технологических машинах различными по конструкции устройствами. Схема базирования, являясь составной частью *S*-системы, также характеризуется относительной выделенностью, наделена определенной структурой и функцией. Такую общую составляющую *S*-систем будем называть *базирующей подсистемой*.

Процесс воздействия на твердое тело осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. Вид используемой энергии определяет вид физического или физико-химического воздействия, играющего определенную роль в изменении исходного состояния твердого тела: в снятии материала удаляемого слоя, в прибавлении материала к заготовке или в перераспределении материала твердого тела. Основными физико-химическими процессами, обуславливающими изменение исходного состояния твердого тела, являются пластическая деформация, вязкое или хрупкое разрушение, плавление, литье, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение, травление (химическое разрушение), диффузионное насыщение и т.п. Определенность энергетического воздействия на твердое тело обеспечивается схемой подвода энергии, характеризующей закономерности подвода энергии непосредственно для технологических целей без учета ее преобразований, происходящих в обрабатываемом материале. Схема энергетического воздействия – третья общая составляющая, присущая всем *S*-системам. Как и две предыдущие, она также характеризуется относительной выделенностью и имеет определенную структуру и функцию. Будем называть ее *энергетической подсистемой*.

Таким образом, в наиболее общем виде абсолютное большинство способов формообразующей обработки, определяемых как  $S$ -система, можно представить в виде объединения относительно обособленных подсистем (*кинематической, базирующей и энергетической*), каждая из которых наделена структурой и функцией. Причем, как следует из изложенного выше, структура и функция  $S$ -систем не сводятся непосредственно к структуре и функции составляющих ее подсистем.

Способы обработки, представляемые как  $S$ -системы, состоящие из трех названных подсистем, решают геометрическую задачу при воспроизведении реальных поверхностей. При этом точность получаемых поверхностей конкретных деталей ограничивается статическим заданием правил выполнения приемов воздействия на заготовку, то есть статической настройкой параметров обработки.

Дальнейшее повышение точности обработки привело к созданию  $S$ -систем с динамической настройкой, обеспечивающей стабилизацию силового воздействия на заготовку посредством устранения влияния изменяющихся случайно факторов – неравномерности припуска и микротвердости обрабатываемых заготовок от сечения к сечению – на силовое воздействие, например, силу резания в зоне обработки. Такую стабилизацию силового воздействия в терминах теории автоматического регулирования принято называть предельным двухсторонним регулированием. Следовательно, можно утверждать, что схема стабилизации силового воздействия является четвертой составляющей, присущей  $S$ -системам с адаптацией к случайно изменяющимся факторам. Так же как и три предыдущие, она относительно выделена и имеет определенную структуру и функцию. Будем называть эту составляющую *подсистемой стабилизации силового воздействия*.

Содержащие в своей структуре подсистему стабилизации силового параметра  $S$ -системы являются синергетическими, с адаптацией по конкретному критерию (критериям) [5]. Реализуются эти  $S$ -системы, как правило, в высокоточных станках, оснащенных системами числового программного управления.

Таким образом, можно утверждать, что все многообразие  $S$ -систем (способов формообразующей обработки) состоит из двух классов: первый класс составляют традиционные  $S$ -системы, функционирующие в режиме статической настройки; второй класс – относительно новые  $S$ -системы, функционирующие в режиме стабилизации силового воздействия, то есть в режиме статической и динамической настроек.

## 1.5 Многообразие способов формообразующей обработки как большая развивающаяся система

Способы формообразующей обработки ( $S$ -системы) можно разделить на три больших непрерывно пополняющихся класса, различающихся между собой по принципу воспроизведения реальных поверхностей деталей машин. Первый класс составляют  $S$ -системы, основанные на удалении части вещества твердого тела заготовки, второй –  $S$ -системы, основанные на прибавлении вещества к заготовке, третий –  $S$ -системы, основанные на перераспределении вещества в заготовке. Вместе с тем в основе любой  $S$ -системы независимо от ее принадлежности к одному из названных классов лежат первичные факторы физического воздействия на вещество твердого тела. Наиболее значительна группа  $S$ -систем, использующих только одно из возможных физических воздействий (например, обработку поверхностным пластическим деформированием – механическое воздействие рабочих поверхностей деформирующих инструментов) или химических (лучевую обработку – тепловое воздействие сфокусированного луча с высокой плотностью энергии). Известны  $S$ -системы, в которых используются два первичных воздействия на твердое тело, например, обработка резанием с опережающим пластическим деформированием – механическое воздействие деформирующего ролика и механическое воздействие рабочей поверхности резца; анодно-механическая обработка – электрохимическое воздействие электрического тока и механическое воздействие инструмента; центробежная наплавка поверхностного слоя в поле токов высокой частоты – тепловое воздействие токов высокой частоты и механическое воздействие центробежных сил. Используется и большее число первичных воздействий.

Первичные воздействия на вещество твердого тела разделяются на механические, электрические, магнитные, тепловые, лучевые и химические. Для каждого воздействия применяется соответственно механическая, электрическая, магнитная, тепловая, лучевая и химическая энергия непосредственно для технологических целей, то есть для формоизменения твердого тела заготовки.

Способы обработки, основанные на использовании механического воздействия на твердое тело, называют механической обработкой. Учитывая это, различают способы обработки резанием, давлением, поверхностным пластическим деформированием и т.д.

Электрические способы обработки основаны на использовании электрической энергии путем подвода ее в зону обработки без промежуточного превращения в другие виды энергии. Преобразование электрической энергии в другой вид, например тепловую, механическую, химическую, происходит непосредственно в обрабатываемом материале. При электромеханических способах применяют преимущественно тепловое воздействие электрического тока; при электроэрозионных – эрозионное; при электрохимических – химическое.

Незначительную, практически не исследованную, группу составляют способы, основанные на использовании энергии магнитного поля для непосредственного формообразования изделий из расплавленного металла. Классическим аналогом этого направления в области формообразующей обработки является литье по выплавляемым моделям и литье под давлением. Перспективную группу составляют способы получения изделий (заготовок) посредством потоков энергии (послойный синтез).

В технике формообразующей обработки широко распространена тепловая энергия. Однако, как правило, она используется или для предварительного перевода вещества твердого тела в жидкое состояние, например, при различных литейных процессах, или для предварительного разогрева заготовок перед формообразующей обработкой, например, при горячей штамповке, обработке резанием с предварительным подогревом и т.п.

Лучевые способы используют воздействие сфокусированного луча с высокой плотностью энергии, в настоящее время применяются преимущественно для обработки, связанной с удалением части вещества заготовки, удаление которого происходит в результате испарения. Известны также лучевые способы обработки, основанные на прибавлении вещества к заготовке, например, плазменное напыление, лучевая наплавка. В зависимости от физической природы луча различают следующие виды лучевой обработки: плазменную, лазерную, ионную, электрическую.

В практике металлообработки развиваются способы, использующие химическую энергию, которая обычно применяется для удаления части вещества твердого тела. Процесс основан на размерном глубоком травлении (химическое фрезерование).

В связи с возрастанием использования в машиностроении труднообрабатываемых материалов наметилась тенденция все большего отхода от традиционных способов, основанных только на одном виде воздействия на твердое тело, к способам с комбинированным воздействием двух видов

энергии и более. Этот закономерный процесс одновременно решает также ряд дополнительных проблем, таких как повышение качества получаемых поверхностей, производительности и размерной стойкости инструмента; снижение допусков для последующей обработки и т.п. Комбинированные *S*-системы могут различаться по двум признакам: перечню составляющих физических и химических воздействий, обеспечивающих формоизменение заготовки; взаимосвязи различных видов физического и химического воздействия, обеспечивающих только количественное или же качественное изменение процесса формообразования. По последнему признаку комбинированные способы могут разделяться на два вида. Первый вид составляют способы с преимущественным влиянием одного из воздействий. Например, резание с подогревом зоны обработки (дополнительное тепловое воздействие), снижая механические характеристики материала удаляемого слоя, повышает эффективность основного механического воздействия, качественно не изменяя обычного процесса механической обработки. Второй вид составляют способы, у которых нельзя разделить воздействия на основные и дополнительные. Примером *S*-системы такого вида может служить способ ультразвукового алмазно-электрического сверления, при котором процесс стружкообразования характеризуется специфическими закономерностями, не совпадающими с составляющими их обычными процессами резания. В этом случае воздействие двух физических процессов нельзя рассматривать как простую арифметическую сумму, так как иногда совмещение нескольких физических воздействий может дать новые технические эффекты, обеспечивающие существенное повышение производительности обработки, стойкости инструмента и качества получаемых поверхностей. С точки зрения синергетики данное обстоятельство является синергетическим эффектом и существенным признаком для правовой охраны технической идеи, то есть признания ее изобретением.

К этой же группе относятся способы формообразующей обработки ферропорошками в электромагнитном поле. Принципиальная особенность этой группы способов – возможность использования ферропорошка в качестве режущего инструмента при чистовом (тонком) размерном шлифовании и полировании, а также при его использовании в качестве наплавляемого материала на обрабатываемую поверхность.

Технологические аспекты различных способов формообразующей обработки как традиционных, так и относительно новых подробно рассмотрены в технической литературе.

Процесс формообразующей обработки – сложный комплекс физико-химических явлений, протекающих в зоне обработки. Условия протекания процесса, сохраняя основную функцию *S*-системы (целенаправленное формоизменение заготовки), можно регулировать, управляя технологическими параметрами в пределах рациональной области использования конкретного способа обработки. Вместе с тем, как было показано выше, изменение хотя бы одного из элементов *S*-системы приводит к новому способу с новой структурой и функцией. Причем с позиций системного представления объем структурных изменений способа (прототипа) не имеет существенного значения. Это вытекает из того, что любые целенаправленные структурные преобразования приводят к новой *S*-системе. Естественно, уровень новизны появляющихся в результате таких преобразований новых способов будет определяться качественными характеристиками. Например, открытие в 1943 году электроэрозионного явления способствовало созданию очередного пионерного способа формообразующей обработки. Дальнейшее его совершенствование привело к появлению важного научного и практического направления в области размерной металлообработки, насчитывающего в настоящее время значительное количество различных способов электроэрозионной и электроискровой обработки, по уровню новизны значительно отличающихся от исходного пионерного способа. Аналогичные примеры относятся и к другим областям размерной обработки. В этом состоит суть диалектики появления новых способов формообразующей обработки и непрерывного развития их многообразия.

Таким образом, можно утверждать, что вся совокупность известных и возможных новых способов формообразующей обработки как целенаправленных *S*-систем, связанных общей первообразной целью независимо от принципа воспроизведения реальных поверхностей и вида используемой энергии, представляет собой большую развивающуюся систему или надсистему по отношению к составляющим ее *S*-системам.



## 2 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 2.1 Понятие о характеристическом образе инструмента

Форма любой детали есть замкнутое пространство, ограниченное реальными геометрическими поверхностями, которые образованы в результате обработки тем или иным технологическим способом: резанием, штамповкой, литьем, наплавкой и т.д. При этом, какой бы способ формообразующей обработки ни был применен, реальные поверхности детали всегда отличаются от идеальных геометрических поверхностей, которыми мысленно оперируют при конструировании изделий. Реальные поверхности, полученные на технологическом оборудовании, в том числе на металлорежущих станках, отличаются от идеальных формой, размерами и шероховатостью. Теоретически процесс формообразования реальных поверхностей на технологическом оборудовании аналогичен процессу формирования идеальных поверхностей в проективной геометрии, то есть базируется на идеальных геометрических представлениях. Таким образом, формообразование реальной поверхности в металлообработке любым способом представляет собой по существу процесс образования соответствующей геометрической поверхности, под которой (по Г. Монжу) обычно понимают след, оставляемый одной производящей линией, называемой образующей, при ее движении по другой производящей линии – направляющей. Производящие линии реальных поверхностей создаются при помощи вспомогательных элементов [17], материализованных на рабочей части инструмента. Вспомогательным элементом могут быть материальная точка, линия или некоторая поверхность (рисунок 2.1).

При строгании плоскости вспомогательным элементом (рисунок 2.1, *a*) является точка  $I$  – вершина резца. Обе воспроизводящие линии (образующая  $2$  и направляющая  $3$ ) в этом случае воспроизводятся соответственно движением  $P_1$  резца и движением  $P_2$  заготовки.

Вспомогательный элемент – линия по форме и протяженности может соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при точении фасонной поверхности (рисунок 2.1, *б*) режущая кромка  $I$  резца является копией образующей  $2$  получаемой поверхности. В этом случае воспроизведение образующей происходит без движения формообразования, необходимо только установочное движение  $P_2$  для перемещения вспо-

могательного элемента в исходное положение. Направляющая 3 воспроизводится движением  $B_1$  заготовки.

Вспомогательный элемент – линия – по форме и протяженности может не соответствовать форме и протяженности образуемой линии. Например, при долблении зубчатой рейки (рисунок 2.1, в) режущая кромка 1 долбяка представляет собой последовательно чередующиеся дуги окружностей, левой и правой эвольвент, а воспроизводимая во время обработки направляющая 2 зубчатой поверхности рейки – ломаную линию. Направляющая 2 в этом случае получается качением  $B_1$  долбяка, согласованным с поступательным движением  $\Pi_2$  заготовки. Образующая 3 воспроизводится движением  $\Pi_3$  долбяка.

Вспомогательный элемент – поверхность – по форме и протяженности соответствует образуемой поверхности. Например, при штамповке рабочая поверхность 1 инструмента (матрицы 2 и пуансона 3) является копией воспроизводимой поверхности (рисунок 2.1, г). В этом случае образование поверхности происходит без движений формообразования. Необходимо только установочное движение  $\Pi_1$  для перемещения вспомогательного элемента в конечное положение.

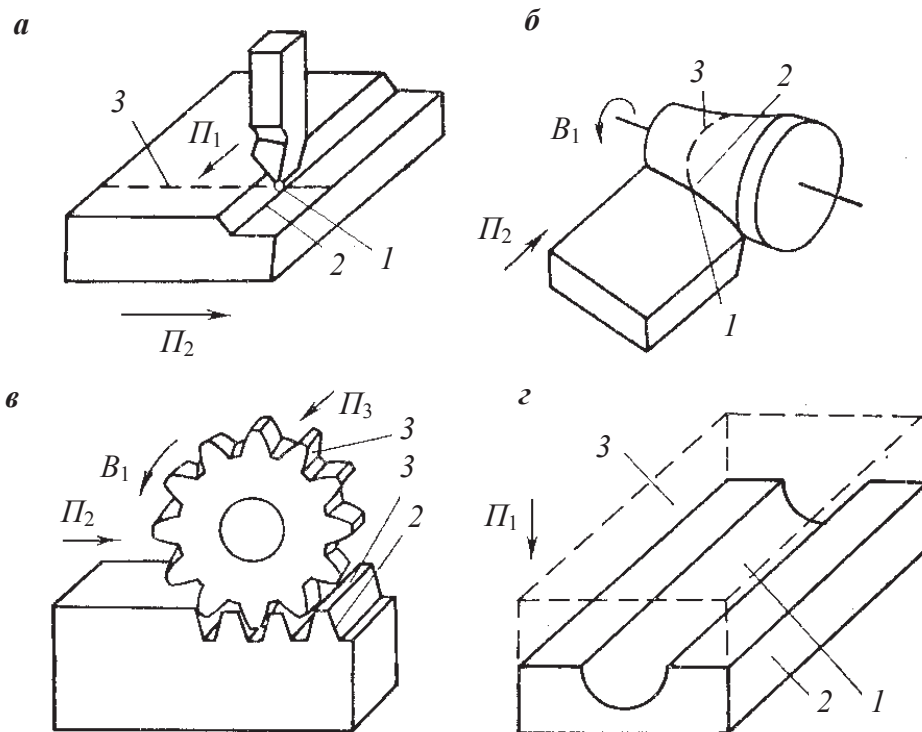


Рисунок 2.1. – Виды вспомогательных элементов, материализованные на рабочей части инструмента

Отметим, что в приведенной геометрической интерпретации образования реальной поверхности темп воспроизведения образующей выше темпа воспроизведения направляющей. Поэтому во всех последующих рассуждениях, когда речь будет идти о схемах образования поверхностей, первой будем указывать образующую, а затем – направляющую получаемой поверхности.

Различные инструменты (например, токарный резец) имеют один вспомогательный элемент, другие (например, фреза или многошариковая раскатка) – несколько расположенных последовательно вспомогательных элементов. Будем рассматривать вспомогательный элемент как множество материальных точек  $M_3$ . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – это вполне определенный класс  $P$  множеств  $M_3$ :

$$P = \{M_3\}_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k). \quad (2.1)$$

В работе [20] класс  $P$  назван характеристическим образом инструмента, так как именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования реальных поверхностей.

Характеристический образ резца содержит одно множество  $M_3$  материальных точек, мощность которого у острозаточенного резца (см. рисунок 2.1, а) равна единице (точка – вершина резца). При строгании широким резцом мощность множества  $M_3$  больше единицы и равна мощности ширины получаемой строки. Мощность множества  $M_3$  фасонного резца (рисунок 2.1, б) равна мощности образующей обрабатываемой поверхности. Характеристический образ зуборезного долбяка (рисунок 2.1, в) есть  $K$ -элементный класс равномошных множеств  $M_3$ . Характеристический образ штампа для объемной штамповки (рисунок 2.1, г) – декартово произведение

$$P_{шт} = \{M_{3о} \times M_{3н}\},$$

где  $M_{3о}$  и  $M_{3н}$  – однопараметрические множества, мощность которых равна соответственно мощности образующей и направляющей получаемой поверхности.

Понятие о характеристическом образе определено применительно к инструменту, посредством которого осуществляют воздействие на твердое тело. Однако в формообразующей обработке значительную группу составляют способы, в которых воздействие на твердое тело осуществляют посредством объекта, мало напоминающего инструмент в традиционном его представлении. Например, при дробеструйной обработке поверхност-

ным пластическим деформированием функцию инструмента выполняет струя дроби, а при лазерном сверлении отверстия – сфокусированный луч лазера с высокой плотностью энергии. Известны также способы формообразующей обработки, в которых вообще нет инструмента, а его функцию выполняет какой-либо физический эффект. В частности, в способе получения поверхностей с износостойким слоем (см. рисунок 1.2) функцию инструмента осуществляет поле центробежных сил. Покажем, что понятие о характеристическом образе распространяется и на такие способы формообразующей обработки. Для этого рассмотрим некоторые примеры.

При *дробеструйной обработке* какой-то поверхности на твердое тело воздействует поток дроби, обходя эту поверхность строчка за строчкой. Строчка является образующей, а ее воспроизведение осуществляется прерывисто. Переход с одной строки на другую равносителен прерывистому воспроизведению направляющей. Следовательно, характеристический образ потока дроби можно представить в виде  $K$ -элементного класса множеств  $M_3$ , мощность каждого из которых равна единице.

При *лазерном сверлении* отверстий сверхмалого диаметра (например, капиллярных) сфокусированный луч, прожигая твердое тело в течение какого-то времени, образует в нем заданное цилиндрическое отверстие. Окружность, ограничивающая сфокусированный луч, является характеристическим образом. Его отображение на обрабатываемой заготовке – одновременно воспроизведенная образующая. Перемещение образующей вдоль получаемой поверхности воспроизводит направляющую – прямую линию. Таким образом, характеристический образ лазерного луча есть множество  $M_3$ , мощность которого равна образующей получаемой поверхности.

При воспроизведении цилиндрических поверхностей с износостойким слоем поле центробежных сил, действуя на расплавленное вещество, напрессовывает его по всей поверхности заготовки одновременно. Процесс в какой-то мере формально напоминает объемную штамповку. Причем цилиндрическое отверстие заготовки играет роль матрицы, а центробежные силы выступают как пуансон. По получаемому эффекту поле центробежных сил зеркально отображается на образуемой поверхности. Следовательно, его можно рассматривать через понятие характеристического образа. Данное поле воспроизводит и образующую, и направляющую получаемой поверхности одновременно. Характеристический образ такого поля аналогичен характеристическому образу штампа для объемной штамповки.

В таблице 2.1 приведен ряд инструментов в традиционном понимании, а также ряд объектов, заменяющих инструмент, с указанием мощности их характеристических образов. В фигурных скобках дана мощность

отдельного вспомогательного элемента, индекс при скобках обозначает их количество. Для некоторых инструментов приведены не конкретные значения, а буквенные. Буква  $E$  обозначает, что мощность характеристического образа равна мощности воспроизводимой линии,  $M_3$  – мощность характеристического образа больше единицы, но меньше воспроизводимой линии,  $K$  – целое число, обозначающее количество вспомогательных элементов инструмента. Такая неопределенность объясняется тем, что есть инструменты, которые характеризуются большим разнообразием конструкций, например, зуборезные долбяки имеют различное число режущих зубьев, то есть вспомогательных элементов. Однако это не имеет существенного значения при качественном анализе  $S$ -систем.

Приведенные примеры, взятые из разных областей формообразующей обработки, позволяют утверждать, что понятие о характеристическом образе инструмента или объекта, заменяющего инструмент, является всеобщим, охватывающим все возможные способы обработки независимо от того, каким образом осуществляется воздействие на твердое тело. Принципиально наличие этого воздействия, необходимого для определения способа формообразующей обработки как  $S$ -системы.

Таблица 2.1. – Мощность характеристического образа  $P$  некоторых инструментов

Название инструмента	Мощность характеристического образа $P$	Название инструмента	Мощность характеристического образа $P$
Острозаточенный резец	$\{1\}_1$	Червячная фреза	$\{M_3\}_K$
Широкий резец	$\{M_3\}_1$	Деформирующий шарик	$\{M_3\}_1$
Фасонный резец	$\{E\}_1$	Шариковая раскатка	$\{M_3\}_K$
Зубострогальный резец	$\{M_3\}_1$	Штамп для объемной штамповки	$\{E \times E\}_1$
Круглый вращающийся резец	$\{M_3\}_1$	Луч лазера – сверло	$\{E\}_1$
Сверло	$\{1\}_2$	Поле центробежных сил	$\{E \times E\}_1$
Развертка, зенкер	$\{1\}_1$	Поток дроби	$\{1\}_K$
Модульная фреза	$\{E\}_K$	Магнитное формирующее поле	$\{E \times E\}_1$
Зуборезный долбяк	$\{M_3\}_K$		

## 2.2 Геометрические классы воспроизведения поверхностей

Рассмотрим образующую и направляющую как вполне определенные множества точек  $M_0$  и  $M_n$ . Тогда можно утверждать, что любая реальная поверхность в произвольный момент времени может быть представлена в виде произведения двух одномерных множеств, каждое из которых является однозначным отображением характеристического образа  $P$  инструмента в множества  $M_0$  и  $M_n$  при относительном перемещении характеристического образа по производящим линиям

$$f: P \rightarrow M_0; \quad f: P \rightarrow M_n.$$

В качестве способа, посредством которого каждому  $x \in P$  ставится в соответствие некоторый элемент из  $M_0$  и  $M_n$ , укажем операцию пересечения множеств  $M_0$  и  $M_n$  с характеристическим образом  $P$  [21].

Следовательно, чтобы рассмотреть конкретные классы образования реальных поверхностей во времени, достаточно проследить, как во времени образуются одномерные множества: образующая и направляющая линии.

Рассмотрим отображение характеристического образа  $P$  в множество  $M$  точек отрезка  $L$  плоской кривой, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки  $O$  на этой кривой как однопараметрическое семейство точек, зависящих от времени  $t$ .

В выражении (2.1)  $i = 1$ . Тогда характеристический образ содержит единственное множество

$$M_s = \{x\}.$$

Пусть характеристический образ  $P$  непрерывно скользит вдоль кривой  $L$ . Тогда единственному элементу  $x \in M_s$  при его отображении в  $M$  будет непрерывно и однозначно соответствовать образ  $f(x)$  в множестве  $M$ , фиксируясь на отрезке  $OL$  (рисунок 2.2) как возрастающая во времени последовательность

$$A_1 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.2)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при скольжении ( $H_{11}^c$ ).

Пусть характеристический образ  $P$  совершает сложное движение, например, вращается вокруг некоторой точки  $O_1$ , перемещающейся вдоль кривой  $L$  (рисунок 2.3). Тогда элемент  $x \in M_s$  будет отображаться в множество  $M$

через некоторые промежутки времени, определяемые круговой частотой вращения характеристического образа  $P$  относительно точки  $O_1$ . На отрезке  $OL$  будет фиксироваться возрастающая во времени последовательность

$$A_2 = \{f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.3)$$

Назовем такой вид образования производящей линии прерывистым ( $\Pi_{11}$ ).

$$M_3 = \{x\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n).$$

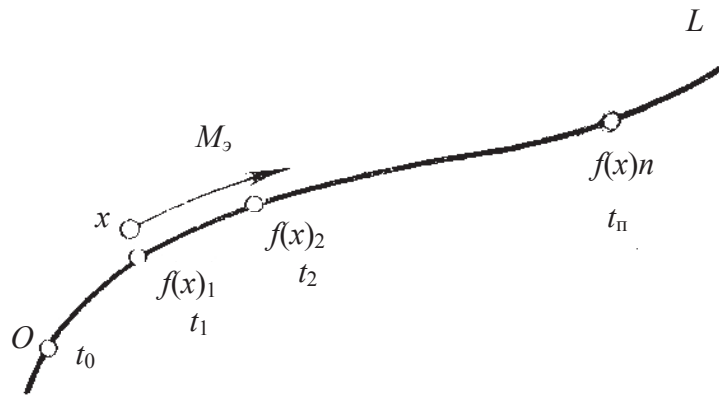


Рисунок 2.2. – Класс образования производящих линий вида  $H_{11}^c$

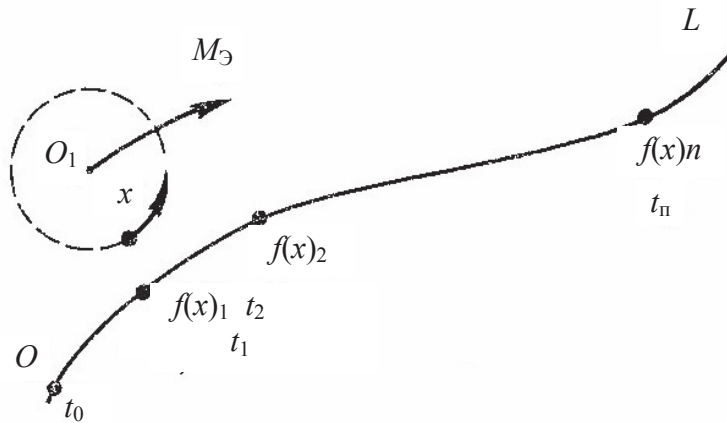


Рисунок 2.3. – Класс образования производящей линии вида  $\Pi_{11}$

Пусть характеристический образ  $P$  обкатывается по кривой  $L$  (рисунок 2.4). Тогда произвольному элементу  $x \in M_3$  при отображении в  $M$  будет однозначно соответствовать образ  $f(x)_j$  в множестве  $M$ .

На отрезке  $OL$  образы будут фиксироваться в виде возрастающей во времени последовательности

$$A_3 = \{f(x)_2, f(x)_3, \dots, f(x)_n\}. \quad (2.4)$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении ( $H_{1j}^k$ ).

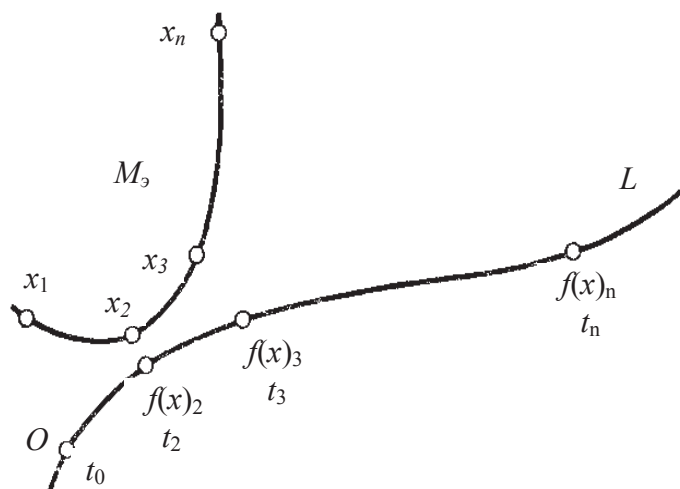


Рисунок 2.4. – Класс образования производящей линии вида  $H_{1j}^k$

При отображении характеристического образа  $P$  одновременно каждому  $x_j \in M_3$  ставится в соответствие  $f(x)_j \in M_3$ . Следовательно, на отрезке  $OL$  (рисунок 2.5) одновременно фиксируется множество

$$A_4 = \{f(x)\}_j, \quad (j = 2, 3, \dots, n). \quad (2.5)$$

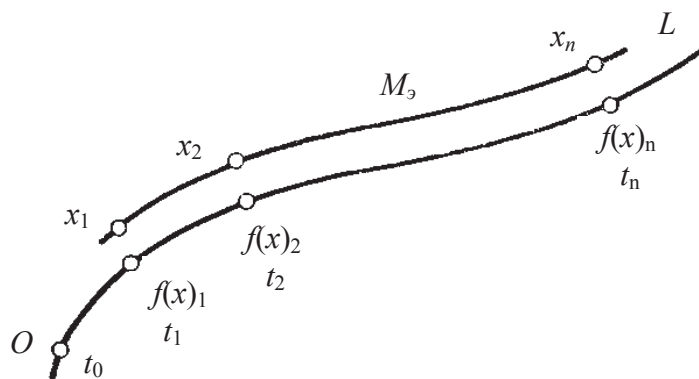


Рисунок 2.5. – Класс образования производящей линии вида  $E$

Таким образом, получим схему одновременного ( $E$ ) образования производящей линии. Характерная особенность данной схемы – зеркальное отображение характеристического образа на множестве  $M$ . Рассматривая линию как поверхность, у которой ширина бесконечно мала, можно воспользоваться также термином «покрытие», используемом в теории множеств.





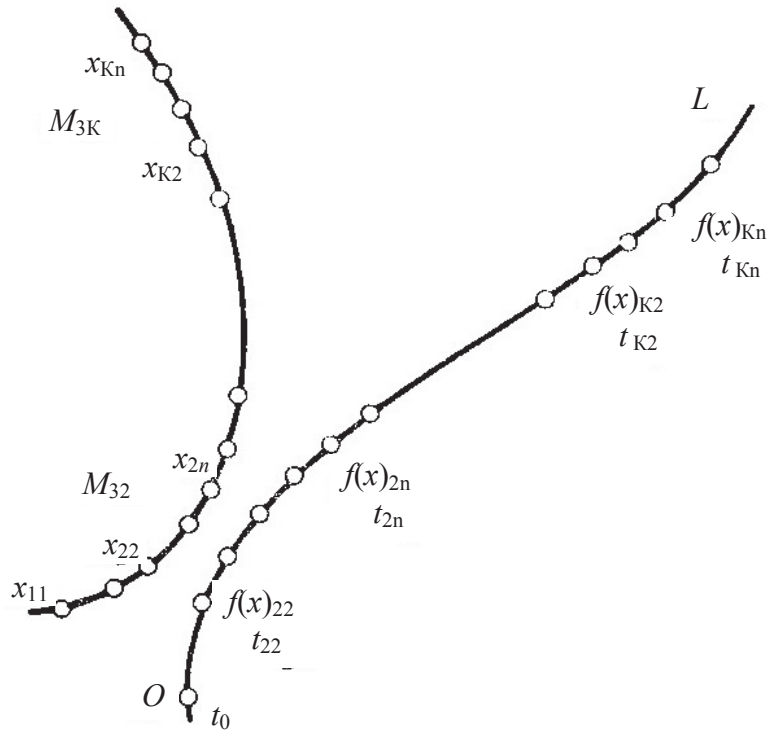


Рисунок 2.7. – Класс образования производящей линии вида  $H_{ij}^k$

Сравнивая схемы образования производящих линий  $H_{1j}^k$  и  $H_{ij}^k$ , отметим, что они имеют сходную физическую сущность, а индексы при  $H$  отражают структурную особенность характеристического образа  $P$ . Первый индекс обозначает количество вспомогательных элементов, а второй – мощность, то есть протяженность вспомогательного элемента. Следовательно, схемы  $H_{1j}^k$  и  $H_{ij}^k$  можно считать частными случаями класса  $H^k$ . То же можно отметить и для схем  $\Pi_{11}$  и  $\Pi_{i1}$ , объединяя их в класс  $\Pi$ .

При сравнении схем  $H_{11}^c$  и  $H_{ij}^k$  видно, что они имеют принципиально различную физическую природу, так как верхний индекс отражает функциональную особенность характеристического образа. Его особенность состоит в том, что в сравниваемых схемах движение характеристического образа принципиально различно. По первой схеме характеристический образ скользит вдоль воспроизводимой линии, а по второй – катится без скольжения.

Будем считать, исходя из условий образования реальных поверхностей, множества (2.2)–(2.7) равномошными, если они рассматриваются на отрезках  $OL$  одинаковой протяженности. Тогда в порядке возрастания теоретической производительности классы образования производящих линий располагаются следующим образом:  $\Pi$ ,  $H^c$ ,  $H^k$ ,  $E$ . Сочетая каждый из четырех классов возникновения образующей с каждым из тех же классов возникновения направляющей, получаем 16 теоретически возможных классов образования поверхностей в пространстве и времени. В порядке возрастания производительности они располагаются так:  $\Pi$ - $\Pi$ ,  $\Pi$ - $H^c$ ,  $\Pi$ - $H^k$ ,  $\Pi$ - $E$ ,  $H^c$ - $\Pi$ ,  $H^c$ - $H^c$ ,  $H^c$ - $H^k$ ,  $H^c$ - $E$ ,  $H^k$ - $\Pi$ ,  $H^k$ - $H^c$ ,  $H^k$ - $H^k$ ,  $H^k$ - $E$ ,  $E$ - $\Pi$ ,  $E$ - $H^c$ ,  $E$ - $H^k$ ,  $E$ - $E$ .

### 2.3 Осуществимость геометрических классов при образовании реальных поверхностей

Из полученных в предыдущем разделе классов образования поверхностей три из них практически неосуществимы. Действительно, в классах  $П-E$ ,  $H^c-E$ ,  $H^k-E$  направляющая производящая линия должна создаваться одновременно, то есть зеркальным отображением характеристического образа. Однако полученная таким образом производящая линия обычно играет роль образующей, так как имеет наиболее высокий темп воспроизведения. Направляющая производящая линия может быть создана зеркальным отображением характеристического образа в том случае, когда образующая производящая линия создается также зеркальным отображением, то есть данный случай соответствует классу  $E-E$  двойного зеркального отображения (покрытия) характеристического образа. Следовательно, в практике формообразующей обработки осуществимы лишь 13 из 16 теоретически возможных геометрических классов образования поверхностей.

На рисунке 2.8 приведены примеры, иллюстрирующие осуществимые классы геометрического образования реальных поверхностей. На рисунке 2.8 (а–в) показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится прерывисто ( $П$ ).

Так, при планетарном фрезоточении цилиндрической поверхности образующая окружность этой поверхности (рисунок 2.8, а) воспроизводится двумя движениями: вращением  $B_1$  заготовки вокруг собственной оси ее вращением  $B_2$  вокруг оси, параллельной оси заготовки. Направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, также воспроизводится прерывисто: вращением  $B_3$  резца и его перемещением  $П_4$ . Класс образования поверхности ( $П-П$ ).

При планетарном точении цилиндрической поверхности (рисунок 2.8, б) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится двумя вращениями  $B_1$  и  $B_2$ , а направляющая – скольжением  $П_3$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности ( $П-H^c$ ).

При шлифовании дисковым однониточным кругом с прямолинейным профилем цилиндрического прямозубого колеса (рисунок 2.8, в) образующая (прямая линия) воспроизводится вращением  $B_1$  шлифовального круга и его поступательным перемещением  $П_2$  вдоль образующей, а направляющая (эвольвента) – непрерывно при качении двумя согласованны-

ми движениями: вращением  $B_3$  заготовки и ее поступательным перемещением  $П_4$ . Класс образования поверхности  $П-H^k$ .

На рисунке 2.8 (д–ж) показаны классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при скольжении ( $H^c$ ).

Так, при строгании плоскости (рисунок 2.8, д) образующая – прямая линия – воспроизводится поступательным перемещением  $П_1$  резца, а направляющая – также прямая линия – периодическим перемещением  $П_2$  заготовки. Класс образования поверхности  $H^c-П$ .

При точении цилиндрической поверхности детали (рисунок 2.8, е) образующая – окружность – воспроизводится вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – непрерывно скольжением  $П_2$  резца вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности  $H^c-H^c$ .

При точении цилиндрической поверхности детали чашечным вращающимся резцом (рисунок 2.8, жс) образующая, как и в предыдущем примере, воспроизводится вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая – качением чашечного резца вдоль заготовки, осуществляемым его вращением  $B_2$  и поступательным перемещением  $П_3$ . Класс образования поверхности  $H^c-H^k$ .

На рисунке 2.8 (и–л) приведены примеры классов образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится непрерывно при качении ( $H^k$ ).

Так, при нарезании цилиндрического прямозубого колеса червячной фрезой (рисунок 2.8, и) образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, – воспроизводится качением (обкатом) из двух согласованных движений: вращения  $B_1$  фрезы и вращения  $B_2$  заготовки, а направляющая – прямая линия, параллельная оси заготовки, – вращением  $B_1$  фрезы и ее поступательным перемещением  $П_3$ . Класс образования поверхности  $H^k-П$ .

При зуботочении цилиндрического зубчатого колеса (рисунок 2.8, к) инструментом типа зуборезного долбяка образующая – линия, состоящая из упорядоченно расположенных дуг эвольвенты и окружности, воспроизводится, как в предыдущем примере, согласованными движениями: вращением  $B_1$  инструмента и вращением  $B_2$  заготовки, а направляющая – прямая линия – скольжением  $П_3$  инструмента вдоль оси заготовки. Класс образования поверхности  $H^k-H^c$ .

		Классы воспроизведения образующей			
		П	Н <sup>С</sup>	Н <sup>К</sup>	Е
Классы воспроизведения направляющей	П	а	д	и	н
	Н <sup>С</sup>	б	е	к	о
	Н <sup>К</sup>	в	ж	л	п
	Е	з <i>Неосуществим</i>	з <i>Неосуществим</i>	м <i>Неосуществим</i>	р

Рисунок 2.8. – Классы геометрического образования поверхностей

При обкатывании фасонной детали шариком (рисунок 2.8, л) образующая – окружность – воспроизводится качением шарика по этой окружности движением  $V_1$  заготовки и  $V_2$  шарика, а направляющая – кривая линия – качением шарика движениями  $V_3$  вращения шарика и  $P_4$  его перемещения

вдоль кривой, эквидистантной к направляющей. Класс образования поверхности  $H^c-H^c$ .

Последняя группа примеров (рисунок 2.8,  $n-p$ ) иллюстрирует классы образования поверхностей, когда образующая геометрическая линия воспроизводится одновременно ( $E$ ) как зеркальное отображение характеристического образа. Этой группе образования поверхностей воспроизведение образующей движений не требуется.

При фрезеровании плоскости цилиндрической фрезой (рисунок 2.8,  $n$ ) направляющая – прямая линия – воспроизводится прерывисто вращением  $B_1$  фрезы и поступательным перемещением  $\Pi_2$  заготовки. Класс образования поверхности  $E-\Pi$ .

При точении фасонным резцом (рисунок 2.8,  $o$ ) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при скольжении вращением  $B_1$  заготовки. Класс образования поверхности  $E-H^c$ .

При обкатывании полноконтактным роликом фасонной поверхности (рисунок 2.8,  $n$ ) направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при качении вращением  $B_1$  заготовки и вращением  $B_2$  ролика. Класс образования поверхности ( $E-H^c$ ).

При объемной штамповке (рисунок 2.8,  $p$ ) направляющая, как и образующая, воспроизводится одновременно ( $E$ ) как зеркальное отображение характеристического образа. Следовательно, для образования поверхности движений не требуется. Класс образования поверхности  $E-E$ . Отметим, что движение закрывания штампа не является формообразующим, оно только подготавливает формообразование. В станковедении такое движение называют движением врезания. В других отраслях знания это движение не имеет определенного названия.

## **2.4 Комбинированные подклассы образования реальных поверхностей**

Полученные геометрические классы образования производящих линий различаются количеством движений, производительностью, протяженностью контакта характеристического образа и заготовки, существенно влияющими на качественные и энергетические параметры технологических процессов. Указанными параметрами можно управлять, комбинируя классы  $\Pi$ ,  $H^c$ ,  $H^c$ ,  $E$  между собой.

Пусть при отображении характеристического образа  $P$  одновременно всем  $M_j \subset P$  соответствует в множестве  $M$  взаимно однозначно и непрерывно семейство образов

$$A = \{f(M)_1, f(M)_2, \dots, f(M)_k\}. \quad (2.8)$$

Рассмотрим возможные варианты.

Образ  $f(M)_i$  семейства (2.8) возникает во времени непрерывно как возрастающая последовательность составляющих его  $f(x)_{ij}$ . В этом случае получим одновременно непрерывный  $E^*H$  подкласс образования производящей линии. Здесь и далее символ «\*» обозначает комбинированный подкласс воспроизведения производящей линии.

Образ  $f(M)_i$  семейства (2.8) возникает прерывисто во времени как последовательность составляющих его  $f(x)_{ij}$ . В этом случае подкласс образования производящей линии будет одновременно прерывистым  $E^*П$ .

Подклассы  $E^*H$  и  $E^*П$  получены из исходного класса  $E$  посредством разбиения характеристического образа  $P$  на непересекающиеся множества  $M_j$ , каждое из которых отображается в множество  $M$  непрерывно ( $H$ ) или прерывисто ( $П$ ).

Приведенное комбинирование классов в реальных процессах формообразующей обработки позволяет управлять мгновенной протяженностью линии контакта инструмента и заготовки, что существенно улучшает течение технологического процесса. Назовем такое комбинирование управляющим ( $K_y$ ).

При  $K_y$  необходимое количество движений для возникновения производящей линии увеличивается до суммы движений комбинируемых классов.

Возможно обратное комбинирование от классов  $H$  и  $П$  к классу  $E$ . Пусть в классах  $H$  и  $П$  мгновенное значение  $M_j \cap M$  состоит из конечного значения точек, то есть является линейчатым. Тогда производящая линия будет возникать во времени в виде последовательного фиксирования объединения

$$A_j = \bigcup_{2 \leq x \leq n} f(x).$$

Таким образом, получим два других комбинированных подкласса: непрерывно единовременный  $H^*E$  и прерывисто единовременный  $П^*E$ . Эти подклассы характеризуются более высокой производительностью, чем исходные классы  $H$  и  $П$ . Назовем полученное комбинирование повышающим ( $K_n$ ). При  $K_n$  количество движений при возникновении производящей линии сохраняется равным количеству движений исходного класса.

Сочетая комбинированные подклассы возникновения производящих линий между собой и с основными геометрическими классами, получим все многообразие теоретически возможных подклассов образования поверхностей при формообразующей обработке.

В таблице 2.2 приведены результаты, упорядоченные по производительности исходных классов образования поверхностей, а также количество движений формообразования для исходных классов и соответствующих им подклассов.

Таблица 2.2. – Классы и подклассы образование реальных поверхностей

Исходные классы	Количество движений	Комбинирование	Комбинированные подклассы	Количество движений
1	2	3	4	5
$P-P$	2 + 2	${}^0K_P$	$P^*E-P$	2 + 2
		${}^H K_P$	$P-P^*E$	2 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$P^*E-P^*E$	2 + 2
$P-H^C$	2 + 1	${}^0K_P$	$P^*E-H^C$	2 + 1
		${}^0K_P$	$P-H^C^*E$	2 + 1
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$P^*E-H^C^*E$	2 + 1
$P-H^K$	2 + 2	${}^0K_P$	$P^*E-H^K$	2 + 2
		${}^H K_P$	$P-H^K^*E$	2 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$P^*E-H^K^*E$	2 + 2
$H^C-P$	1 + 2	${}^0K_P$	$H^C^*E-P$	1 + 2
		${}^H K_P$	$H^C-P^*E$	1 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^C^*E-P^*E$	1 + 2
$H^C-H^C$	1 + 1	$K_P$	$H^C^*E-H^C$	1 + 1
		$K_P$	$H^C-H^C^*E$	1 + 1
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^C^*E-H^C^*E$	1 + 1
$H^C-H^K$	1 + 2	${}^0K_P$	$H^C^*E-H^K$	1 + 2
		${}^H K_P$	$H^C-H^K^*E$	1 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^C^*E-H^K^*E$	1 + 2
$H^K-P$	2 + 2	${}^0K_P$	$H^K^*E-P$	2 + 2
		${}^H K_P$	$H^K-P^*E$	2 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^K^*E-P^*E$	2 + 2
$H^K-H^C$	2 + 1	${}^0K_P$	$H^K^*E-H^C$	2 + 1
		${}^H K_P$	$H^K-H^C^*E$	2 + 1
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^K^*E-H^C^*E$	2 + 1
$H^K-H^K$	2 + 2	${}^0K_P$	$H^K^*E-H^K$	2 + 2
		${}^H K_P$	$H^K-H^K^*E$	2 + 2
		${}^0K_P + {}^H K_P$	$H^K^*E-H^K^*E$	2 + 2



Окончание таблицы 2.2

1	2	3	4	5
$E-\Pi$	0 + 2	${}^0K_y$ ${}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$	$E^*\Pi-\Pi$ $E-\Pi^*E$ $E^*\Pi-\Pi^*E$ $E^*H^c-\Pi$ $E^*H^c-\Pi^*E$ $E^*H^k-\Pi$ $E^*H^k-\Pi^*E$	2 + 2 0 + 2 2 + 2 1 + 2 1 + 2 2 + 2 2 + 2
$E-H^c$	0 + 1	${}^0K_y$ ${}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$	$E^*\Pi-H^c$ $E-H^c^*E$ $E^*\Pi-H^c^*E$ $E^*H^c-H^c$ $E^*H^c-H^c^*E$ $E^*H^k-H^c$ $E^*H^k-H^c^*E$	2 + 1 0 + 1 2 + 1 1 + 1 1 + 1 2 + 1 2 + 1
$E-H^k$	0 + 2	${}^0K_y$ ${}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$ ${}^0K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_{\Pi}$	$E^*\Pi-H^k$ $E-H^k^*E$ $E^*\Pi-H^k^*E$ $E^*H^c-H^k$ $E^*H^c-H^k^*E$ $E^*H^k-H^k$ $E^*H^k-H^k^*E$	2 + 2 0 + 2 2 + 2 1 + 2 1 + 2 2 + 2 2 + 2
$E-E$	0 + 0	${}^0K_y$ ${}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y$ ${}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y$ ${}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$ ${}^0K_y + {}^H K_y$	$E^*\Pi-E$ $E-E^*\Pi$ $E^*\Pi-E^*\Pi$ $E^*H^c-E$ $E-E^*H^c$ $E^*H^c-E^*H^c$ $E^*\Pi-E^*H^c$ $E^*H^c-E^*\Pi$ $E^*H^k-E$ $E-E^*H^k$ $E^*H^k-E^*H^k$ $E^*\Pi-E^*H^k$ $E^*H^k-E^*\Pi$ $E^*H^c-E^*H^k$ $E^*H^k-E^*H^c$	2 + 0 0 + 2 2 + 2 1 + 0 0 + 1 1 + 1 2 + 1 1 + 2 2 + 0 0 + 2 2 + 2 2 + 2 2 + 2 1 + 2 2 + 1

Верхние индексы « $O$ » и « $H$ » у вида комбинирования  $K_y$  и  $K_{\Pi}$  обозначают, что в соответствующем подклассе воспроизведения поверхности комбинированием получают образующую или направляющую.

Рассмотрим примеры комбинированных подклассов формообразования поверхности.

При точении широким резцом цилиндрической поверхности (рисунок 2.9) характеристический образ  $1$  инструмента состоит из одного множества материальных точек  $M_3$ , мощность которого соответствует части направляющей  $2$  получаемой поверхности. Образующая  $3$  – окружность получаемой цилиндрической поверхности – воспроизводится непрерывно вращением  $B_1$  заготовки, а направляющая  $2$  – непрерывно одновременно поступательным движением  $\Pi_2$  характеристического образа вдоль направляющей. Подкласс воспроизведения поверхности ( $H^c-H^c * E$ ). Приведенная схема получена из исходного класса ( $H^c-H^c$ ) посредством изменения характеристического образа без изменения конструкции инструмента. Причем количество формообразующих движений осталось прежним. Однако темп воспроизведения направляющей может быть существенно выше.

На рисунке 2.10 показана схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием цилиндрической поверхности, согласно которому инструмент выполнен в форме пружины. Характеристический образ инструмента представляет собой множество, мощность которого значительно выше мощности направляющей образуемой поверхности – прямой линии, параллельной оси заготовки и равной длине этой поверхности. Причем инструмент сделан таким образом, что его характеристический образ пересекается с воспроизводящими линиями одновременно в нескольких точках, равнорасположенных вдоль направляющей.

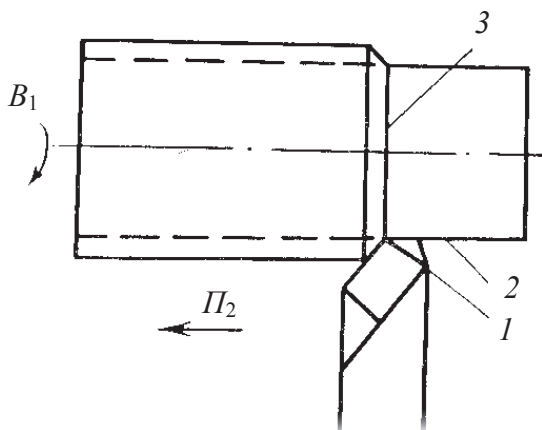


Рисунок 2.9. – Комбинированный подкласс  $H^c-H^c * E$  образования поверхности посредством  $K_{\Pi}$

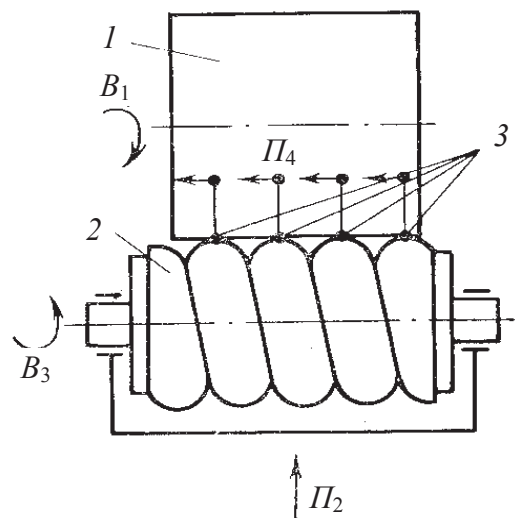


Рисунок 2.10. – Комбинированный подкласс  $E * H^c-H^c$  образования поверхности посредством  $K_{\gamma}$

При обработке заготовке  $I$  сообщают движение  $B_1$ , а инструмент  $2$  подводят установочным движением  $\Pi_2$  к ней. Вследствие силового контакта между заготовкой и инструментом он получает вращательное движение  $B_3$  обкатки, а характеристический образ отдельными последовательными участками непрерывно в перемещающихся точках контакта  $3$  пересекается с воспроизводящими линиями. Таким образом, при рассматриваемом способе обработки образующая воспроизводится одновременно по всей длине, но каждый ее отдельный участок между равнорасположенными точками  $3$  воспроизводится непрерывно при скольжении, то есть подкласс образования образующей есть  $E^*H^k$ . Направляющая – окружность – воспроизводится непрерывно при качении ( $H^k$ ). Следовательно, класс образования поверхности  $E^*H^c-H^k$ .

Исходный одновременный класс воспроизведения образующей не требует движения формообразования для получения этой линии. Управляющее комбинирование данного класса и получение одновременно непрерывного подкласса снижают усилие механического воздействия при достижении того же эффекта, но одновременно требуют введения дополнительного формообразующего движения  $\Pi_4$ . В рассматриваемом случае такое движение получено за счет взаимодействия заготовки и инструмента.

## **2.5 Влияние характеристического образа инструмента на формирование поверхности**

Анализ технической литературы показывает, что наиболее изучено влияние инструмента, точнее его характеристического образа, на формирование поверхности при обработке резанием. Профиль получаемой поверхности при этом виде обработки имеет регулярно повторяющиеся выступы и впадины, с той или иной точностью копирующие форму режущей кромки инструмента. Высота и форма обработанной поверхности зависят от многих факторов.

Микрогеометрия поверхности может рассматриваться в двух сечениях. Одно принимается в направлении воспроизведения образующей, то есть в направлении скорости резания. Другое – в направлении воспроизведения направляющей, то есть в направлении подачи. В большинстве случаев микронеровности в направлении подачи больше. Поэтому по ним и характеризуется микрогеометрия получаемой поверхности. Зависимость высоты микронеровностей для различных схем их образования при вспомогательном элементе в виде точки (вершина резца или зуба торце-

вой фрезы), исходя только из геометрических соображений, может быть выражена уравнениями, приведенными в таблице 2.3 [22].

Таблица 2.3. – Уравнения для расчета высоты остаточных микронеровностей

$\varphi_1$	$\varphi < \arcsin S/2R$	$\varphi > \arcsin S/2R$
$< \arcsin S/2R$	$R_z = \frac{\sin \varphi \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \left[ S - R \left( \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right]$	$R_z = R(1 - \cos \varphi_1) + S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 - \sin \varphi \sqrt{S \sin \varphi_1 (2R - S \sin \varphi_1)}$
$< \arcsin S/2R$	$R_z = R(1 - \cos \varphi) + S \sin \varphi \cos \varphi - \sin \varphi \sqrt{S \sin \varphi (2R - S \sin \varphi)}$	$R_z = R - \frac{\sqrt{4R^2 - S^2}}{2}$

В ряде случаев фактическая высота микронеровностей существенно отличается от расчетной. Это связано с приращением высоты неровностей в результате пластического течения металла в направлении вершины остаточного гребешка и приращением, вызванным упругим восстановлением поверхностного слоя, и с приращением, вызванным трением задней поверхности инструмента о поверхность среза. Поэтому приведенные в таблице 2.3 уравнения можно использовать для приближенных расчетов, например, при сравнительном анализе различных способов обработки.

При выполнении вспомогательного элемента в виде линии по форме и протяженности, совпадающей с формой и протяженностью воспроизводимой линии и мощностью характеристического образа инструмента  $\{E\}_1$  или  $\{M_3\}_1$ , теоретически высота микронеровностей обработанной поверхности копируется в виде зеркального отображения высоты микронеровностей вспомогательного элемента. Наблюдающееся на практике приращение высоты микронеровностей связано с теми же факторами, что и в предыдущем примере, а также с жесткостью обрабатываемой системы «станок – приспособление – инструмент – деталь». В случае мощности характеристиче-

ского образа  $\{E\}_k$  или  $\{M_3\}_k$  расчетная высота остаточных микронеровностей может быть рассчитана по уравнению:

$$R_z = \frac{S_z^2 \pi^2 R}{2(ZS_z \pm 2\pi R)^2}, \quad (2.9)$$

где  $R$  и  $Z$  – соответственно радиус и число вспомогательных элементов (зубьев инструмента);  $S_z$  – подача на зуб; знак «+» соответствует встречному, знак «-» попутному перемещению вспомогательного элемента.

При некотором снижении точности расчета уравнение (2.9) можно упростить, исключив из знаменателя величину  $ZS_z$ , которая мала по сравнению с величиной  $2\pi R$ . Тогда

$$R_z = S_z^2 / 8R. \quad (2.10)$$

Для обкатных зубообрабатывающих инструментов, у которых вспомогательные элементы выполнены в виде отрезков эвольвенты, несовпадающей по форме и протяженности с воспроизводимой линией, высота микрогребешков приблизительно может быть определена по уравнению [23]:

$$R_z = \frac{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha S_k^2 \sqrt{(Z_1 + 2)^2 \cos^2 \alpha}}{4mZ_1^2 (Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (2.11)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка;  $m$  – модуль;  $\alpha$  – угол профиля исходного контура.

При использовании обкатных инструментов с телами качения (роликами и шариками), у которых вспомогательный элемент также не совпадает с образуемой поверхностью, высота микронеровностей находится или по уравнениям, приведенным в таблице 2.3, или по уравнению (2.10).

Геометрический образ инструмента вида  $\{E \times E\}$ , исходя из геометрических соображений, зеркально отображает микрогеометрию вспомогательного элемента на воспроизводимую поверхность. Однако реально получаемая микрогеометрия существенно отличается от микрогеометрии характеристического образа. Это объясняется особенностями того или иного вида обработки, конструктивным исполнением вспомогательного элемента, видом используемой энергии и динамической характеристикой технологической машины. Для некоторых относительно новых видов инструментов (например, луча лазера или иного потока энергии и т.п.) понятие микрогеометрии вспомогательного элемента, по-видимому, не имеет смысла в традиционном представлении. Для таких инструментов нужны иные критерии при оценке их влияния на микрогеометрию получаемой поверхности.

## 3 МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО ОПИСНИЯ СПОСОБОВ ФОРМОБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

### 3.1 Постановка задачи

В основе любой теоретической концепции лежит модель изучаемой действительности, наделенная структурой, некоторым числом свойств и функцией. Главная функция модели – быть представлением исследуемого объекта и средством получения о нем теоретической информации.

Следовательно, описать способ формообразующей обработки, то есть *S*-систему, значит построить ее модель, отображающую структуру, определенную группу свойств и функцию этой системы. Будем называть такое описание системным. Системное описание должно давать представление о строении *S*-систем. Уровень детализации, то есть выбор структурных элементов, внутрь которых описание не проникает, определяется назначением описания. Системное описание *S*-систем должно быть иерархично. Первый уровень описания *S*-систем, как было показано выше, характеризуется их разбиением на четыре взаимосвязанные общей первообразной целью подсистемы: кинематическую, базирующую, энергетическую и стабилизации силового параметра. Дальнейшая конкретизация структуры должна даваться на стольких уровнях, сколько их требуется для полного представления об основных свойствах системы. Естественно, последним уровнем описания будет тот, после которого в пределах единого подхода к различным способам формообразующей обработки дальнейшее разбиение невозможно.

Существенным признаком структуры является назначение (свойство) элементов. Преобразование вещества твердого тела в *S*-системах может быть механическим, физическим, химическим или смешанным, объединяющим первые три в различных сочетаниях. Этот процесс требует энергии определенного вида, а ее передача невозможна без информации. Отсюда – энергетические, информационные или вещественные свойства элементов *S*-системы.

Структурные свойства зависят от характера связей. Выделим энергетические, информационные и вещественные связи, определив их в том же смысле, что и соответствующие им свойства. Энергетические связи предназначены для переноса энергии, а информационные – для переноса информации. Вещественные связи переносят вещество твердого тела, но одновременно энергию и информацию, поэтому характер связи определяется удельным весом соответствующего компонента.

Связь между элементами  $S$ -системы зависит от природы воздействия на твердое тело. Для подтверждения этого рассмотрим три способа формообразующей обработки, основанные соответственно на удалении части материала заготовки, прибавлении части материала к заготовке и на перераспределении части материала заготовки.

Классический способ нарезания резьбы резцом (рисунок 3.1) характеризуется тем, что заготовке  $I$ , определенным образом ориентированной

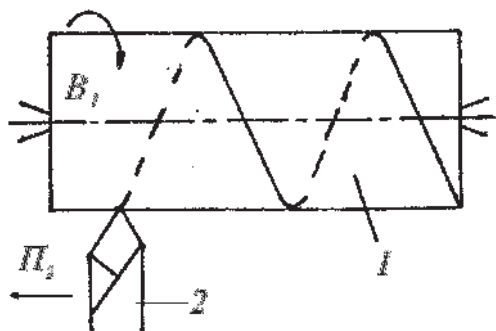


Рисунок 3.1. – Способ нарезания резьбы фасонным резцом

в пространстве, сообщают вращательное движение  $V_1$ , согласованное с поступательным движением  $P_2$  резца 2, профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы. Таким образом, резьбовая поверхность воспроизводится одним сложным исполнительным движением  $V_1P_2$ , состоящим из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного  $V_1$  и поступательного  $P_2$ .

Приведенный способ нарезания резьбы есть  $S$ -система. На первом уровне описания в соответствии с изложенным в разделе 1 будем рассматривать ее как объединение трех подсистем: кинематической, базирующей и энергетической, каждая из которых наделена конкретной функцией. Функция кинематической подсистемы – обеспечение таких условий механического воздействия, при которых резец удаляет вещество твердого тела по винтовой линии; функция базирующей подсистемы – обеспечение определенности и повторяемости механического воздействия по винтовой линии; функция энергетической подсистемы – механическое воздействие на твердое тело (заготовку) посредством резца. Заметим, что функция каждой из подсистем одновременно определяет ее назначение (свойство). При функционировании анализируемой  $S$ -системы энергия механического воздействия подводится через кинематическую подсистему, а количество вещества, удаляемого в единицу времени, определяет потребление энергии во времени. Кинематическая подсистема несет также информацию о траектории исполнительного движения, то есть осуществляет обмен информацией между взаимодействующими объектами – заготовкой и инструментом. Эта информация определяет форму направляющей получаемой винтовой поверхности.

Таким образом, можно утверждать, что энергетическая и кинематическая подсистемы пересекаются. Причем пересечение понимается в том

смысле, в каком оно определено в теории множеств. Связь между подсистемами носит преимущественно вещественно-энергетический характер. Отметим, что кинематический обмен информацией между объектами кинематической подсистемы, то есть на уровне разбиения кинематической подсистемы, требует некоторой энергии, которая является энергией функционирования данной подсистемы и, следовательно, для воздействия на твердое тело не используется. В станковедении такая энергия называется энергией холостого хода. Количественно она зависит только от длины кинематических цепей, то есть от количества кинематических передач между исполнительными органами технологической машины.

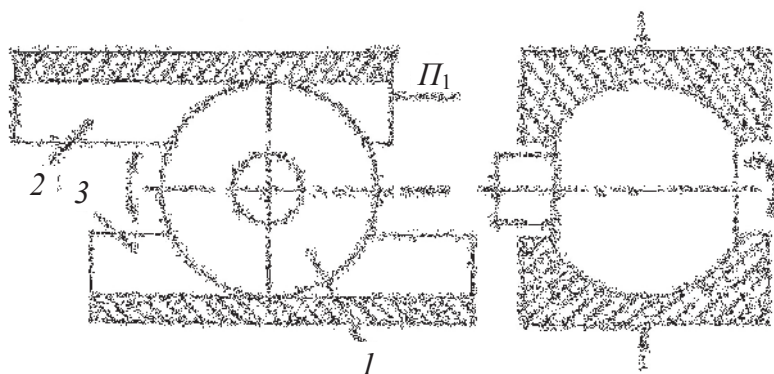
Рассмотренный в разделе 1 способ получения внутренних цилиндрических поверхностей с износостойким поверхностным слоем (см. рисунок 1.2) основан на добавлении вещества к заготовке. В такой  $S$ -системе на добавляемое вещество воздействуют последовательно-параллельно энергией токов высокой частоты, расплавляющей вещество, и механической энергией, припекающей его к заготовке. Каждое из воздействий осуществляется отдельной подсистемой, входящей в энергетическую подсистему  $S$ -системы. Механическая составляющая энергетической подсистемы, как и в предыдущем примере, пересекается с кинематической подсистемой. Связь между ними носит также вещественно-энергетический характер. Связь между составляющими энергетической подсистемы на начальном этапе воздействия носит информационный характер (подвод механического воздействия только после разогрева вещества в течение определенного времени токами высокой частоты), а затем – неопределенный нейтральный характер. Такой же характер связи отмечается между составляющей токов высокой частоты и кинематической подсистемой.

С целью повышения качественных характеристик результата функционирования рассматриваемой  $S$ -системы нейтральная связь между составляющими может быть целенаправленно изменена. Например, обеспечив слежение за расплавлением прибавляемого вещества и его температурой в течение цикла обработки, можно соответствующим образом управлять механической составляющей. Вероятно, в этом состоит сущность одного из путей поиска новых  $S$ -систем, качественно отличающихся от своих прототипов.

Приведенные примеры – типичные представители  $S$ -систем, основанных на удалении или прибавлении вещества к заготовке. Поэтому характер связи между их составляющими, очевидно, будет таким же и для других  $S$ -систем, входящих в эти две группы способов формообразующей обработки.



Рассмотрим пример  $S$ -системы, основанной на формоизменении вещества твердого тела. Обкатку сферической поверхности заготовки  $1$  осуществляют механическим воздействием (рисунок 3.2) посредством плашек  $2$  и  $3$ , профиль которых соответствует образующей обрабатываемой поверхности. Причем плашка  $3$  неподвижна, а плашка  $2$  получает движение  $\Pi_1$ . Фрикционный контакт между сферой и плашками обеспечивает вращение заготовки и ее обработку. В данной  $S$ -системе связь между энергетической и кинематической подсистемами носит преимущественно энергетический характер. Особенность рассматриваемого способа состоит в том, что заготовка входит в кинематическую подсистему в качестве ее конечного элемента, а определенность базирования обеспечивается характеристическим образом инструмента – обкатными плашками. Отсюда следует информационный характер связи между кинематической и базирующей подсистемами. Последний вид связи характерен для  $S$ -систем, в которых функция базирования перенесена на инструмент.



**Рисунок 3.2. – Способ полноконтактной обкатки сферической поверхности**

Рассмотренные связи предназначены для переноса или изменения состояния вещества твердого тела, энергии и информации в соответствии с последовательностью выполняемых функций. Они определяют количественную сторону функционирования  $S$ -систем. Будем называть такие связи прямыми. Возможны и обратные связи, которые предполагают некоторое преобразование параметра, поступающего по прямой связи, и передачу результата обратно, то есть в направлении, противоположном функциональной последовательности к одному из предыдущих элементов системы. Обратные связи характерны для самоподнастраивающихся  $S$ -систем. Эти связи носят преимущественно информационный характер и имеют функцию управления качеством формообразования.

Особую группу составляют  $S$ -системы адаптивные или синергетические, обеспечивающие стабилизацию силового воздействия на обрабатываемую заготовку. Такие  $S$ -системы образуют, дополняя традиционные способы формообразующей обработки, подсистемы стабилизации силового воздействия. Соответствующий пример преобразования традиционного способа токарной обработки (см. рисунок 1.5) в способ со стабилизацией силы резания рассмотрен в разделе 1. Функция подсистемы стабилизации силы резания – преобразование силового воздействия в информацию, сообщаемую в кинематическую подсистему. Отсюда информационный характер связи подсистемы стабилизации силового параметра с кинематической подсистемой.

Способы формообразующей обработки ( $S$ -системы) как объекты техники имеют жесткую организацию. Качественная определенность их обусловлена структурой и функцией.

Таким образом, на основании изложенного можно утверждать, что системное описание любой  $S$ -системы есть множество

$$S_s = \{\{Q_i\}, \{V_i\}, \{F_i\}\},$$

где  $S_s$  – системное описание  $S$ -системы (способа формообразующей обработки);  $\{Q_i\}$  – конечное множество элементов и их свойств;  $\{V_i\}$  и  $\{F_i\}$  – соответственно конечное множество связей и функций.

Системное описание строится по многоуровневому принципу путем последовательной декомпозиции подсистем. В общем случае системное описание любой  $S$ -системы, не содержащей подсистемы стабилизации силового параметра на первом уровне, представляет собой объединение трех подсистем:

$${}_1S_s = {}^kM U {}^bM U {}^eM,$$

где  ${}^kM$ ,  ${}^bM$ ,  ${}^eM$  – соответственно кинематическая, базирующая и энергетическая подсистемы.

Системное описание  $S$ -системы, содержащей подсистему стабилизации силового параметра, – это объединение четырех подсистем:

$${}_1S_s = {}^kM U {}^bM U {}^eM U {}^cM,$$

где  ${}^cM$  – подсистема стабилизации силового параметра.

Далее будут изложены основные принципы системного описания кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей сило-

вой параметр подсистем. В методическом плане эти принципы могут быть изложены как на вербальном языке, так и посредством абстрактных математических кодов. Однако следует отметить, что переход с обычного вербального языка при описании системных объектов на язык математических абстракций упрощает логику суждений, уменьшает роль эмпирики и на этой основе позволяет увеличить информационную емкость модели исследуемого объекта. Поэтому в качестве языка изложения выбран язык теории множеств.

### **3.2 Методика системного описания кинематической подсистемы**

Среди известных  $S$ -систем – способов формообразующей обработки – значительную группу составляют такие, для осуществления которых требуются только формообразующие ( $\Phi$ ) движения, предназначенные для перемещения характеристического образа по воспроизводящим линиям. Однако известны также  $S$ -системы, целесообразное функционирование которых невозможно без осуществления дополнительных движений, непосредственно подготавливающих формообразующие перемещения характеристического образа. К дополнительным относятся движения деления ( $D$ ), врезания ( $Bp$ ) и вспомогательные движения ( $Bc$ ) – позиционирование ( $Пз$ ), транспортирование ( $Тр$ ), отвода инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом обратном ходе.

Формообразующие движения могут быть элементарными (вращательными и поступательными), составными и сложными. Элементарные формообразующие движения соответствуют преимущественно классу  $H^c$  образования производящих линий. Например, при зубодолблении (см. рисунок 1.1) движение  $П_1$ , при точении цилиндрической поверхности (см. рисунок 2.9) движения  $B_1$  и  $П_2$ . Составные формообразующие движения соответствуют классу  $П$  образования производящих линий и состоят из двух функционально несвязанных элементарных движений. Например, при зубофрезеровании червячной фрезой (см. рисунок 2.8,  $u$ ) направляющая (линия зуба) нарезаемого зубчатого колеса воспроизводится составным движением  $B_1*П_3$ . Символ «\*» в составном движении обозначает обязательную одновременность (параллельность) выполнения составляющих его элементарных движений. Составными движениями воспроизводятся элементарные образующая и направляющая – прямая линия и дуга окружности. Сложные движе-

ния состоят из двух и более функционально связанных между собой элементарных движений. Например, соответствующее классу  $H^k$  движение обката  $B_2B_3$ , воспроизводящее направляющую (профиль зубчатого колеса) при зубодолблении (см. рисунок 1.1) или соответствующее классу  $H^c$  винтовое движение  $B_1P_2$  при нарезании резьбы фасонным резцом (см. рисунок 3.1). Отсутствие символа в сложном движении по аналогии с принятым в станковедении обозначением сложного движения обозначает функциональную связь между образующими его элементарными движениями. Сложными движениями воспроизводятся также образующая и направляющая произвольной формы как плоские, так и пространственные.

Движение деления предназначено для перемещения в новое геометрическое положение траектории движения формообразования с целью его многократного повторения при образовании сложнопрофильных поверхностей. Например, после шлифования очередной впадины зубчатого колеса дисковым односторонним кругом (см. рисунок 2.8, *в*) движением деления  $B_5$  переносят траекторию движения круга в следующую впадину зубчатого колеса. В некоторых способах обработки, например при зубодолблении колес долбяком, поступательно-возвратное движение долбяка при поступательном движении, то есть при резании, является формообразующим, а при возвратном (холостом) ходе – движением деления.

Движение врезания служит для перемещения инструмента в зону формообразования. Оно обычно предшествует движению формообразования. Например, при точении фасонным резцом (см. рисунок 2.8, *о*) этап срезания припуска до совпадения лезвия резца с образующей получаемой поверхности выполняется движением  $P_2$  врезания. Таким же по функциональному назначению движением  $P_2$  осуществляется подвод полноконтактного ролика к обкатываемой поверхности (см. рисунок 2.8, *н*) и движением  $P_1$  при закрытии штампа при объемной штамповке (см. рисунок 2.8, *р*).

Вспомогательные движения позиционирования и транспортирования характерны для способов обработки по роторной схеме. Ниже, при системном анализе многообразия способов зубодолбления такая схема будет рассмотрена.

Движение отвода (отскока) инструмента от заготовки (или наоборот) при холостом обратном ходе используется при механическом резании и предназначено для устранения обратного резания или затиранья инструмента о заготовку. Практически все известные способы строгания и долбления осуществляются с использованием этого движения, выполняемого после каждого рабочего хода, то есть на холостом ходу.

Будем называть рассмотренные формообразующие и вспомогательные движения и перемещения характеристического образа исполнительными движениями. Для их выполнения любая  $S$ -система должна обладать вполне определенной структурой (механикой), обеспечивающей взаимодействующие объекты информацией о закономерностях этих перемещений. Такая структура является основой кинематической подсистемы. Будем рассматривать кинематическую подсистему в виде объединения структур отдельных формообразующих и вспомогательных движений

$${}^{\kappa}M = \bigcup_{i=1}^n {}^{\kappa}M_i,$$

где  ${}^{\kappa}M_i$  – структура отдельного движения;  $n$  – количество отдельных движений.

Тогда функция кинематической подсистемы есть объединение функций структур отдельных движений

$${}^{\kappa}F = \bigcup_{i=1}^n {}^{\kappa}F_i,$$

где  ${}^{\kappa}F$  – функция кинематической подсистемы;  ${}^{\kappa}F_i$  – функция структуры отдельного движения.

Функцию кинематической подсистемы представим как множество параметров

$${}^{\kappa}F = \{P, \Theta, \{\Phi_i\}, \{G_j\}\}.$$

Здесь  $P$  и  $\Theta$  – соответственно характеристический образ и класс образования поверхности;  $\{\Phi_i\}$  – конечное множество формообразующих и вспомогательных движений;  $\{G_j\}$  – конечное множество отношений между формообразующими и вспомогательными движениями.

Передача информации о закономерностях перемещений невозможна без энергии. Причем она не используется для воздействия на твердое тело, а предназначена только для переноса кинематической информации. Следовательно, структуру отдельного движения можно рассматривать как объединение информационного и энергетического комплексов

$${}^{\kappa}M_i = J_i \cup E_i,$$

где  $J_i$  – информационный комплекс;  $E_i$  – энергетический комплекс.

Функцию структуры отдельного движения представим как множество параметров

$${}^k F_i = \{\Theta_L, \Phi, g\},$$

где  $\Theta_L$  – подкласс образования воспроизводящей линии;  $\Phi$  – формообразующее или вспомогательное движение;  $g$  – отношение между элементарными движениями, составляющими формообразующее или вспомогательное движение.

В станковедении каждое движение характеризуется такими пятью параметрами, как: траектория, путь, направление, скорость и исходная точка.

В других частных направлениях машиноведения понятие о параметрах исполнительных движений не рассматривается, что можно объяснить существенно меньшим, чем в станковедении, разнообразием формообразующих движений. Тем не менее это понятие носит всеобщий характер независимо от вида воздействия на твердое тело и класса технологических машин.

При описании  $S$ -систем рассматриваются наиболее общие качественные вопросы образования поверхностей. В этом случае наиболее важным параметром является траектория. Определенность траектории конкретного исполнительного движения обеспечивается информационным комплексом, а энергетический комплекс служит для обеспечения информационного комплекса энергией. Форма траектории взаимно однозначно соответствует конкретной воспроизводящей линии и может воспроизводиться различными движениями: элементарным вращательным или поступательным, составным, состоящим из двух элементарных движений, и сложным, состоящим из двух и более строго согласованных элементарных движений. Заметим, что элементарными и составными движениями образуется траектория простой формы – окружность или прямая линия. В случае составного движения одно из составляющих его элементарных движений обычно обеспечивает простое периодическое движение характеристического образа, например, вращение, а другое перемещает центр вращения по эквидистанте к воспроизводимой линии. Сложное движение используется в основном при образовании траекторий сложной формы.

Информация о траектории конкретного исполнительного элементарного движения заложена в соответствующей вращательной или поступательной элементарной кинематической паре. К подвижному звену этой пары подводится энергия от какого-либо источника. В технологических машинах связь между подвижными звеньями кинематических пар и источни-

ком (или источниками) энергии осуществляется кинематическими цепями различной протяженности. В  $S$ -системах источники энергии и кинематические связи непосредственно не указываются, а выражаются в описаниях и иллюстрирующих их схемах взаимодействия объектов посредством соответствующих движений. Будем называть информационным комплексом кинематическую пару, несущую информацию о траектории элементарного исполнительного движения, а ее связь с источником энергии и этот источник – энергетическим комплексом.

Информация о траектории сложного исполнительного движения, состоящего из двух и более строго согласованных элементарных движений, заложена в элементарных кинематических парах и связывающей их кинематической цепи, к одному из звеньев которой, называемому звеном соединения связей, подводится энергия от соответствующего источника. В этом случае информационным комплексом будем называть совокупность соответствующих элементарных кинематических пар вместе с их связью, а энергетическим – источник энергии и его связь с информационным комплексом.

Известно, что в технологических машинах, реализующих один и тот же способ обработки, может использоваться для выполнения исполнительных движений как один, так и несколько источников энергии. В описаниях способов формообразующей обработки количество источников энергии не конкретизируется. Однако, принимая во внимание то, что структура каждого исполнительного движения обязательно содержит информационный и энергетический комплексы, а расход энергии для переноса информации в  $S$ -системах зависит только от количества информационных комплексов, эту неопределенность можно устранить. Поэтому будем считать, что любая  $S$ -система имеет общий источник энергии, а важнейшим элементом каждого конкретного энергетического комплекса является связь, передающая энергию от источника к подвижному звену информационного комплекса.

При теоретико-множественном описании кинематической подсистемы вспомогательные движения, выполняемые периодически, будем отмечать знаком « $\ddagger$ »; выполняемые одновременно (параллельно) с формообразующими движениями – « $\wedge$ »; выполняемые последовательно – « $\mid$ »; выполняемые синхронно – « $\diagup$ »; выполняемые в противофазе – « $\diagdown$ ». Переменное элементарное движение будем обозначать знаком « $\sim$ », указывая его над соответствующим символом.

Представим кинематическую подсистему рассмотренного выше способа нарезания резьбы фасонным резцом в виде теоретико-множественной

модели (см. рисунок 3.1). Профиль вспомогательного элемента резца совпадает (зеркально отображает) профиль резьбы. Поэтому характеристический образ этого резца –  $\{E\}_1$ . Следовательно, данный способ не имеет кинематической структуры, воспроизводящей образующую (профиль резьбы), а ее функцию выполняет характеристический образ инструмента.

Структура, воспроизводящая направляющую (винтовую линию), записывается формулой

$${}^K M_H = (JJ \cup E)_H.$$

Функция этой структуры есть множество

$${}^K F_H = \{H^c, \Phi_H(B_1 P_2)\}.$$

Следовательно, полная структура кинематической подсистемы описывается формулой, воспроизводящей направляющую, то есть

$${}^K M \equiv {}^K M_H,$$

где символ эквиваленции « $\equiv$ » обозначает равнозначность обеих структур.

Функция кинематической подсистемы есть множество

$${}^K F = \{\{E\}_1, E-H^c, \Phi_H(B_1 P_2)\}.$$

Отдельно следует обсудить представление в символах поступательно-возвратного и вращательно-возвратного движений. В технической литературе, посвященной формообразованию, эти движения относят к элементарным, показывая их на схемах двухсторонней стрелкой (см. рисунок 1.1), движения  $P_1$  и  $P_5$ ). Однако в математических моделях символы этих движений не отличаются от символов поступательного и вращательного движений. В системологии такая неопределенность недопустима.

При обкатном зубодолблении (см. рисунок 1.1) поступательно-возвратное движение  $P_1$  последовательно выполняет две функции: формообразование образующей зубчатого колеса (поступательная составляющая движения  $P_1$ ) и перенос траектории формообразования (возвратная составляющая этого движения) в новое (исходное) положение для повторения формообразования. Следовательно, можно утверждать, что поступательно-возвратное движение  $P_1$  есть непрерывная последовательность чередующихся формообразующего и делительного движений. Аналогично можно показать, что вспомогательное поступательно-возвратное движение  $P_5$  есть непрерывная последовательность чередующихся движений позиционирования и деления, синхронизированная с соответствующими составляющими движения  $P_1$ .



Таким образом, анализируемые движения можно представить в виде математических моделей:

$$[\Phi(\uparrow\Pi_1) | Д(\downarrow\Pi_1)] \text{ и } [\Pi_3(\uparrow\Pi_5) | Д(\downarrow\Pi_5)].$$

Однако такая форма представления движений достаточно громоздка. ее можно упростить, не ухудшая информативности, на основе следующего рассуждения. Как известно, рассматриваемые движения в технологических машинах воспроизводятся одним механизмом, например, кулисным, кривошипно-ползунным, кулачковым. Значит, для выполнения делительной составляющей этих специфических движений не требуется отдельный механизм. Это обстоятельство позволяет представить анализируемые движения более короткими математическими моделями:

$$\Phi(\updownarrow\Pi_1) \text{ и } \Pi_3(\updownarrow\Pi_5).$$

В такой записи делительная составляющая поступательно-возвратного движения не показывается, а признаком ее наличия является двухсторонняя стрелка « $\updownarrow$ ».

В ряде схем обе составляющие поступательно-возвратного движения выполняют функцию формообразующего движения, например, при обработке сложнопрофильных поверхностей. Соответствующий пример будет рассмотрен ниже.

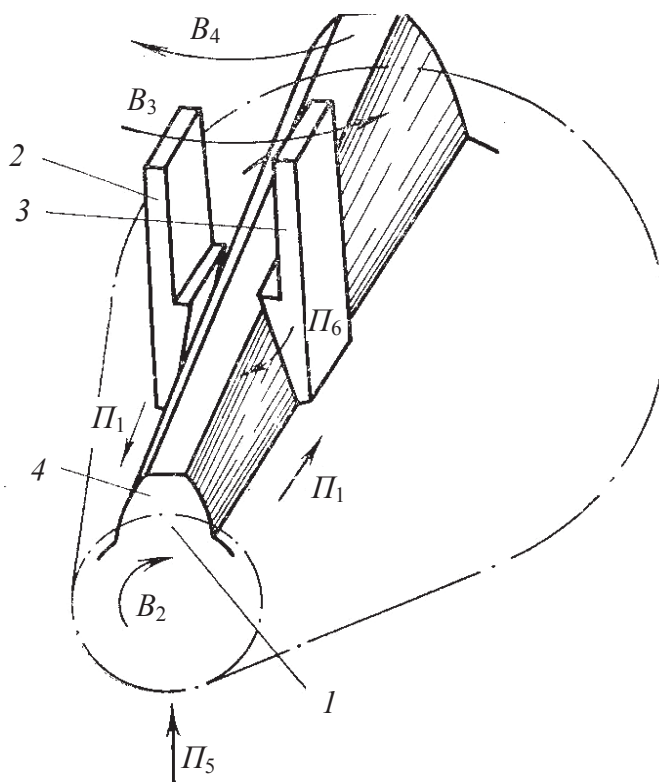


Рисунок 3.3. – Способ строгания прямозубых конических колес

Схема, приведенная на рисунке 3.3, иллюстрирует способ строгания прямозубых конических колес, положенный в основу зубострогальных станков. При строгании процесс получения конической поверхности осуществляется в результате сообщения заготовке 1 и резцам 2 и 3 нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Образующая зубчатого колеса – прямая линия, пересекающая ось заготовки, воспроизводится элементарными формообразующими поступательно-возвратными движениями  $\updownarrow\Pi_1$  резцов 2 и 3. Строгание производится при поступательном движении резцов, а при возвратном движении – деление, то есть перенос траектории движения резания в исходное положение для его повторения. В технической литературе, посвященной описанию принципа работы зубострогальных станков, эту составляющую движения  $\updownarrow\Pi_1$  называют холостым ходом. Оба резца строгают противоположные стороны зуба в противофазе, то есть в то время, когда один резец срезает припуск, а другой совершает движение деления. Направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, воспроизводится сложным движением обката  $B_2B_3$ , состоящим из двух согласованных элементарных движений: вращения  $B_2$  заготовки и совместного вращения  $B_3$  резцов 2 и 3. При строгании резцы, образующие впадину сопряженного колеса, в движении обката профилируют один зуб нарезаемого колеса. По окончании этого цикла при сохранении направления движения  $B_2$  резцы движением  $B_4$  возвращаются в исходное положение, происходит деление на зуб. Затем цикл строгания очередного зуба повторяется. На начальном этапе движения обката заготовке 1 сообщают движение врезания  $\Pi_5$  на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки в периоды холостых ходов резцам 2 и 3 сообщают также движение «отскока»  $\Pi_6$  для устранения их затиранья о профилируемые зубья нарезаемого колеса.

В рассматриваемом способе формообразующей обработки воздействию на твердое тело (заготовку) осуществляют парой зубострогальных резцов, имитирующих впадину сопряженного конического колеса – инструмента. Характеристический образ такого инструмента  $\{M_3\}_2$ . Класс образования зубчатой поверхности  $(H^C-H^K)$ .

Структура, воспроизводящая образующую, представляется структурной формулой:

$${}^K M_O = \updownarrow \{ (J U E) // (J U E) \}_O.$$

Функция этой структуры есть множество

$${}^K F_O = \{ \{ M_3 \}_2, H^c, \Phi_O(\updownarrow\Pi_1) // (\updownarrow\Pi_1) \}.$$

Структуру, воспроизводящую направляющую, представим следующей структурной формулой:

$${}^K M_H = (JJ \cup E)_H.$$

Функция этой структуры есть множество

$${}^K F_O = \{\{M_3\}_2, H^K, \Phi_H(\downarrow \Pi_1)\}.$$

Структура, воспроизводящая вспомогательные движения деления, врезания и «отскока», записывается соответственно формулами:

$${}^K M_D = (J \cup E), {}^K M_{Bp} = (J \cup E), {}^K M_{Bc} = \downarrow (J \cup E).$$

Функция вспомогательных структур есть множества

$${}^K F_D = D(B_4), {}^K F_{Bp} = Bp(\Pi_5), {}^K F_{Bc} = /B_c(\downarrow \Pi_6).$$

Следовательно, полная структура кинематической подсистемы рассматриваемого способа строгания прямозубых конических колес описывается множеством

$${}^K M = \downarrow \{(J \cup E) // (J \cup E)\}_O \cup (JJ \cup E)_H \cup (J \cup E)_D \cup (J \cup E)_{Bp} \cup \downarrow (J \cup E)_{Bc}.$$

Функция кинематической подсистемы есть множество

$${}^K F = \{\{M_3\}_2, H^C - H^K, \Phi_O(\downarrow \Pi_1) // (\downarrow \Pi_1), \Phi_H(\downarrow \Pi_1), D(B_4), Bp(\Pi_5), /B_c(\downarrow \Pi_6)\}.$$

В таблице 3.1 приведены математические модели кинематических подсистем ряда способов формообразующей обработки, представляющих все исходные классы образования реальных поверхностей. Схемы взаимодействия заготовки и инструмента, поясняющие эти способы, показаны на рисунках 2.8, 2.9, 2.10, 3.1.

Для оценки сложности кинематической подсистемы введем критерий сложности, который будем определять как общее количество информационных и энергетических комплексов подсистемы

$$C_k = C_J + C_E = \sum_i J_i + \sum_j E_j,$$

где  $C_k$  – критерий сложности кинематической подсистемы;  $C_J$  и  $C_E$  – соответственно критерий сложности информационного и энергетического комплексов.

Критерий сложности рассмотренного выше способа строгания прямозубых конических колес (см. рисунок 3.3) равен 13.

$$C_k = \sum_i J_i + \sum_j E_j = 7 + 6 = 13.$$

Критерии сложности кинематической подсистемы ряда рассмотренных выше S-систем приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Структура кинематической подсистемы некоторых S-систем

Номер рисунка	Математическая модель кинематической подсистемы и ее функция	Критерий сложности $C_J + C_E = C_K$
1	2	3
2.8, а	${}^K M = ((JUE) \wedge (JUE))_O \cup ((JUE) \wedge (JUE))_H$	4 + 4 = 8
	${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi-\Pi, \{\Phi_O(B_1 \wedge B_2), \Phi_H(B_3 \wedge \Pi_4)\}\}$	
2.8, б	${}^K M = ((JUE) \wedge (JUE))_O \cup ((JUE))_H$	3 + 3 = 6
	${}^K F = \{\{1\}_1, \Pi-H^C, \{\Phi_O(B_1 \wedge B_2), \Phi_H(\Pi_3)\}\}$	
2.8, в	${}^K M = ((JUE) \wedge (JUE))_O \cup (JUE)_H \cup (JUE)_D$	5 + 4 = 9
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, \Pi-H^K, \{\Phi_O(B_1 \wedge \Pi_2), \Phi_H(B_3 \Pi_4), \ddagger D(B_5)\}\}\}$	
2.8, д	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{1\}_1, H^C-\Pi, \{\Phi_O(\Pi_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$	
2.8, е	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{1\}_1, H^C-H^C, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}$	
2.8, ж	${}^K M = (JUE)_O \cup ((JUE) \wedge (JUE))_H$	3 + 3 = 6
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, H^C-H^K, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(B_2 \wedge \Pi_3)\}\}\}$	
2.8, и	${}^K M = (JUE)_O \cup ((JUE) \wedge (JUE))_H$	4 + 3 = 7
	${}^K F = \{\{M_3\}_k, H^K-\Pi, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_2 \wedge \Pi_3)\}\}\}$	
2.8, к	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H$	3 + 2 = 5
	${}^K F = \{\{M_3\}_k, H^K-H^C, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(\Pi_3)\}\}\}$	
2.8, л	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H$	4 + 2 = 6
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, H^K-H^K, \{\Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_3 B_4)\}\}\}$	
2.8, н	${}^K M = ((JUE) \wedge (JUE))_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{E\}_k, E-\Pi, \{\Phi_H(B_1 \wedge \Pi_2)\}\}\}$	
2.8, о	${}^K M = (JUE)_H \cup (JUE)_{Bp}$	2 + 2 + 4
	${}^K F = \{\{E\}_1, E-H^C, \{\Phi_H(B_1), \wedge Bp(\Pi_2)\}\}\}$	
2.8, п	${}^K M = (JUE)_H \cup (JUE)_{Bp}$	3 + 2 = 5
	${}^K F = \{\{E\}_1, E-H^K, \{\Phi_H(B_1 B_3), \wedge Bp(\Pi_2)\}\}\}$	
2.8, р	${}^K M = (JUE)_{Bp}$	1 + 1 = 2
	${}^K F = \{\{E \times E\}_1, E-E, Bp(\Pi_1)\}\}$	
2.9	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H$	2 + 2 = 4
	${}^K F = \{\{M_3\}_1, H^C-H^C * E, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}\}$	
2.10	${}^K M = (JUE)_O \cup (JUE)_H \cup (JUE)$	4 + 3 + 7
	${}^K F = \{\{M_3\} \gg L, E * H^C - H^K, \{\Phi_O(\Pi_4), \Phi_H(B_1 B_3), Bc(\Pi_2)\}\}\}$	
3.1	${}^K M = (JUE)_O$	2 + 1 = 3
	${}^K F = \{\{E\}, E-H^C, \{\Phi_H(B_1 \Pi_2)\}\}\}$	

Очевидно, минимальный критерий  $C_k$  характеризует наименьшее количество необходимых информационных и энергетических комплексов и, следовательно, наиболее простую кинематическую подсистему  $S$ -системы. Из рисунков 2.8–3.1 и таблицы 3.1 следует, что простейшую кинематическую подсистему имеют  $S$ -системы, функционирование которых осуществляется по классу  $E-E$  образования поверхностей. Далее, по мере усложнения, следуют  $S$ -системы, воспроизводящие образующую по классу  $E$  и т.д.

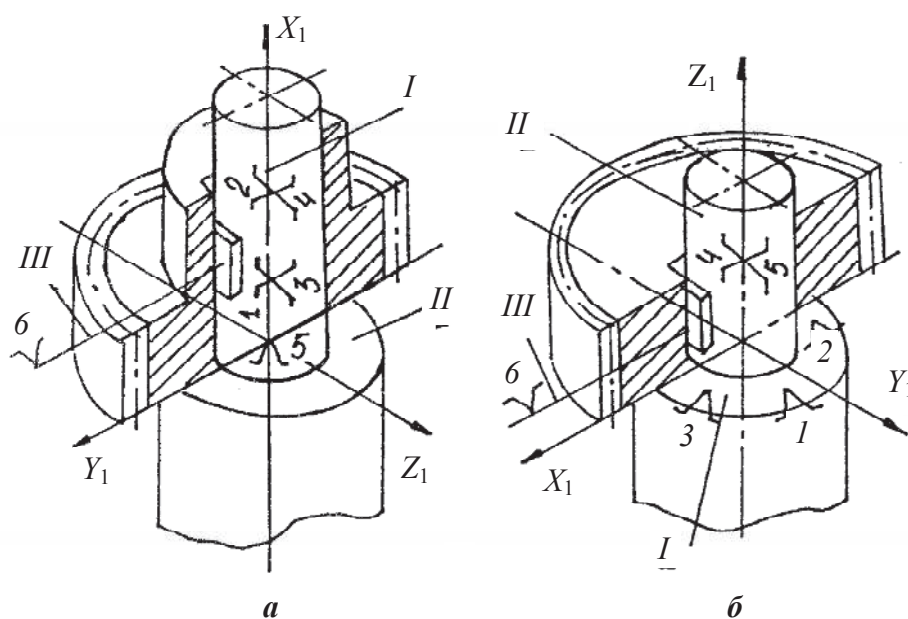
Оценивая различные кинематические подсистемы критерием сложности, можно определить пути уменьшения сложности кинематической подсистемы. Задачу уменьшения  $C_k$  можно решать следующими двумя путями: переходом к  $S$ -системам, образующим обе или одну из воспроизводящих линий по классу  $E$ ; переносом функции некоторых энергетических комплексов в зону контакта заготовки и инструмента. Первый путь объясняет появление и интенсивное развитие таких процессов, как литье под давлением, непрерывное литье, различные виды штамповки, формирование изделий в электромагнитном поле и т.п., второй – появление процессов обработки поверхностным пластическим деформированием и резание самовращающимися резцами.

### **3.3 Методика системного описания базирующей подсистемы**

Любой способ формообразующей обработки предусматривает определенную исходную ориентацию заготовки относительно характеристического образа инструмента. Для этого в технологических машинах используются различные установочные приспособления, материализующие технологический комплект баз. Как известно, комплект баз лишает заготовку всех шести степеней свободы: трех поступательных движений вдоль осей координат и трех вращений вокруг указанных осей. Это условие называют правилом шести точек. Базы, в том числе технологические, различаются по отнимаемым степеням свободы и характеру проявления. По отнимаемым степеням свободы различают установочную, направляющую, опорную, двойную направляющую и двойную опорную, а по характеру проявления – явную и скрытую.

На рисунке 3.4 приведены примеры базирования цилиндрического зубчатого колеса при качественно различной длине его ступицы. Комплект баз при базировании зубчатого колеса с длинной ступицей (рисунок 3.4, *a*) состоит из двойной направляющей скрытой базы  $I$ , отнимающей четыре

степени свободы (точки 1, 2, 3, 4), опорной явной базы II, отнимающей одну степень свободы (точка 5), и опорной скрытой базы III, отнимающей также одну степень свободы (точка 6). При обработке узкого зубчатого колеса качественный характер баз изменяется. В этом случае комплект баз включает (рисунок 3.4, б) установочную явную базу I, отнимающую три степени свободы (точки 1, 2, 3), двойную опорную скрытую базу II, отнимающую две степени свободы (точки 4, 5), и опорную скрытую базу III, отнимающую одну степень свободы (точка 6).



*a* – с длинной ступицей; *б* – с короткой ступицей

**Рисунок 3.4. – Схемы базирования зубчатого колеса**

Аналогично можно рассмотреть комплекты баз, обеспечивающих определенность установки иных заготовок. Так, заготовку при точении цилиндрической поверхности устанавливают, используя комплект баз, составленный в зависимости от конкретных условий из качественно различных баз. Цилиндрическую заготовку возможно установить в токарном патроне, в центрах с использованием поводкового хомутика, в токарном патроне с поджатием задним центром.

При разработке технологического процесса изготовления конкретной детали выбор оптимального комплекта баз из совокупности возможных имеет принципиальное значение. В то же время качественные различия отдельных комплектов баз несущественны при функционировании *S*-систем. Существен лишь сам факт базирования заготовки, обеспечивающий ее определенную ориентацию относительно характеристического образа инст-

румента. Это позволяет, абстрагируясь от конкретных конструкций установочных приспособлений и их элементов, рассматривать базирующую подсистему любой  $S$ -системы как счетное множество баз (подсистем второго уровня), обеспечивающих определенность исходной ориентации заготовки относительно характеристического образа инструмента:

$${}^{\circ}M = \bigcup_{i=1}^3 {}^{\circ}M_i,$$

где  ${}^{\circ}M_i$  – отдельная база базирующей подсистемы.

В сформулированном определении базирующая подсистема является аналогом технологического комплекта баз.

Базы характеризуются числом отнимаемых степеней свободы. Эту характеристику положим в основу формализации баз. Для этого в математических моделях различных баз (таблица 3.2) будем указывать отнимаемые степени свободы.

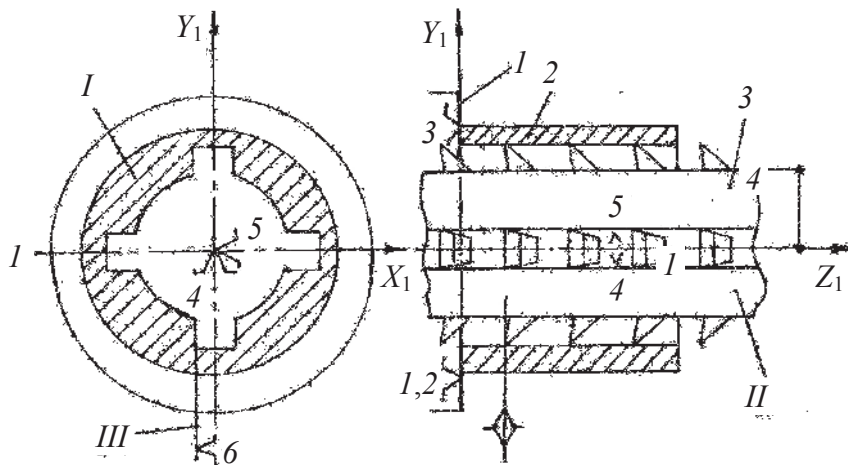
Таблица 3.2. – Математические модели стандартных баз

Принятое название базы	Модель базы
Двойная направляющая	${}^{\circ}M^{1-4}$
Установочная	${}^{\circ}M^{1-3}$
Направляющая	${}^{\circ}M^{4-5}$
Опорная	${}^{\circ}M^6$
Двойная опорная	${}^{\circ}M^{4-5}$

В приведенных примерах базирование рассмотрено применительно к материализации комплекта баз с помощью установочных приспособлений, не имеющих непосредственных функциональных связей с характеристическим образом инструмента. Однако в технологии формообразующей обработки известны  $S$ -системы, в которых полностью или частично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ. В технической литературе такое совмещение функций применительно к способам формообразующей обработки еще не анализировалось. Поэтому рассмотрим некоторые известные варианты совмещения функций и его влияние на базирующую подсистему.

На рисунке 3.5 приведена схема базирования втулки при протягивании шлицевого отверстия. Для обработки втулка 2 прижимается к под-

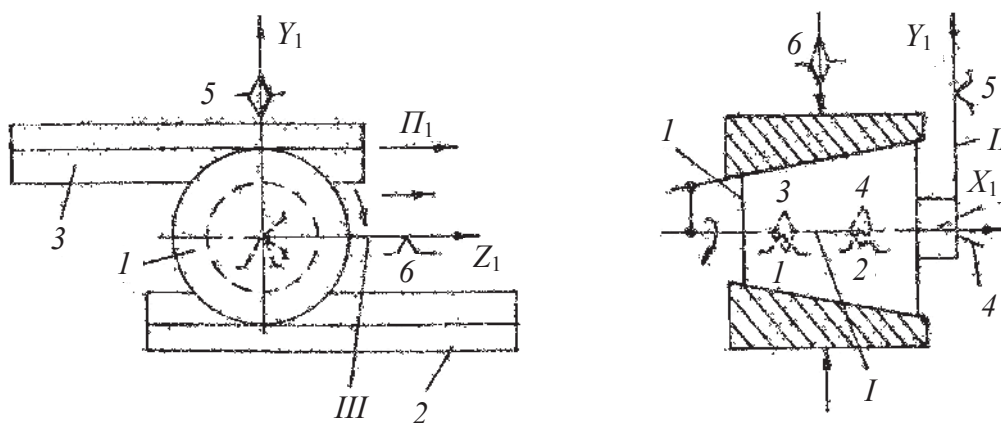
кладной плите *I* протяжного станка и центрируется до начала срезания припуска по цилиндрической поверхности протяжки *3*.



**Рисунок 3.5. – Схема базирования шлицевой втулки при протягивании**

Комплект баз для данного способа состоит из трех явных баз. Установочная база *I* лишает заготовку трех степеней свободы (точки *1*, *2*, *3*) и материализуется элементом (плитой *I*) технологической машины. Направляющая база *II* лишает заготовку двух степеней свободы (точки *4*, *5*), а опорная *III* – одной степени свободы (точка *6*). Причем направляющая и опорная базы материализованы на инструменте.

На рисунке 3.6 приведена схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием конической поверхности.



**Рисунок 3.6. – Схема базирования конической детали при обкатке**

Для обработки заготовка *I* размещается между подвижной *2* и неподвижной *3* плашками и поддерживается упором *4*. При сообщении подвижной плашке *3* движения формообразования  $\Pi_1$  вследствие силового за-



мыкания между заготовкой и плашками заготовка прокатывается по плашкам. Вместе с заготовкой перемещается упор 4. Комплект баз для этого способа обработки включает одну явную и две скрытые базы. Двойная направляющая база I лишает заготовку четырех степеней свободы (точки 1, 2, 3, 4). Эта база является скрытой и материализуется посредством характеристического образа инструмента (плашек). Опорная явная база II лишает заготовку одной степени свободы (точка 5) и материализуется посредством установочного элемента 4. Опорная база III лишает заготовку также одной степени свободы (точка б), но является скрытой и материализуется так же, как и двойная направляющая, посредством характеристического образа инструмента.

При формообразовании изделия из жидкого металла в управляемом электромагнитном поле функцию базирующей подсистемы выполняет поле, то есть характеристический образ инструмента. Аналогично функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента при полноконтактной обкатке сферы (см. рис. 3.2) и во многих других способах обработки.

Таким образом, независимо от конструктивных особенностей базы, составляющие базирующую подсистему любой S-системы можно разделить на две группы. Первую составляют базы, не имеющие структурных связей с характеристическим образом, а вторую – базы, функция которых передана характеристическому образу. На основании этого функцию базирующей подсистемы будем рассматривать как множество параметров

$${}^{\circ}F = \{\{W_i\}, \{Q_j\}\},$$

где  ${}^{\circ}F$  – функция базирующей подсистемы;  $W_i$  – конечное множество вариантов базирования для конкретной S-системы;  $Q_j$  – конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента.

Рассмотренные примеры показывают, что чем больше баз первой группы содержит базирующая подсистема, тем она сложнее, и наоборот. Это позволяет для оценки сложности базирующей подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество баз, подлежащих материализации в виде конкретных установочных приспособлений или элементов

$$C_{\circ} = \bigcup_q^3 {}^{\circ}M_q,$$

где  $C_{\circ}$  – критерий сложности базирующей подсистемы;  ${}^{\circ}M_q$  – база, материализуемая установочным приспособлением или элементом.

Базирующая подсистема, являясь по определению аналогом технологического комплекта баз, всегда содержит три явные или скрытые базы в любом сочетании. Следовательно, максимальный критерий сложности базирующей подсистемы равен трем, а минимальный – нулю. Из определения понятия критерия сложности выводится единственный путь упрощения базирующей подсистемы, заключающийся в передаче функций одной или нескольких баз характеристическому образу инструмента.

Таблица 3.3. – Структура базирующей подсистемы некоторых  $S$ -систем

Номер рисунка	Математическая модель базирующей подсистемы и ее функция	Критерий сложности $C_6$
3.2	$\overset{\circ}{M} = \overset{\circ}{M}^{1-4} \cup \overset{\circ}{M}^5 \cup \overset{\circ}{M}^6$	0
	$\overset{\circ}{F} = \{1, \{\overset{\circ}{M} \cap P\}\}$	
3.4, а	$\overset{\circ}{M} = \overset{\circ}{M}^{1-4} \cup \overset{\circ}{M}^5 \cup \overset{\circ}{M}^6$	3
	$\overset{\circ}{F} = \{1, 0\}$	
3.4, б	$\overset{\circ}{M} = \overset{\circ}{M}^{1-3} \cup \overset{\circ}{M}^{4-5} \cup \overset{\circ}{M}^6$	4
	$\overset{\circ}{F} = \{1, 0\}$	
3.5	$\overset{\circ}{M} = \overset{\circ}{M}^{1-3} \cup \overset{\circ}{M}^{4-5} \cup \overset{\circ}{M}^6$	1
	$\overset{\circ}{F} = \{1, \{\overset{\circ}{M}^{4-5} \cup \overset{\circ}{M}^6 \cap P\}\}$	
3.6	$\overset{\circ}{M} = \overset{\circ}{M}^{1-4} \cup \overset{\circ}{M}^5 \cup \overset{\circ}{M}^6$	1
	$\overset{\circ}{F} = \{1, \{\overset{\circ}{M}^{1-4} \cup \overset{\circ}{M}^6 \cap P\}\}$	

В таблице 3.3 приведены математические модели базирующих подсистем некоторых рассмотренных выше способов формообразующей обработки ( $S$ -систем), а также их функции и коэффициенты сложности.

### 3.4 Методика системного описания энергетической подсистемы

Процесс воздействия на заготовку с целью получения на ней заданной поверхности осуществляется посредством подвода в зону обработки энергии различного вида. В разделе 1 показано, что вид используемой энергии определяет природу физико-химического воздействия, играющего основную роль в изменении исходного состояния заготовки.

Среди известных  $S$ -систем значительную группу составляют способы формообразующей обработки, для осуществления которых используется только один из возможных первичных видов физического или химическо-

го воздействия непосредственно для технологических целей. Большинство рассмотренных ранее примеров относится к этой группе  $S$ -систем. Значительную часть составляют  $S$ -системы, основанные на использовании механической энергии.

В промышленности непрерывно возрастает применение относительно новых материалов: высокопрочных, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов; тугоплавких металлов, металло- и минералокерамики; пластмасс с особыми физико-механическими свойствами. Обработка таких материалов традиционными способами, основанными на механическом воздействии на твердое тело, затруднена, а в ряде случаев практически невозможна. Это определило направление интенсивных поисков качественно новых процессов обработки. Появились группы  $S$ -систем, основанные на использовании иного вида энергии для технологических целей, например, электрической, химической, а затем и группы  $S$ -систем, в которых используется одновременно два вида энергии и более.

Будем называть природу первичного воздействия на твердое тело, в необходимом единстве с которой функционируют кинематическая и базирующая подсистемы, внутренней средой  $S$ -системы.

Как следует из изложенного выше, внутренняя среда может быть простой однокомпонентной и сложной, состоящей из нескольких простых компонент. Вполне естественно предположить, что каждая компонента внутренней среды воспроизводится определенной структурой. При разработке различных по конструкции технологических машин, реализующих один и тот же способ формообразующей обработки, в структуре, воспроизводящей конкретную компоненту внутренней среды, возможны как качественные, так и количественные различия. Однако в соответствии с решаемыми в данном исследовании вопросами они не существенны при анализе структуры и функции  $S$ -систем. В данном случае существен сам факт энергетического воздействия на твердое тело и, следовательно, необходимость в энергетической подсистеме. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему, воспроизводящую внутреннюю среду  $S$ -системы, в виде объединения отдельных структур (подсистем второго уровня), каждая из которых воспроизводит одну компоненту данной среды:

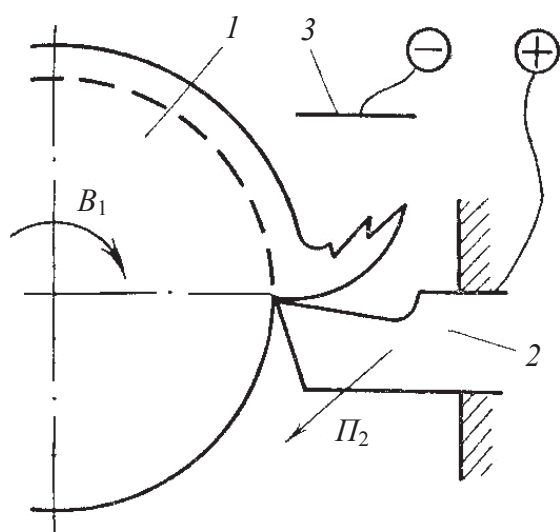
$${}^{\circ}M = \bigcup_{i=1}^m {}^{\circ}M_i,$$

где  ${}^{\circ}M$  – энергетическая подсистема;  ${}^{\circ}M_i$  – структура отдельной энергетической компоненты;  $m$  – количество энергетических компонент.

Энергетическая подсистема  $S$ -систем, по рисунку 2.8, воспроизводит только одну компоненту внутренней среды – механическую, следовательно, содержит только одну энергетическую структуру, воспроизводящую эту компоненту. Причем энергетическая подсистема названных  $S$ -систем пересекается с их кинематическими подсистемами.

Рассмотрим примеры некоторых известных  $S$ -систем, признанных в разное время изобретениями, энергетическая подсистема которых содержит более одной составляющих ее энергетических структур.

На рисунке 3.7 показана схема способа точения в электростатическом поле. Этот способ отличается от способа токарной обработки, рассмотренного выше (см. рисунок 1.5), тем, что на вещество заготовки  $1$  дополнительно воздействуют электростатическим полем, образуемым между резцом  $2$ , являющимся анодом, и металлической пластиной  $3$ , являющейся катодом. При этом поле противонаправлено электродвижущей силе собственного поля, возникающего в зоне обработки вследствие резания.

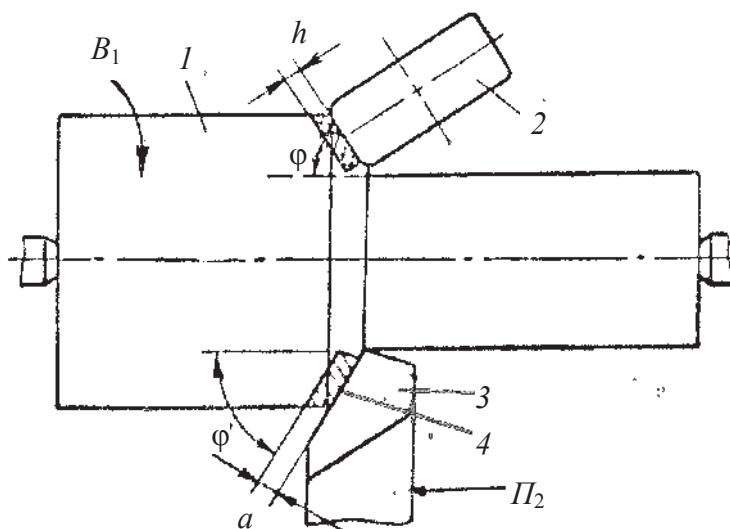


**Рисунок 3.7. – Способ точения с наложением электростатического поля**

В анализируемой  $S$ -системе внутренняя среда содержит две энергетические компоненты. Первая – первичное механическое воздействие на твердое тело – обеспечивает основную первообразную функцию  $S$ -системы, заключающуюся в срезании припуска с заготовки, то есть в образовании заданной поверхности, форма которой определяется кинематической подсистемой. Вторая компонента – электростатическое воздействие – обеспечивает дополнительную функцию, заключающуюся в нейтрализации электродвижущей силы, возникающей вследствие срезания припуска. По утверждению автора способа, вторая компонента позволяет достичь дополнительной цели – повышения стойкости инструмента. Обе компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими структурами энергетической подсистемы. Отметим также, что одна из компонент внутренней среды (механическое воздействие) воспроизводится энергетической структурой, совпадающей со структурой кинематической подсистемы, то есть энергия механического воздействия переносится от источника

этой энергии в зону воздействия посредством кинематической подсистемы. Вторая компонента внутренней среды (электростатическое поле) воспроизводится отдельной структурой энергетической подсистемы.

На рисунке 3.8 приведена схема способа точения с опережающим пластическим деформированием [24].



**Рисунок 3.8. – Способ точения с опережающим пластическим деформированием**

Этот способ отличается от предыдущего тем, что на вещество заготовки  $I$  оказывают дополнительное воздействие не электростатическим полем, а механической энергией. Внутренняя среда  $S$ -системы содержит также две компоненты.

Первая компонента – механическая, обеспечивает основную первообразную функцию – срезание припуска с заготовки  $I$  резцом  $3$  и образования требуемой цилиндрической поверхности. Вторая компонента как дополнительная механическая обеспечивает дополнительную функцию – пластическое деформирование роликом  $2$  материала заготовки на некотором расстоянии от зоны срезания припуска.

В начальный момент резцом  $3$  протачивают полосу на заготовке  $I$ . К этой полоске с опережением (например, на половину оборота заготовки) прижимают ролик  $2$ , ось вращения которого располагают под углом, равным главному углу резца в плане  $\varphi$ , и направляют усилие обкатки перпендикулярно поверхности резания.

Как утверждают авторы данного способа, ролик  $2$  пластически деформирует поверхность резания, расположенную под углом  $\varphi$  к получаемой поверхности. Режущая кромка резца срезает металл, уже претерпевший оп-

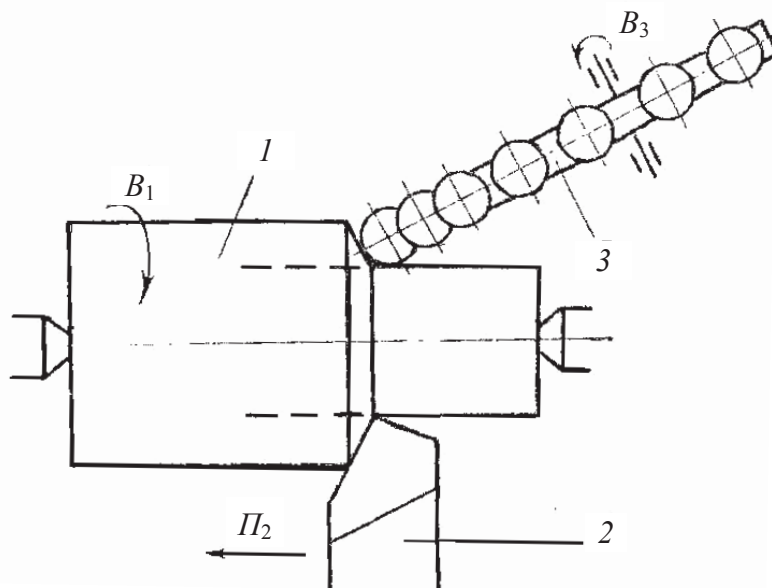
ределенную пластическую деформацию и имеющий физико-механические свойства, отличные от исходных. Поскольку конечная степень пластической деформации стружки имеет одинаковую величину как при обычном резании, так и при резании по предварительно упрочненному металлу, то инструментом совершается не вся работа, а только ее часть. Это приводит к уменьшению усадки стружки, сил резания, количества выделяемого тепла.

Дополнительная цель, обеспечиваемая опережающим пластическим деформированием, зависит от отношения толщины срезаемого слоя  $a$  и глубины деформированного (наклепанного) слоя  $h$ . При  $a \geq h$  режущая кромка резца перемещается в слое металла с исходной твердостью или близкой к ней. В итоге исключается отрицательное воздействие наклепа на режущие свойства инструмента. Следовательно, дополнительная цель – повышение стойкости инструмента и производительности формообразующей обработки. При  $a \leq h$  после обработки в поверхностном слое сохраняется остаточное напряжение сжатия. В итоге улучшаются физико-механические характеристики поверхностного слоя и повышается класс чистоты обработанной поверхности, что при названных начальных условиях является дополнительной целью.

Обе механические компоненты внутренней среды воспроизводятся соответствующими составляющими энергетической подсистемы. Первая механическая компонента, обеспечивающая срезание припуска, как и в предыдущем примере, создается посредством кинематической подсистемы. Отметим также, что дополнительное механическое воздействие обеспечивается также ее кинематической подсистемой. При этом ролик 3 является конечным звеном составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую цилиндрической поверхности (окружность) движением скорости резания  $\Phi_O(B_1)$ . Движение подачи ролика 3 осуществляется совместно с подачей резца движением  $\Phi_H(P_2)$ . Поэтому действительная глубина проникновения опережающей пластической деформации материала заготовки зависит только от начальной установки ролика 3 относительно резца 2, что определяет в конечном итоге поток механической энергии по кинематической подсистеме, поступающей в зону деформирования, а скорость распространения деформации вдоль поверхности обработки – от диаметра ролика 3 и передаточного отношения между заготовкой и роликом. Следует также отметить, что вращение ролика 3 не является формообразующим или вспомогательным движением, подготавливающим формообразующие движения.

Рассмотренный способ точения с опережающим пластическим деформированием можно изменить таким образом, чтобы вторая компонента

внутренней среды воспроизводилась отдельной составляющей энергетической подсистемы, независимой от составляющей кинематической подсистемы, воспроизводящей образующую получаемой поверхности. Такое видоизменение позволит управлять характеристиками процесса обработки в более широких пределах, чем при использовании рассмотренного способа – прототипа. Решение данной задачи иллюстрируется схемой, приведенной на рисунке 3.9.



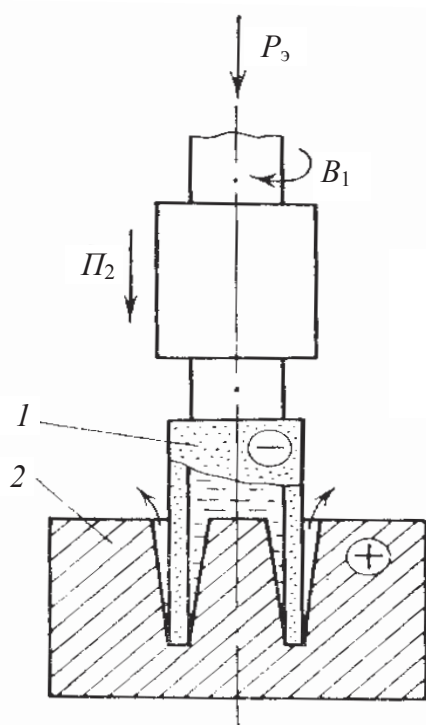
**Рисунок 3.9. – Способ точения с пульсирующим пластическим деформированием**

Здесь дополнительное механическое воздействие – пластическое деформирование заготовки – осуществляется инструментом 3, выполненным в виде диска, в периферийной части которого размещены свободно вращающиеся шарики. При обработке деформирующему инструменту 3 сообщают вращательное движение  $B_3$ , у которого круговую частоту можно изменять в широких пределах независимо от скорости воспроизведения образующей движением  $B_1$  заготовки 1. Характер воздействия при этом будет динамичным пульсирующим, что объясняется иным характеристическим образом деформирующего инструмента. Глубина проникновения опережающей пластической деформации при таком виде воздействия будет зависеть не только от усилия прижатия шариков к заготовке в статическом состоянии, но и от круговой частоты движения  $B_3$  инструмента 3. В свою очередь, это позволит уменьшить поток энергии, подводимой к зоне обработки, через кинематическую подсистему, воспроизводящую геометрическую форму обрабатываемой поверхности.

Как и в предыдущем примере, вращение деформирующего инструмента  $3$  не является формообразующим или вспомогательным, подготавливающим формообразующие движения  $\Phi_O(B_1)$  и  $\Phi_H(\Pi_2)$ . Следовательно, воспроизводящая его структура входит в энергетическую подсистему соответствующей  $S$ -системы.

Уместно отметить, что рассмотренный способ точения с пульсирующим пластическим деформированием мог быть признан изобретением, в случае подачи соответствующей заявки до разглашения его содержания в открытой технической литературе [14].

На рисунке 3.10 показана схема способа электролитического сверления, используемого для обработки отверстий в твердых сплавах, закаленных сталях, магнитных сплавах и других токопроводящих труднообрабатываемых материалах. По этому способу обработку ведут алмазным сверлом  $1$ , закрепленным в шпинделе станка с помощью специальной головки, которая кроме передачи движения вращения  $B_2$  и подачи  $\Pi_2$  обеспечивает также подачу электролита под давлением  $P_3$  во внутреннюю полость инструмента. Рассверливаемая заготовка  $2$  является анодом, а сверло  $1$  – катодом. Процесс обработки основан на использовании трех видов первичного воздействия – механического и двух видов электрического, а именно электрохимического и электроэрозионного.



**Рисунок 3.10. – Способ алмазно-электролитического сверления**

Наиболее интенсивный съем материала происходит при преимущественном механическом воздействии. В этом случае абразивный съем должен осуществляться при высоких удельных давлениях. В результате достигается высокая производительность, но происходит интенсивный износ инструмента. Если решающее значение при выполнении операции имеет обеспечение высокой стойкости инструмента, основную роль в процессе съема припуска должно иметь электрохимическое воздействие. При определенных режимах обработки существенное значение может иметь электроэрозионное воздействие, которое обусловлено интенсивными электроэрозионными разрядами, происходящими вследствие контактирования токопроводящей связки алмазного слоя инструмента с обрабатываемой поверхностью.



Так, энергетическая подсистема способа алмазно-электролитического сверления содержит три составляющие, каждая из которых воспроизводит одну компоненту внутренней среды. Отметим, что одну из компонент (механическое воздействие) воспроизводит кинематическая подсистема, то есть составляющая энергетической подсистемы, воспроизводящая механическое воздействие, совмещена с кинематической подсистемой.

Эффективность рассмотренного способа еще более возрастает при дополнении его четвертым видом воздействия на заготовку – вибрационным. Естественно, энергетическая подсистема способа в этом случае усложнится, так как в ее структуру необходимо дополнительно ввести еще одну составляющую.

Таким образом, рассмотренные примеры  $S$ -систем из различных областей формообразующей обработки в своей структуре обязательно имеют энергетическую подсистему, каждая структурная составляющая которой воспроизводит какое-то первичное воздействие на вещество твердого тела.

Независимо от конструкций устройств, реализующих энергетическую подсистему  $S$ -систем в конкретных технологических машинах, все структурные составляющие можно разделить на две группы.

Первая содержит энергетические составляющие, функции структуры которых переданы отдельным структурам кинематической подсистемы. Как правило, составляющие кинематической подсистемы являются также составляющей энергетической подсистемы, осуществляющей механическое воздействие на вещество заготовки. Естественно, такое совмещение упрощает энергетическую подсистему и всю  $S$ -систему в целом.

Вторая группа включает энергетические составляющие, функции которых не переданы составляющим других подсистем  $S$ -системы. Следовательно, чем больше в энергетической подсистеме составляющих, функция которых перенесена в другие подсистемы, тем она проще, и наоборот. Это позволяет для оценки сложности энергетической подсистемы ввести критерий сложности, который будем определять как общее количество составляющих энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам:

$$C_{\varepsilon} = \bigcup_{j=1}^{\kappa} M_j,$$

где  $C_{\varepsilon}$  – критерий сложности энергетической подсистемы;  ${}^{\circ}M_j$  – составляющие энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам.

Из определения понятия критерия сложности энергетической подсистемы следует, что минимальное значение этого критерия равно нулю. В частности, способы обработки, схемы которых приведены на рисунке 2.8, характеризуются нулевым коэффициентом сложности энергетической подсистемы. Коэффициент сложности энергетической подсистемы способов обработки, схемы которых приведены на рисунках 3.7–3.10, соответственно равен единице, нулю, единице, двум (трем). Максимальное значение критерия сложности энергетической подсистемы может быть равно количеству первичных воздействий на твердое тело.

Из определения понятия критерия сложности энергетической подсистемы выводится единственный путь ее упрощения, заключающийся в передаче функций отдельных составляющих или подсистемы в целом другим подсистемам  $S$ -системы.

В практике формообразующей обработки возможны  $S$ -системы, в которых энергетическая подсистема параллельно выполняет функцию других подсистем. Поясним это на примере способа получения изделий из расплава в управляемом электромагнитном поле. В такой  $S$ -системе электромагнитное поле наделено функцией характеристического образа, то есть является инструментом, посредством которого воздействуют на вещество расплава. Поле обеспечивает базирование заготовки расплава и процесс формообразования. Следовательно, энергетическая подсистема рассматриваемой  $S$ -системы одновременно выполняет функцию еще двух подсистем: базирующей и кинематической. Такой способ имеет простейшую структуру.

Можно предположить, что  $S$ -системы, подобные данной, в будущем будут широко использоваться в промышленности. К этой группе  $S$ -систем можно отнести способы обработки, в которых используется эффект гальванопластики.

Функцию энергетической подсистемы на основании приведенных примеров, охватывающих в наиболее общем виде все возможные варианты воздействия на твердое тело, можно представить множеством

$${}^{\circ}F = \{\{T_i\}, \{G_q\}, \{\eta\}, \{C_j\}\},$$

где  ${}^{\circ}F$  – функция энергетической подсистемы;  $\{T_i\}$  – конечное множество составляющих энергетической подсистемы;  $\{G_q\}$  – обобщенный параметр состояний каждой компоненты внутренней среды;  $\{\eta\}$  – конечное множество уровней состояния каждой компоненты;  $\{C_j\}$  – конечное множество

отношений между составляющими энергетической подсистемы и другими подсистемами  $S$ -системы.

Обобщенный параметр состояний компоненты внутренней среды

$$\Gamma_q = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q)$$

есть вектор, составляющими которого являются мощность, интенсивность, форма, длительность воздействия на твердое тело и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

### **3.5 Методика описания подсистемы стабилизации силового воздействия**

Среди известных  $S$ -систем относительно небольшую группу составляют синергетические способы формообразующей обработки, структура которых содержит подсистему стабилизации силового воздействия посредством устранения влияния случайных факторов в процессе резания. К этим факторам относятся непостоянство припуска и микротвердости заготовки от среза к срезу в зоне контакта резец – заготовка. Будем называть эту зону средой резания, или в общем случае – средой силового воздействия. Силовое воздействие может регистрироваться в виде силы резания, крутящего момента или мощности резания. Стабилизировать силовое воздействие можно посредством изменения подачи или скорости резания в противофазе с изменением этого воздействия. Отсюда следует, что среда резания (силового воздействия) является источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия. В свою очередь, подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для кинематической подсистемы. Это позволяет утверждать, что рассматриваемая подсистема пересекается с энергетической и кинематической подсистемами.

Структура подсистемы стабилизации силового воздействия есть объединение информационного и энергетического комплексов:

$${}^c M = J \cup E,$$

где  ${}^c M$  – структура подсистемы стабилизации силового воздействия;  $J$  и  $E$  – соответственно информационный и энергетический комплексы подсистемы стабилизации силового параметра.

Функцию этой подсистемы представим в виде множества

$${}^c F_i = \{\{L_k\}, \{Q_g\}\},$$

где  ${}^c F_i$  – функция подсистемы стабилизации силового воздействия;  $L_k$  – конечное множество отношений с другими подсистемами;  $Q_g$  – обобщенный параметр состояния среды силового воздействия.

Обобщенный параметр состояния среды силового воздействия

$$Q_g = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q)$$

есть вектор, составляющие которого – мощность, интенсивность, быстродействие и другие частные параметры компоненты, задаваемые формулой способа формообразующей обработки.

Функция подсистемы стабилизации силового воздействия не передается другим подсистемам  $S$ -систем. Следовательно, коэффициент сложности этой подсистемы  $C_C$  равен единице.

Информация, вырабатываемая подсистемой стабилизации силового воздействия, сообщается структурным составляющим кинематической подсистемы, осуществляющими формообразующие движения скорости резания или подачи. Принципиальное значение при этом имеет выбор структурной составляющей кинематической подсистемы, для которой подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации. Рассмотрим это обстоятельство на конкретных примерах.

Как известно, способ точения цилиндрической поверхности (класс воспроизведения поверхности  $H^C-H^C$ ), рассмотренный ранее (см. рисунок 1.5), содержит две формообразующие группы:

- простую (элементарную) структурную составляющую скорости резания  $\Phi_V(B_1)$ , воспроизводящую образующую (окружность);
- простую (элементарную) структурную составляющую подачи  $\Phi_S(\Pi_2)$ , воспроизводящую направляющую (прямую, параллельную оси обрабатываемой поверхности).

В этом случае при включении в рассматриваемый способ подсистемы стабилизации силового воздействия она может быть источником информации для любой из названных структурных составляющих кинематической подсистемы. Однако предпочтительнее составляющая  $\Phi_S(\Pi_2)$ , так как сила резания более чувствительна к изменению подачи.

Способ нарезания резьбы фасонным резцом (класс образования винтовой поверхности  $E-H^C$ ), рассмотренный ранее (см. рисунок 3.1), содержит в кинематической подсистеме только сложную двухэлементарную структурную составляющую  $\Phi_r(B_1P_2)$ , воспроизводящую направляющую (винтовую линию). В этом случае подсистема стабилизации силового воздействия является источником информации для названной структурной составляющей кинематической подсистемы. Отсюда следует, что при воспроизведении винтовой линии стабилизация силового воздействия возможна только посредством непрерывного изменения скорости резания в функции силы резания, крутящего момента или мощности резания. В практике станкостроения обычно стабилизируют крутящий момент или мощность резания.

На первом, наиболее общем, уровне разбиения способ точения и способ нарезания резьбы как не содержащие, так и содержащие подсистему стабилизации силового воздействия как  $S$ -системы, представляют собой одинаковые множества. В частности, оба рассматриваемых способа, содержащие подсистему стабилизации силового воздействия, то есть способы с адаптивным предельным регулированием, на первом уровне есть множество

$${}_1S = ({}^K M \cap {}^\mathcal{O} M \cap {}^C M) \cup {}^B M.$$

В то же время их функциональное описание на этом же уровне различно. Функция способа точения цилиндрической поверхности с адаптивным предельным регулированием есть множество

$${}_1F_S = \{1\}_1, H^C - H^C, \{[{}^K M_O \cup ({}^K M_H \cap {}^C M)] \cap {}^\mathcal{O} M\} \cup {}^B M.$$

А функция способа нарезания резьбы фасонным резцом с адаптивным управлением есть множество

$${}_1F_S = \{E\}_1, E - H^C, \{({}^K M_H \cap {}^C M) \cap {}^\mathcal{O} M\} \cup {}^B M.$$

Металлорежущие станки, как правило, содержат несколько частных кинематических структур, каждая из которых реализует конкретный способ формообразующей обработки. Например, современные токарные станки с ЧПУ содержат, как правило, винторезную структуру. При оснащении таких станков системами адаптивного предельного регулирования используют оба рассмотренных способа со стабилизацией силового воздействия. Первый из них реализуется в структуре токарной обработки, а второй – в винторезной структуре, то есть в структуре нарезания резьбы.

### 3.6 Примеры системного описания способов формообразующей обработки

Представление способов формообразующей обработки в виде объединенных общей первообразной целью четырех подсистем – кинематической, базирующей, энергетической и стабилизирующей силовое воздействие, каждая из которых наделена собственной функцией, носит всеобщий характер, так как базируется на наиболее общих принципах организации и развития технических систем. Изложенные методики системного описания подсистем, составляющих любую  $S$ -систему, носят также всеобщий характер. Это подтверждается рассмотренными примерами, взятыми из различных областей формообразующей обработки. Вместе с тем следует отметить, что развитость подсистем зависит от области обработки, к которой принадлежит  $S$ -система.

Так, например, для способов формообразующей обработки, основанных на механическом резании, характерна высокая развитость кинематической подсистемы и практически незначительная энергетической, что объясняется исключительно большим разнообразием поверхностей, используемых в производственной практике, и широким применением материалов, относительно легко поддающихся резанию без дополнительных воздействий. Однако в связи с появлением труднообрабатываемых материалов во все больших масштабах применяется резание с наложением дополнительных воздействий. Причем во многих таких способах механическое резание выполняет вспомогательную функцию.

Этот закономерный процесс ведет к развитию энергетической подсистемы в способах механического резания. Можно предположить, что по мере развития таких способов будет сделан переход от использования дополнительных воздействий, характеризующихся единственным уровнем обобщенного параметра состояния воздействия, к многоуровневому, как при термической обработке в частности.

Способы, основанные на использовании физических явлений, характеризуются, наоборот, высокой развитостью энергетической подсистемы и незначительной развитостью кинематической. Особенно это относится к способам, где применяются управляемые физические явления для непосредственного образования заданных поверхностей. Например, в способе получения деталей из расплава в управляемом электромагнитном поле функция кинематической подсистемы передана энергетической. Естественно, энергетическая подсистема такого способа весьма развита.

В способах формообразующей обработки менее развита базирующая подсистема. Это можно объяснить тем, что для большинства способов не оговариваются габариты обрабатываемых заготовок и, как следствие, схема базирования, то есть базирующая подсистема не может быть задана однозначно при анализе способа. Однако такая неопределенность при описании базирующей подсистемы устраняется в модели функции этой подсистемы. Для базирующей подсистемы характерен принцип ее упрощения за счет полной или частичной передачи функций характеристическому образу инструмента или энергетической подсистеме. Последнее присуще, вероятно, только тем способам обработки, в которых энергетическая подсистема выполняет функцию инструмента и кинематической подсистемы. При описании различных способов формообразующей обработки, особенно в патентных источниках, часто опускают функциональные отношения между отдельными структурными элементами. В ряде случаев это вполне оправданно. В частности, не вызывает сомнения отношение между вращением заготовки и зуборезного долбяка или червячной фрезы в известных способах зубообработки. Однако для способов, в которых подобные отношения в явном виде неочевидны, такие пропуски недопустимы, так как существенно снижается информативность и ценность описания. Для подтверждения данного положения рассмотрим конкретные примеры.

На рисунке 3.11 приведена схема способа точения поверхности синусоидального профиля.

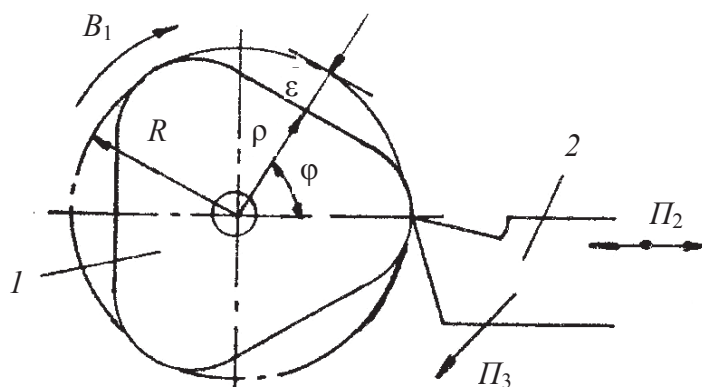


Рисунок 3.11. – Способ точения синусоидальной поверхности

Радиус-вектор образующей обрабатываемой поверхности описывается выражением

$$\rho = R - \varepsilon (1 - \cos n\varphi),$$

где  $\rho$  – радиус-вектор образующей;  $R$  – радиус выступов;  $n$  – количество выступов;  $\varphi$  – угловой параметр.

Параметр  $\varepsilon$  характеризует особенности профиля образующей – вогнутость или выпуклость (вогнутость  $\leftrightarrow 0 \leftrightarrow$  выпуклость).

Процесс получения заданной поверхности по этому способу основан на механическом резании и осуществляется двумя формообразующими движениями: сложным движением скорости резания  $\Phi_O(B_1\Pi_2)$ , состоящим из вращения  $B_1$  заготовки  $I$  и поступательно-возвратного движения  $\Pi_2$  резца  $2$ , и элементарным движением подачи  $\Phi_H(\Pi_3)$  резца  $2$  параллельно оси заготовки. Первое из этих движений воспроизводит образующую, второе – направляющую. Следует отметить, что обе составляющие элементарного поступательно-возвратного движения  $\Pi_2$ , входящего в сложное формообразующее движение, участвуют в срезании припуска и, следовательно, используются для воспроизведения профиля обрабатываемой поверхности. Следовательно, траектория сложного движения, воспроизводящего образующую, должна быть задана функцией, известной в станковедении как формула настройки кинематической цепи, определяемая на основе триады:

$$PP \rightarrow UKЦ \rightarrow \Phi H,$$

где  $PP$  – расчетные перемещения исполнительных элементов (движений  $B_1$  и  $\Pi_2$ );  $UKЦ$  уравнение кинематического баланса;  $\Phi H$  – формула настройки.

В рассматриваемом способе  $PP$  имеют вид:

*1 оборот заготовки  $I$  в движении  $B_1 \leftrightarrow k$  двойных ходов в движении  $\Pi_2$ .*

$$UKЦ: k = 1 \times i_{B_2\Pi_2}; \quad \Phi H: i_{B_1\Pi_2} = k,$$

где  $k$  – количество выступов (впадин) профиля образующей.

Полученное отношение  $i_{B_1\Pi_2} = f(k)$  учитывается при функциональном описании кинематической подсистемы.

Характеристический образ инструмента  $\{1\}_1$ , класс образования поверхности  $H^c-H^c$ .

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^k M = (JJU E)_H^c U (JU E)_H^c;$$

$${}^k F = \{\{1\}_1, H^c-H^c, \{\Phi_O(B_1\Pi_2), \Phi_H(\Pi_3)\}, g = i_{B_1\Pi_2}\}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен пяти.

Базирующая подсистема относительно выделена, не имеет структурных связей с характеристическим образом инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен трем.



Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

На рисунке 2.8, б показана схема способа планетарного точения [25]. По этому способу несколько заготовок  $1$  устанавливают в шпиндель по кругу. Процесс обработки осуществляют, сообщая заготовкам вращение  $B_1$  вокруг собственных осей и вращение  $B_2$  вокруг шпинделя  $2$ , а резцу  $3$  – движение  $П_3$  в направлении продольной подачи.

Таким образом, одним резцом осуществляется обработка за один проход нескольких заготовок. Кроме того, за счет периодического контакта резца с заготовками обеспечивается надежное стружкодробление. Характеристический образ инструмента  $\{1\}_1$ . Класс образования поверхности по данному способу  $(П-П)$ . Причем образующая воспроизводится двумя движениями  $B_1$  и  $B_2$ . Исходя из условия достижения предельно допустимой огранки получаемой поверхности, скорости этих движений должны быть функционально связаны, что вытекает из следующего рассуждения. Для равномерного снятия припуска с заготовки необходимо задать такое соотношение круговых частот вращения заготовки в относительном и переносном движениях, при которых каждый последующий проход будет перекрывать предыдущий (рисунок 3.12) на некоторый угол  $2\varepsilon$ .

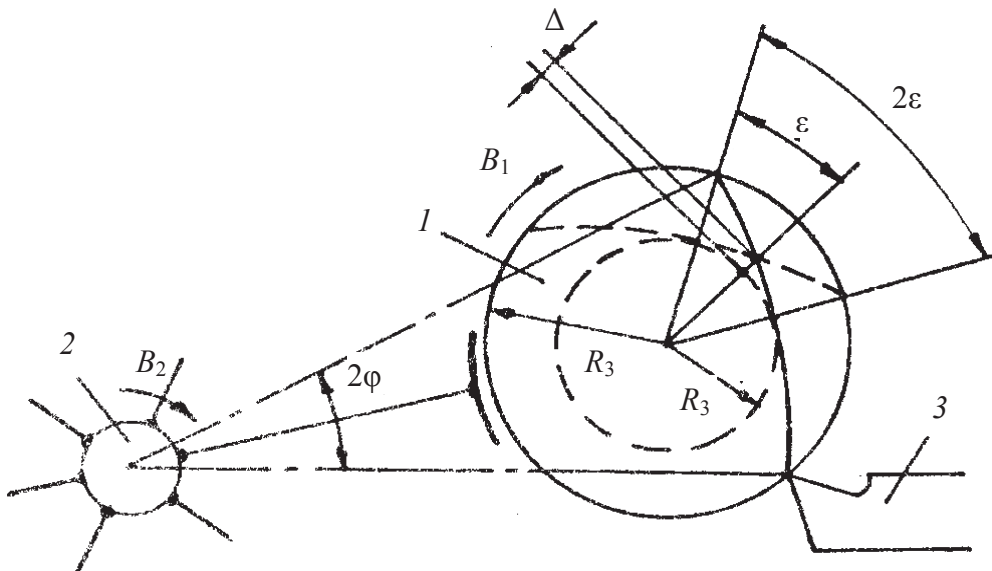


Рисунок 3.12. – Схема воспроизведения образующей при планетарном точении

За время поворота заготовки в переносном движении  $B_2$  на угол  $2\pi - 2\varphi$  срезание припуска не происходит. В этот период в относительном движе-

нии  $B_1$  заготовка должна повернуться на угол  $2k\pi - 2\varepsilon$ , где  $k$  – целое число. Тогда уравнение кинематического баланса можно записать в виде

$$2k\pi - 2\varepsilon = (2\pi - 2\varphi) i_{B_1 B_2},$$

где  $i_{B_1 B_2}$  – искомое отношение.

Из этого уравнения получим

$$i_{B_1 B_2} = (k\pi - \varepsilon) / (\pi - \varphi).$$

На этом основании можно сделать вывод о том, что элементарные движения  $B_1$  и  $B_2$  образуют сложное формообразующее движение  $\Phi_O(B_1 B_2)$ .

При точении высота получаемой огранки определяется выражением:

$$\Delta = t - R_3 \varepsilon \frac{H \sin \varphi}{\sqrt{R_3^2 - H^2 - \sin^2 \varphi}}.$$

Здесь  $\Delta$  – высота огранки;  $R_3$  – радиус заготовки;  $t$  – припуск, снимаемый за проход;  $H$  – расстояние между осями вращения заготовки и шпинделя.

Объединяя выражения для  $i_{B_1 B_2}$  и  $\Delta$ , после преобразований имеем

$$i_{B_1 B_2} = \frac{k\pi - (t - \Delta) \sqrt{\frac{1}{H^2 \sin^2 \varphi} - \frac{1}{R_3^2}}}{\pi - \varphi}.$$

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (J J U E)_O U (J U E)_H;$$

$${}^K F = \{ \{1\}_1, \Pi - \Pi, \{ \Phi_O(B_1 \Pi_2) i_{B_1 \Pi_2}, \Phi_H(\Pi_3) \}, g = i_{B_1 \Pi_2} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен пяти.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и состоит из  $3n$  отдельных баз, где  $n$  – количество одновременно обрабатываемых заготовок. Коэффициент сложности этой подсистемы равен  $3n$ . Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

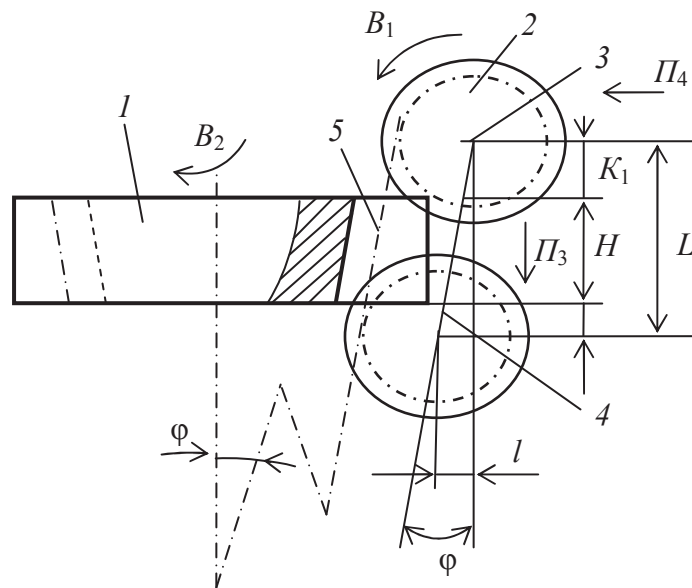
На рисунке 3.13 приведена схема способа фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями [26].

По этому способу заготовку  $1$  устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы  $2$ . Причем начальное и конечное положения фрезы в движении  $\Pi_3$  устанавливаются с учетом величины пути  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов фрезы.

Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе  $5$  фрезе  $2$  необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре движение  $\Pi_3$  продольной подачи и дополнительное движение  $\Pi_4$ , согласованное с движением  $\Pi_3$ . Причем путь дополнительного движения  $\Pi_4$  определяется по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $l$  – путь дополнительного движения  $\Pi_4$ , мм;  $L$  – путь движения  $\Pi_3$ , мм;  $\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.



**Рисунок 3.13. – Способ фрезерования зубчатых колес с наклонными зубьями**

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением  $\Phi_H(\Pi_3\Pi_4)$  подачи. При этом движения обката  $\Phi_O(B_1B_2)$ , воспроизводящее зацепление червячной передачи, остается таким же, как у классического способа зубофрезерования червячными фрезами.

Движение  $B_1$  скорости резания и движение  $П_3$  продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Согласование движений  $B_2$  и  $П_4$  с движениями  $B_1$  и  $П_3$  соответственно осуществляется на основе следующих РП:

*1 оборот фрезы в движении  $B_1 \rightarrow k/z$  оборота заготовки в движении  $B_2$ ;*

*$l$  мм перемещения фрезы в движении  $П_3 \rightarrow l$  мм перемещения фрезы в движении  $П_4$ ,*

где  $k$  – число заходов фрезы;  $z$  – число зубьев обрабатываемого колеса.

Второе выражение можно также записать через подачи движений  $П_3$  и  $П_4$ :

*$s_n$  фрезы в движении  $П_3 \rightarrow s_p$  фрезы в движении  $П_4$ ,*

где  $s_n$  – продольная подача, мм/об;  $s_p = s_n \operatorname{tg} \varphi$  – радиальная подача, мм/об.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений  $\Phi_O(B_1B_2)$  и  $\Phi_H(П_3П_4)$  осуществляется нарезание цилиндрического колеса с наклонными зубьями. При этом движение  $\Phi_O(B_1B_2)$  воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение  $\Phi_H(П_3П_4)$  перемещает ось 3 фрезы по результирующей траектории 4, эквидистантной делительному конусу 5 обрабатываемого колеса.

Характеристический образ инструмента  $\{M_3\}_K$ , класс образования поверхности  $H^K$ -П.

Кинематическая подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (JJ \cup E)_H^K \cup (JJ \cup E)_П;$$

$${}^K F = \{ \{M_3\}_K, H^K\text{-П}, \{\Phi_v(B_1П_2)i_{B1П2}, \Phi_s(П_3П_4)i_{П3П4}\}, g_1 = i_{B1П2}, g_2 = i_{П3П4} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен шести.

Таким образом, использование в данном способе фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями сложного движения для кинематического воспроизведения линии зуба по делительному конусу увеличивает его критерий сложности по сравнению с классическим (базовым) способом. Однако именно это обстоятельство обеспечивает достижение дополнительной цели – получение зубчатых колес с наклонными зубьями. Базирующая подсистема относительно выделена, не имеет структурных связей с характеристическим образом инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен трем.

Энергетическая подсистема содержит одну компоненту, которая объединена с кинематической подсистемой. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен нулю.

Способы формообразующей обработки по рисункам 3.11, 3.12 и 3.13 основаны на использовании механического воздействия инструмента при удалении части материала с заготовки.

Рассмотрим комбинированный способ магнитно-абразивного полирования труднообрабатываемых материалов (рисунок 3.14).

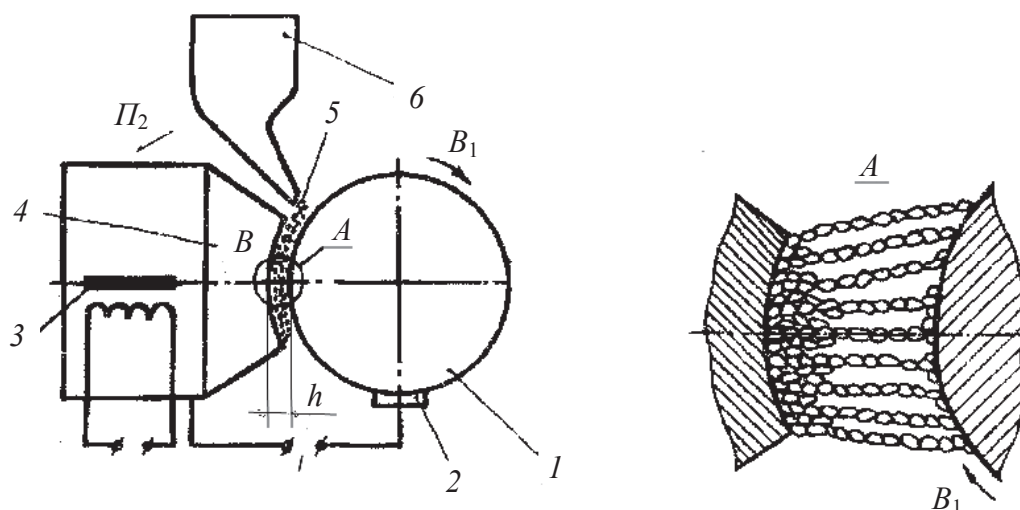


Рисунок 3.14. – Способ магнитно-абразивного полирования

Способ магнитно-абразивного полирования совмещает механохимический сьем металла и его окислов с обрабатываемой поверхностью микро-резанием, а также сглаживание микронеровностей посредством их пластического деформирования зернами абразивного порошка в электромагнитном поле [27]. По этому способу заготовку *1* устанавливают по линии центров технологической машины на некотором расстоянии *h* от смонтированного на суппорте инструмента. С заготовкой контактирует скользящий контакт *2*, соединенный посредством электрической цепи с сердечником *4* электромагнита *3*. В качестве инструмента используется абразивный сектор *5*, состоящий из ферропорошка и связующего вещества, функцию которого выполняет физическое явление – магнитное поле в зазоре сердечник *4* – заготовка *1*. Компенсация расхода ферропорошка в процессе полирования обеспечивается дозатором *6*, смонтированным на суппорте. Расход ферропорошка в процессе полирования является аналогом износа традиционного абразивного инструмента при шлифовании. Уместно отметить, что компенсация износа традиционного абразивного инструмента осуществляется посредством периодической, статической поднастройки его положения относительно обрабатываемой заготовки. При обработке ряда деталей (например, при шлифовании зубчатых колес) такая поднастройка сопровождается правкой инструмента.

Вспомогательный элемент режущего инструмента представляет собой некоторую выпуклую поверхность, адекватную вспомогательному элементу полюсного наконечника 4. Следовательно, характеристический образ инструмента  $\{E \times E\}_j$ , где  $j$  – количество вспомогательных элементов. В рассматриваемом способе полирования  $j = 1$ .

Начальные условия процесса полирования определяются подачей в зону обработки смазочно-охлаждающей жидкости, например, 50%-ного раствора эмульсола Э2 в воде. В данном случае этот раствор является носителем поверхностно-активных веществ, обеспечивающих возникновение электролиза в зоне обработки, в ходе которого расплавляется поверхностный слой полируемой детали.

При обработке заготовки сообщают вращательное движение  $V_1$ , а суппорту – продольную подачу  $P_2$ . Одновременно включают электрическую цепь скользящий контакт 2 – сердечник 4 электромагнита 3. Под воздействием постоянного магнитного поля плотность зерен ферропорошка увеличивается, и они прижимаются к вращающейся обрабатываемой поверхности. Процесс обработки основан на использовании двух видов первичного воздействия: механического и электрохимического.

В процессе полирования сравнительно большие микровыступы зерна ферропорошка контактируют с обрабатываемой поверхностью по вершинам гребешков, являющихся концентраторами силовых линий магнитного поля. В результате обработка производится постоянно обновляющимися острыми кромками при самоориентации зерен свободного абразива. При этом процесс микрорезания сопровождается пластическим выглаживанием микронеровностей.

Управляя параметрами обработки: скоростью резания (движение  $V_1$ ), подачей (движение  $P_2$ ), силой тока  $I$  и магнитной индукцией  $B$  в рабочем зазоре заготовка 1 – полюсный наконечник 4, можно управлять производительностью и формированием геометрических характеристик и физико-механических параметров поверхностного слоя совместными действиями абразивного микрорезания, пластического выглаживания микронеровностей, химических реакций активных веществ в зоне полирования, электрохимического воздействия и магнитных явлений. В первоисточнике [27] отмечается: «Изменения физико-механических параметров упрочнения поверхностного слоя, в отличие от геометрических характеристик качества, резко увеличивается с ростом магнитной индукции  $B$ . Это происходит потому, что величиной  $B$  определяется количество абразивных зерен, формирующих поверхность. Однако повышение рациональных значений

$B = 1,1 \dots 1,3$  Тл приводит к увеличению жесткости и снижению проницаемости для смазывающей жидкости плотной массы магнитно-абразивного порошка. В результате повышается давление порошка на обрабатываемую поверхность и происходит переход от преобладающего микрорезания к выглаживанию. Это приводит к увеличению трения и, соответственно, к тепловыделению в зоне обработки, что стимулирует развитие в поверхностном слое растягивающих напряжений, препятствует дроблению блоков мозаики, не дает возможности сформироваться деформационным структурам и разупрочняет поверхность». На основании данного тезиса, являющегося результатом осмысления результатов экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что магнитное поле, выполняющее функцию связки в абразивном инструменте, не используется непосредственно для первичного воздействия на обрабатываемую поверхность. Изменение индукции магнитного поля, то есть связки, приводит к изменению внутренней структуры инструмента и, как следствие, к изменению его жесткости. Вероятно, на этой основе можно утверждать, что данная  $S$ -система содержит инструментальную подсистему с управляемой жесткостью (свойство системы). Управлять названным свойством можно в процессе обработки.

Таким образом, на первом уровне декомпозиции структура рассматриваемого способа магнито-абразивного полирования представляет собой множество

$${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\exists 1} M, {}^{\exists 2} M, {}^I M, {}^B M^{1-6} \},$$

где  ${}^I M$  – инструментальная подсистема.

Инструментальная подсистема содержит одну компоненту, ее функция не передается другим подсистемам рассматриваемого способа. Следовательно, коэффициент сложности инструментальной подсистемы  $C_I = 1$ .

При отображении на обрабатываемую поверхность характеристический образ инструмента покрывает часть этой поверхности. Это позволяет сделать вывод о том, что класс образования поверхности при магнито-абразивном полировании получен посредством повышающего комбинирования ( $K_{\Pi}$ ) основного класса  $H^C-H^C$ , то есть представляет собой подкласс

$$H^C * E - H^C * E.$$

Рассматриваемый способ включает простейшую кинематическую подсистему, идентичную соответствующей подсистеме классического спо-

соба точения цилиндрических поверхностей. Эта подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (J U E)_O U (J U E)_H;$$

$${}^K F = \{ \{E \times E\}_1, H^C * E - H^C * E, \{ \Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2) \} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен четырем.

Инструментальная подсистема относительно выделена и содержит одну компоненту, функция которой не передана другим компонентам. Коэффициент сложности этой подсистемы равен единице.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен трем.

Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит две компоненты

$${}^{\mathcal{E}} M = \{ {}^{\mathcal{E}1} M, {}^{\mathcal{E}2} M \},$$

где  ${}^{\mathcal{E}} M$  – энергетическая подсистема;  ${}^{\mathcal{E}1} M$  – механическая компонента, обеспечивающая микрорезание и пластическое выглаживание поверхности;  ${}^{\mathcal{E}2} M$  – электрическая компонента (электрическое поле), осуществляющая электрохимическое воздействие на поверхностный слой детали.

Механическая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Обобщенный параметр состояния электрохимической компоненты определяется силой тока и параметрами рабочей смазывающе-охлаждающей жидкости – адгезией, химической активностью и др. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен двум.

Рассмотрим способы обработки, основанные на прибавлении вещества к заготовке. На рисунке 3.15 приведена схема способа плазменной лазерной наплавки. По этому способу заготовку 1 устанавливают в шпиндель технологической машины по линии центров под смонтированными на суппорте источником лазерного луча 2 и питателем 3 газопорошковой смеси. Затем заготовке сообщают вращательное движение  $B_1$ , а суппорту продольную подачу  $\Pi_2$ . Одновременно с движением подачи на поверхность заготовки направляют луч лазера и поток газопорошковой смеси. Этот поток под воздействием лазерного луча переходит в жидкое состояние и наплавляется на заготовку в виде спирального валика. На процесс формирования валика оказывают влияние коэффициент  $\Delta f$  фокусировки луча и



параметры  $G_n$ ,  $L$ ,  $\alpha$ , подачи газопорошковой смеси. Рекомендуемая скорость формообразования (геометрическая сумма векторов скоростей движений  $B_1$  и  $\Pi_2$ ) составила 8,3...50 мм/с.

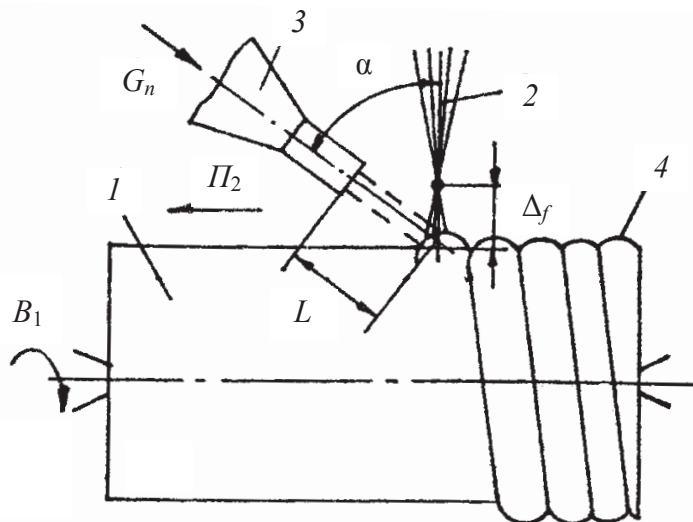


Рисунок 3.15. – Способ плазменной лазерной наплавки

Функцию инструмента выполняет луч лазера ( $P = \{E\}_1$ ), расплавляющий газопорошковую смесь (прибавляемое вещество). Класс образования поверхности – непрерывный при скольжении, то есть  $H^C-H^C$ . Способ включает простейшую кинематическую подсистему, идентичную соответствующей подсистеме классического способа точения цилиндрических поверхностей. Эта подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (J U E)_O U (J U E)_H;$$

$${}^K F = \{\{E\}_1, H^C-H^C, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен четырем.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и, следовательно, состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен трем.

Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит три компоненты:

$${}^Э M = \{{}^Э1 M, {}^Э2 M, {}^Э3 M\},$$

где  ${}^Э M$  – энергетическая подсистема;  ${}^Э1 M$  – компонента, перемещающая наплавляемый валик по поверхности заготовки;  ${}^Э2 M$  – компонента, образующая газопорошковую смесь;  ${}^Э3 M$  – компонента, воспроизводящая лазерный луч.

Первая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Обобщенный параметр состояния второй компоненты определяется проходным сечением питателя и давлением газа при формировании потока газопорошковой смеси. Аналогичный параметр третьей компоненты определяется в основном мощностью, интенсивностью и коэффициентом фокусировки луча лазера. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен двум.

На рисунке 3.16 приведена схема способа наплавки цилиндрической поверхности в магнитном поле [28]. По этому способу заготовку *1* устанавливают по линии центров технологической машины с некоторым зазором между полюсными наконечниками *2* и *3* сердечников *4* и *5* электромагнитов *6* и *7*, катушки которых питаются постоянным или пульсирующим током. Сердечники *2* и *3* подключены к одному, а наплавляемая заготовка *1* через скользящий контакт *8* – к другому выходу источника технологического тока, например, сварочного трансформатора.

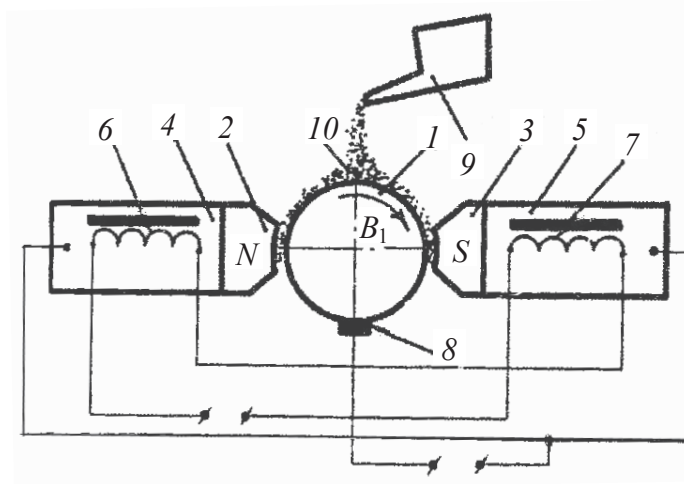


Рисунок 3.16. – Способ электромагнитной наплавки

Электромагниты и дозатор *9* наплавляемого ферромагнитного порошка *10* смонтированы на суппорте технологической машины. Функцию инструмента выполняют магнитное и электрическое поля, первое из которых ориентирует ферропорошок в рабочих зазорах, а второе его расплавляет. При сообщении заготовке *1* вращательного движения  $B_1$ , а суппорту, несущему электромагниты *6*, *7* и дозатор *9*, движения подачи (на схеме не показано) параллельно оси заготовки. В зазоры между наплавляемой поверхностью заготовки *1* и полюсными наконечниками *2* и *3* непрерывно из дозатора поступает ферромагнитный порошок *10*.

Самоориентируясь в зазорах вдоль магнитных силовых линий, зерна ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между сердечниками и заготовкой. Под действием электрического тока частицы ферропорошка у поверхности заготовки, в зоне максимального электросопротивления, расплавляются. Капли расплава под действием электрической эрозии переносятся на поверхность заготовки.

Для повышения стабильности процесса наплавки его можно проводить в потоке охлаждающей жидкости, но при этом следует учитывать некоторое уменьшение переноса материала ферропорошка на поверхность заготовки и ухудшение физико-механических свойств наплавляемого (упрочняемого) слоя.

Форма инструмента адекватна рабочей поверхности полюсных наконечников 2 и 3. Следовательно, характеристический образ инструмента  $\{E \times E\}_2$ . При отображении на обрабатываемую поверхность характеристический образ покрывает часть этой поверхности.

Следовательно, подкласс образования поверхности при электромагнитной наплавке  $H^c * E - H^c * E$  получен посредством повышающего комбинирования ( $K_{\Pi}$ ) основного класса  $H^c - H^c$ .

Кинематическая подсистема рассматриваемого способа, идентична соответствующей подсистеме классического способа точения цилиндрических поверхностей. Эта подсистема и ее функция описываются выражениями:

$${}^K M = (J U E)_O \cup (J U E)_H;$$

$${}^K F = \{ \{E \times E\}_2, H^c * E - H^c * E, \{ \Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2) \} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен четырем.

Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента и, следовательно, состоит из трех отдельных баз. Коэффициент сложности этой подсистемы равен трем.

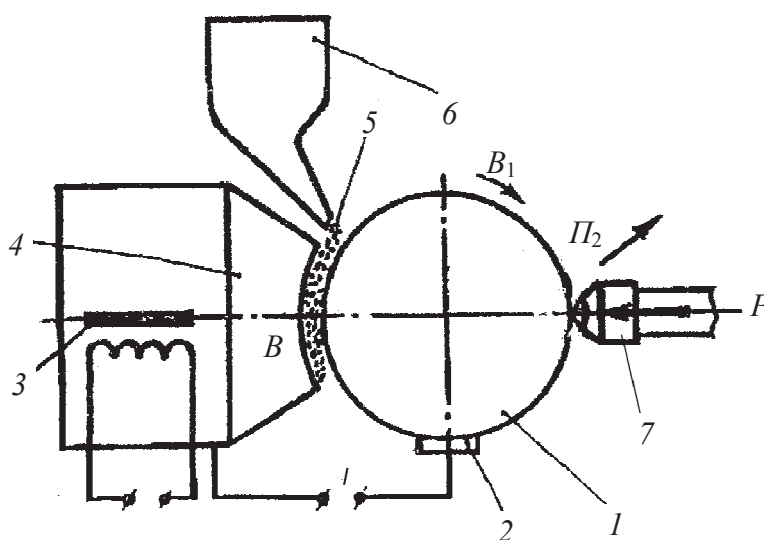
Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит три компоненты:

$${}^{\mathcal{E}} M = \{ {}^{\mathcal{E}1} M, {}^{\mathcal{E}2} M, {}^{\mathcal{E}3} M \},$$

где  ${}^{\mathcal{E}} M$  – энергетическая подсистема;  ${}^{\mathcal{E}1} M$  – компонента, перемещающая инструмент относительно поверхности заготовки;  ${}^{\mathcal{E}2} M$  – компонента, образующая магнитное поле;  ${}^{\mathcal{E}3} M$  – компонента, образующая в рабочем зазоре электрическое поле.

Первая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой. Обобщенный параметр состояния второй компоненты определяется индукцией магнитного поля, магнитными свойствами ферропорошка, рабочим зазором и внешней средой, в которой осуществляется процесс наплавки. Аналогичный параметр третьей компоненты определяется в основном мощностью, амплитудой и характером пульсаций электрического тока, воспроизводящего электрическое поле в рабочем зазоре. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен двум.

Улучшить качественные показатели поверхностного слоя, полученного посредством электромагнитной наплавки, можно объединив в одном способе названный вид наплавки с поверхностным пластическим деформированием. На рисунке 3.17 приведена соответствующая схема комбинированного способа формообразующей обработки [29].



**Рисунок 3.17. – Способ электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием**

По этому способу заготовку 1 устанавливают по линии центров технологической машины между двумя инструментами, смонтированными на суппорте. С заготовкой контактирует скользящий контакт 2, соединенный посредством электрической цепи с сердечником 4 электромагнита 3. В качестве инструмента, расплавляющего ферропорошок 5, поступающий из дозатора 6 в рабочий зазор между деталью и сердечником 4 электромагнита 3, используется пульсирующий электрический ток. В качестве инстру-

мента для поверхностного пластического деформирования используется шариковый накатник 7. Наплавка может осуществляться в постоянном, переменном или пульсирующем магнитном поле. При этом предпочтение отдается пульсирующему (импульсному) магнитному полю, обеспечивающему стабилизацию процесса электромагнитной наплавки в широком диапазоне варьирования технологических факторов. В качестве охлаждающей жидкости используется раствор эмульсола в воде.

При обработке, после включения электромагнита и подачи электрического тока в рабочий зазор, заготовке сообщают движение  $V_1$ , а инструментам – движение  $П_2$ . Частицы ферропорошка, ориентируясь в рабочем зазоре вдоль силовых линий магнитного поля, образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между деталью и полюсным наконечником. Частицы ферропорошка у поверхности детали, в зоне максимального электросопротивления под воздействием электрического тока расплавляются. Капли расплава распределяются по поверхности детали и подвергаются пластическому деформированию шариковым накатником. Таким образом, наплавка поверхностного слоя является предварительной (черновой) обработкой, а ее поверхностное деформирование – окончательной, или чистовой обработкой, выполняемой параллельно (одновременно) с наплавкой.

Управляя параметрами обработки: скоростью движений  $V_1$  и  $П_2$ , силой тока  $I$ , магнитной индукцией  $B$  в рабочем зазоре заготовка  $I$  – полюсный наконечник  $4$  и давлением  $P$  шарикового накатника на заготовку, можно управлять как формированием геометрических характеристик и физико-механических параметров поверхностного слоя, так и производительностью обработки.

Характеристический образ инструмента – электрического поля, расплавляющего ферропорошок в рабочем зазоре,  $\{E \times E\}$ . При отображении на наплавляемую поверхность характеристический образ покрывает часть этой поверхности. Следовательно, подкласс образования поверхности при электромагнитной наплавке получен посредством повышающего комбинирования ( $K_n$ ), то есть

$$H^C * E - H^C * E.$$

Характеристический образ шарикового накатника – инструмента для поверхностного пластического деформирования наплавляемой поверхности –  $\{M_3\}$ . Класс окончательного формирования поверхности  $H^C - H^C$ .

Структура кинематической подсистемы, идентична соответствующей подсистеме способа магнитно-абразивного полирования, рассмотренного выше, и описывается выражением

$${}^K M = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H.$$

Функция этой подсистемы есть множество

$${}^K F = \{ \{E \times E\}, \{M_{\mathcal{E}}\}, H^C * E - H^C * E, H^C - H^C, \{ \Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2) \} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен четырем.

Базирующая подсистема относительно выделена. Коэффициент ее сложности равен трем.

Энергетическая подсистема относительно выделена и содержит три компоненты:

$${}^{\mathcal{E}} M = \{ {}^{\mathcal{E}1} M, {}^{\mathcal{E}2} M, {}^{\mathcal{E}3} M \},$$

где  ${}^{\mathcal{E}} M$  – энергетическая подсистема;  ${}^{\mathcal{E}1} M$  – компонента, перемещающая оба инструмента по поверхности заготовки;  ${}^{\mathcal{E}2} M$  – компонента, образующая магнитное поле в рабочем зазоре;  ${}^{\mathcal{E}3} M$  – компонента, воспроизводящая пульсирующее электрическое поле в рабочем зазоре;

Первая компонента энергетической подсистемы совмещена (пересекается) с кинематической подсистемой.

Обобщенный параметр состояния второй компоненты определяется индукцией в рабочем зазоре, характером ее изменения, маркой ферропорошка и его зернистостью.

Аналогичный параметр третьей компоненты определяется в основном силой тока и характером его изменения. Коэффициент сложности энергетической подсистемы равен двум.

В заключение раздела в таблице 3.4 приведены математические модели некоторых рассмотренных  $S$ -систем на первом иерархическом уровне разбиения. Здесь же указаны обобщенные критерии их сложности.

В данной таблице символом «\*» обозначена  $S$ -система – способ магнитно-абразивного полирования, содержащий в своей структуре инструментальную подсистему. Символом «\*\*» обозначены синергетические  $S$ -системы: способ точения цилиндрической поверхности и способ нарезания резьбы фасонным резцом, содержащие в структуре подсистему стабилизации силового воздействия.

Схемы относительных перемещений инструмента и заготовки при точении цилиндрической поверхности и при нарезании резьбы фасонным резцом как для  $S$ -систем, не содержащих подсистему стабилизации силового параметра, так и для  $S$ -систем, содержащих эту подсистему, неразличимы.

Таблица 3.4. – Структура рассмотренных  $S$ -систем на первом уровне разбиения

Рисунки	Модель $S$ -системы на первом уровне разбиения	Критерий сложности $C_k + C_b + C_s$
1.2	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^B M^{1-6} \}$	$2 + 3 + 1 = 6$
1.3	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \}$	$5 + 3 + 0 + 8$
1.4	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^B M^{1-6} \}$	$2 + 3 + 1 = 6$
1.5	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 0 = 7$
2.8, $p$	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \cap P \}$	$2 + 0 + 0 + 2$
2.8, $b$	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, \left\{ \sum_{i=1}^n ({}^B M^{1-6})_i \right\} \}$	$n + n + 0 = 2n$
3.1	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \}$	$3 + 3 + 0 = 6$
3.2	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \cap P \}$	$2 + 0 + 0 = 2$
3.6	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-4} \cap P, {}^B M^5 \}$	$2 + 0 + 1 = 3$
3.7	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 1 = 8$
3.8	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M \cap {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 0 = 7$
3.9	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M \cap {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^B M^{1-6} \}$	$6 + 3 + 0 = 9$
3.10	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^{\mathfrak{A}3} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 2 = 9$
3.11	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \}$	$5 + 3 + 0 = 8$
3.13	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M, {}^B M^{1-6} \}$	$5 + 3 + 0 = 8$
3.15	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^{\mathfrak{A}3} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 2 = 9$
3.16	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^{\mathfrak{A}3} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 2 = 9$
3.17	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^{\mathfrak{A}3} M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 2 = 9$
		$C_k + C_b + C_{ii} + C_s$
3.14*	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}1} M, {}^{\mathfrak{A}2} M, {}^H M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 1 + 1 = 9$
		$C_k + C_b + C_s + C_c$
1.5**	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M \cap {}^C M, {}^B M^{1-6} \}$	$4 + 3 + 0 + 1 = 8$
3.1**	${}_1S_S = \{ {}^K M \cap {}^{\mathfrak{A}} M \cap {}^C M, {}^B M^{1-6} \}$	$3 + 3 + 0 + 1 = 7$

## 4. МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ НОВЫХ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

### 4.1 Общие принципы создания новых способов

Из определения  $S$ -системы (способа формообразующей обработки) выводится следующее следствие. Целенаправленное изменение совокупности приемов или последовательности их выполнения, изменение правил выполнения приемов приводит к качественно иному способу с новой структурой и функцией.

Структура ранее описанного способа токарной обработки (см. рисунок 1.5) включает: целесообразно организованные элементы (установка заготовки, сообщение ей вращения  $B_1$ , сообщение резцу поступательного движения  $\Pi_2$  подачи); последовательность приемов (установка (базирование) заготовки, затем сообщение ей и резцу формообразующих движений); правила выполнения приемов – определенность базирования заготовки, назначение существенно меньшей скорости подачи по сравнению со скоростью вращения заготовки.

Возможно целенаправленное изменение структуры рассматриваемого способа. Например, можно дополнительно сообщить резцу 2 вращательное движение  $B_3$  вокруг вертикальной оси 3 (рисунок 4.1).

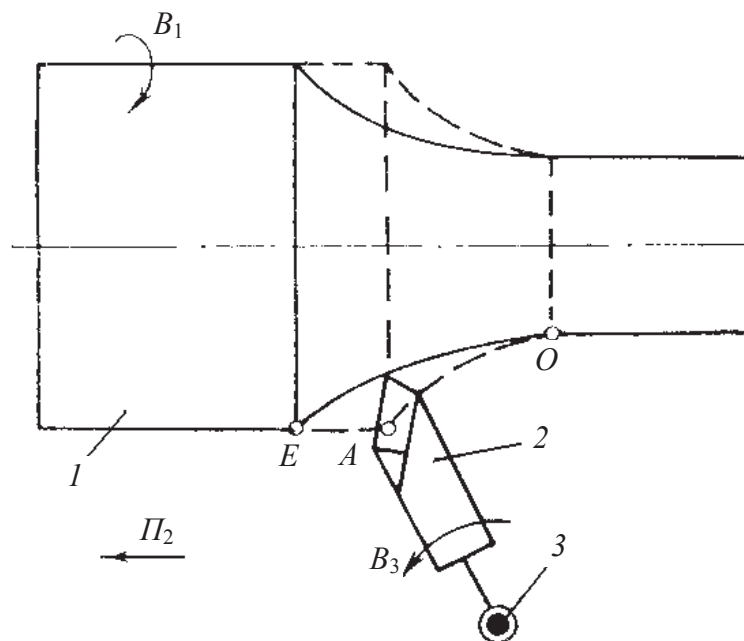


Рисунок 4.1. – Способ прерывистого точения



В этом случае при неизменном характеристическом образе инструмента  $\{1\}_1$  структура способа дополняется следующими элементами: приемами – вращение  $B_3$  резца 2: последовательностью приемов – сообщении резцу вращения, затем движения подачи; правилами выполнения приемов – назначением круговой частоты вращения резца, большей круговой частоты вращения заготовки  $I$ .

Такое изменение структуры позволяет срезать слой металла за каждый оборот резца в виде фигуры  $EAO$  (см. рисунок 4.1). Тем самым обеспечивается надежное стружкодробление. Причем этот эффект является следствием целенаправленного изменения структуры способа. Существенность качественной новизны способа, полученного в результате изменения структуры исходного способа – прототипа, подтверждается признанием его изобретением [30].

Эффективность рассматриваемого способа возрастает при замене резца резцовой головкой. Ее характеристический образ  $\{1\}_k$ , где  $k$  – число резцов головки.

Одновременно изменяется функция способа, в частности, класс образования поверхности и характер движения, воспроизводящего направляющую. Класс образования поверхности по прототипу –  $H^C-H^C$  (см. рисунок 1.5); по рассматриваемому способу –  $П-П$  (рисунок 4.1).

Структура и функция кинематической подсистемы:

- по прототипу

$${}^kM = (J \cup E)_O \cup (J \cup E)_H; \quad {}^kF = \{\{1\}_1, H^C-H^C, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(\Pi_2)\}\}.$$

- по рассматриваемому способу

$${}^kM = ((J \cup E) \wedge (J \cup E))_O \cup (J \cup E)_H;$$

$${}^kF = \{\{1\}_k, П-П, \{\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2), \Phi_H(B_1)\}\}.$$

В последнем выражении составное движение  $\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2)$  воспроизводит образующую (прямую) и состоит из двух элементарных движений, выполняемых обязательно одновременно. Каждое из этих элементарных движений осуществляется отдельным кинематическим комплексом. Причем движение  $B_3$  является движением скорости резания, а движение  $\Pi_2$  – движением подачи. Следовательно, составное движение  $\Phi_O(B_3 \wedge \Pi_2)$  – это вектор составляющих его элементарных движений. Движение  $B_1$  является круговой подачей заготовки.

В рассмотренном примере для достижения цели изобретения (обеспечение надежного стружкодробления) была изменена структура кинематической подсистемы исходного способа токарной обработки.

При использовании рассматриваемого способа из-за прерывистого характера резания на прямолинейной образующей получаемой цилиндрической поверхности образуются гребни. Этот недостаток можно устранить, если резцам 2 резцовой головки 3 (или одному из них) согласно [31] сообщать в зоне резания (рисунок 4.2) дополнительное перемещение  $\Pi_4$  в радиальном направлении, связанное с ее вращением  $B_2$  зависимостью

$$h = R (\sec \varphi - 1),$$

где  $h$  – путь радиального перемещения резца;  $R$  – радиус вершины резца при  $h = 0$ ;  $\varphi$  – угол поворота резца от плоскости, нормальной оси заготовки.

В этом случае вершины режущих зубьев будут перемещаться на участке  $cd$  по прямолинейной образующей, получаемой номинальной поверхности, а на участках  $bd$  и  $ac$  будет осуществляться плавный переход от окружности к прямой и обратно. В итоге обеспечивается формообразование цилиндрической поверхности с той же точностью, что и при традиционном точении (см. рисунок 1.5).

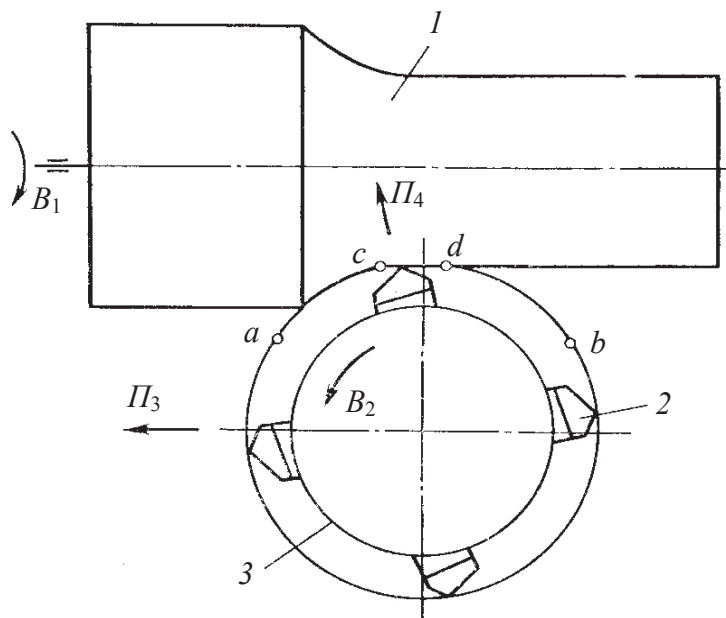


Рисунок 4.2. – Способ фрезоточения

Автором [31] рассматриваемое техническое решение названо фрезоточением с модифицированным характеристическим образом инструмента. С позиций системного подхода, используемого в данной работе, посредст-

вом дополнительного движения  $P_4$  и его функциональной связи с движением  $B_2$  осуществляется повышающее комбинирование основного класса образования поверхности при воспроизведении образующей по подклассу  $P^*H^c$ . Таким образом, комбинированный класс (подкласс) образования поверхности –  $P^*H^c-P$ .

Изменяется также структура и функция кинематической подсистемы рассмотренного способа фрезоточения.

$${}^K M = ((JUE) \wedge (JUE))_O \cup (JUE)_{H_1};$$

$${}^K F = \{ \{1\}_K, P^*H^c-P, \{ \Phi_O(B_2 P_4 \wedge P_3), \Phi_H(B_1) \} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы увеличивается на единицу и составляет  $C_K = 7$ .

Возможно также изменение структуры других подсистем. Например, одновременно с сообщением резцу (или резцовой головке) вращательного движения на зону обработки можно воздействовать импульсным электростатическим полем, противонаправленным электродвижущей силой собственного поля, синхронизированным с периодами контакта резца с заготовкой. Полученный таким образом способ будет отличаться от предшествующего двухкомпонентной энергетической подсистемой и правилом осуществления дополнительного энергетического воздействия. Такое целенаправленное изменение структуры энергетической подсистемы обеспечивает повышение размерной стойкости инструмента.

Рассмотренные примеры создания новых способов формообразующей обработки основаны на целенаправленном усложнении структуры и функции исходного способа – прототипа. Возможно и целенаправленное упрощение исходного способа, в результате которого могут быть получены новые технические решения. Пути их поиска на этой основе сводятся к частичной или полной передаче функций базирующей подсистемы характеристическому образу инструмента или энергетической подсистеме, в совмещении кинематической подсистемой функций отдельных составляющих энергетической подсистемы или в полном совмещении в энергетической подсистеме функций всех трех подсистем способа.

В настоящее время значительное развитие получают комбинированные способы формообразующей обработки, создаваемые вследствие комбинирования различных видов механического, физического и химического воздействия на твердое тело. Некоторые из них были рассмотрены ранее. В теории и практике формообразующей обработки возможны также и другие пути, основанные на иных принципах. Например, принцип поиска, основан-

ный на согласовании ритмов физического воздействия, принцип поиска на основе совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом или набором различных инструментов. Принцип поиска, основанный на совмещении формообразующих и вспомогательных движений, и принцип поиска, основанный на совмещении обработки с транспортированием.

Рассмотренные принципы поиска новых способов формообразующей обработки носят всеобщий характер. Например, принцип целенаправленного изменения совокупности приемов способа обработки широко используется исследователями на интуитивном уровне. Такой принцип, как комбинирование на основе дополнительных физических полей и потоков энергии при механической обработке резанием, получил распространение преимущественно в последние годы. В основу его развития положен перебор возможных вариантов и отбор тех, которые отвечают требованиям поставленной задачи. Принципы изменения последовательности приемов и правил выполнения приемов широко применяются в химико-термической обработке, а в формообразующей, особенно в резании, крайне ограничено.

Некоторые принципы, например, принцип согласования ритмов формообразующих движений и ритмов физических воздействий на твердое тело вообще не нашли широкого применения, а принцип совмещения обработки нескольких заготовок одним инструментом при достижении нового эффекта используется редко.

Естественно, при поиске новых способов обработки возможно одновременное последовательное применение нескольких общих принципов. Ниже рассмотрим более подробное использование некоторых общих принципов на конкретных примерах способов формообразующей обработки.

#### **4.2. Принцип совмещения обработки нескольких заготовок**

В практике металлообработки, особенно в крупносерийном и массовом производствах, совместная обработка нескольких заготовок одним инструментом или набором различных инструментов используется достаточно широко. Известны два подхода при материализации этого принципа: технологический и конструкторский. При технологическом варианте способ формообразующей обработки по своей структуре и функции неизменный. Одновременная обработка нескольких заготовок обеспечивается за счет их набора на общее базирующее приспособление. Например, таким способом обрабатывают пакеты цилиндрических зубчатых колес одной фрезой на зубофрезерных станках. Одновременная обработка нескольких

заготовок может осуществляться также набором режущих инструментов. Например, практикуется обработка двух-четырех зубчатых колес таким же количеством зуборезных долбяков, установленных на некотором расстоянии друг от друга вдоль оправки.

Известны два варианта конструкторского совмещения обработки. По первому варианту при конструкторском совмещении обработки возможна материализация объединения одинаковых способов в одном корпусе. В этом случае первоначальная идея способа остается неизменной, а повышение производительности обеспечивается за счет суммирования производительности объединяемых способов. Примером такого совмещения является материализация объединения нескольких способов обработки в структуре токарных автоматов параллельного действия. При конструкторском совмещении обработки нескольких заготовок возможно также качественное изменение исходного способа, обеспечивающее достижение новой цели. Примером такого совмещения является способ токарной обработки, положенный в основу многошпиндельных токарных автоматов последовательного действия. Для данного совмещения обработки новая производная цель – возможность получения более сложных по конфигурации деталей, чем при совмещении по параллельной схеме.

По второму варианту конструкторского совмещения обработки в структуру способа, а следовательно и технологической машины, вводятся дополнительные базирующие позиции для обрабатываемых заготовок. При таком конструкторском совмещении обработки возможно достижение неожиданного (синергетического) эффекта. Например, при рассмотренном ранее способе планетарного точения (см. рисунок 3.12) таким эффектом является достижение надежного стружкодробления.

По второму варианту конструкторского совмещения предложен ряд относительно новых способов формообразующей обработки двух заготовок одним инструментом.

На рисунке 4.3 приведена схема способа одновременной обработки двух заготовок вращающимся круглым резцом [32]. Заготовки 2 и 3 устанавливаются с противоположных сторон круглого резца 1 с возможностью перемещения навстречу друг другу. При обработке резцу 1 сообщают движение круговой подачи  $V_1$ , а заготовкам 2 и 3 – движения скорости резания  $V_2$  и  $V_3$  соответственно. Затем заготовкам сообщают движения продольных подач соответственно  $P_1$  и  $P_2$ . Срезание припуска с обеих заготовок осуществляется одновременно или от минимальной толщины срезаемого слоя к максимальной, или, наоборот, от максимальной толщины сре-

заемого слоя к минимальной в зависимости от направления вращения  $B_1$  резца  $1$ . Тем самым обеспечиваются одинаковые условия работы (силовая и тепловая нагрузка и т.п.) участвующих в резании участков режущей кромки резца.

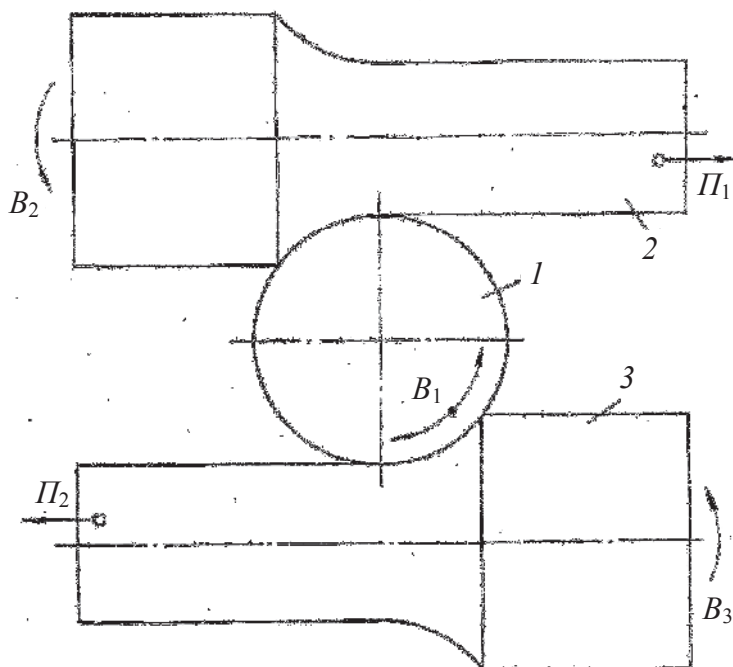


Рисунок 4.3. – Способ ротационной обработки резанием

При чистовой обработке, когда снимаемый припуск небольшой, движение  $B_1$  резца осуществляют против часовой стрелки, то есть направление скорости вращения резца в его вершине направлено противоположно скорости подачи соответственно  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  заготовок. В этом случае стружка сходит в сторону обрабатываемой поверхности, не царапает ее и тем самым повышается качество обработки. Кроме того, условия деформирования срезаемого слоя способствуют формированию качественно обработанной поверхности.

При получистовой и черновой обработке, когда значение срезаемого припуска больше, вращение резца осуществляют по часовой стрелке, то есть направление скорости вращения резца в его вершине задают одинаковым с направлением скоростей подач заготовок. В этом случае резец как бы катится с проскальзыванием по поверхности заготовок, что способствует уменьшению осевой силы резания и, следовательно, снижению мощности процесса резания. Качество обработки в данном случае не имеет существенного значения, так как полученная деталь подлежит последующей обработке.

Характеристический образ инструмента (круглого резца)  $\{M_{\text{Э}}\}_1$ . Класс образования поверхности  $H^C-H^K$ . Значимая особенность данного способа обработки состоит в том, что инструмент объединяет между собой две одинаковые по структуре и по функции составляющие кинематической подсистемы, работающие синхронно. Структура кинематической подсистемы и ее функция есть множества:

$${}^K M = \{(J U E)_O U (J J U E)_H\} U \{(J U E)_O U (J J U E)_H\};$$

$${}^K F = \{\{M_{\text{Э}}\}_1, H^C-H^K, \{\Phi_O(B_2), \Phi_H(B_1 \Pi_1)\}\} U;$$

$$U\{\{M_{\text{Э}}\}_1, H^C-H^K \Phi_O(B_2), \Phi_H(B_1 \Pi_2)\}\}.$$

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 10. Базирующая подсистема состоит из двух одинаковых подмножеств

$${}^{\sigma} M = \{\{\bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i\}, \{\bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i\}\}.$$

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен нулю.

На рисунке 4.4 приведена схема способа одновременного нарезания двух червячных колес удлиненной червячной фрезой с заборным конусом [33].

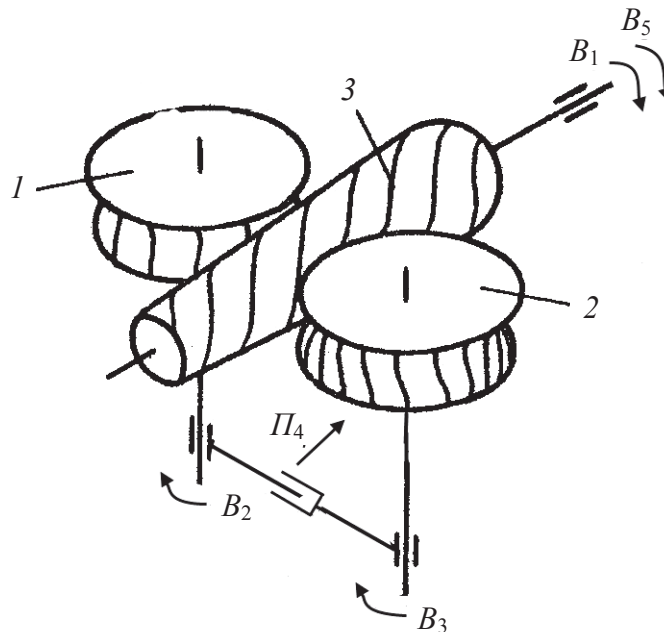


Рисунок 4.4. – Способ нарезания червячных колес

Заготовки 1 и 2 устанавливаются (базируют) симметрично относительно оси червячной фрезы 3 с возможностью синхронного вращения и поступательного перемещения вдоль оси симметрии.

Червячной фрезе 3 сообщают вращательное движение  $B_1$  скорости резания, а заготовкам 1 и 2 – вращательные движения соответственно  $B_2$  и  $B_3$ , согласованные с движением  $B_1$ . Сложные двухэлементарные движения обката  $B_1B_2$  и  $B_1B_3$  синхронно воспроизводят профиль зубьев (направляющую обоих червячных колес). При этом движение  $B_1$  воспроизводит линию зубьев обоих колес. Затем заготовкам 1 и 2 сообщают движение врезания  $\Pi_4$ , а фрезе 3 – вращательное движение  $B_5$ , согласованное с движением заготовок  $\Pi_4$ . Сложное двухэлементарное винтовое движение  $\Pi_4B_5$  обеспечивает врезание фрезы на высоту зуба нарезаемых колес. После вступления в зону резания цилиндрической (калибрующей) части фрезы движение врезания прекращают, и продолжающимися движениями обката  $B_1B_2$  и  $B_1B_3$  в течение одного полного оборота заготовок профилируют их зубья.

Характеристический образ инструмента (червячной фрезы)  $\{M_{\mathcal{E}}\}_K$ . Класс образования поверхности  $\Pi-H^K$ .

Существенными особенностями данного способа одновременного нарезания двух червячных колес являются:

- использование вращательного движения фрезы при воспроизведении как образующей, так и направляющей зубчатых поверхностей;
- объединение посредством инструмента (червячной фрезы) двух одинаковых по структуре и функции составляющих кинематической подсистемы, работающих синхронно. Структура кинематической подсистемы есть множество

$${}^K M = \{(J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup (JJ \cup E)_{Bp}\} \cup \{(J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup (JJ \cup E)_{Bp}\}$$

Функция кинематической подсистемы

$${}^K F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, \Pi-H^K, \{\Phi_O(B_1), \Phi_H(B_1 B_2), Bp(\Pi_4 B_5)\} \cup \{M_{\mathcal{E}}\}_K, \Pi-H^K, \Phi_O(B_1), \Phi_H(B_1 B_3), Bp(\Pi_4 B_5)\}\}.$$

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 16.

Базирующая подсистема состоит из двух одинаковых подмножеств:

$${}^{\sigma} M = \left\{ \left\{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i \right\}, \left\{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i \right\} \right\}.$$

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен нулю.



### 4.3. Принцип совмещения формообразующей обработки с транспортированием

В мировой практике производства технологического оборудования виртуальное техническое решение, совмещающее формообразующую обработку с транспортированием, обосновал Л.Н. Кошкин в 1930-е годы на примере формообразующей обработки давлением в крупносерийном и массовом производстве [34]. Первая промышленная роторная линия была выпущена в 1939 году. На этой основе в последующие годы в его конструкторском бюро разрабатывались также технические решения для изготовления изделий посредством механического резания. Рассмотрим виртуальное решение такой же задачи на примере зубодолбления.

Способ зубодолбления при касательном движении врезании (см. рисунок 1.6) является первообразным для группы последующих способов обработки зубчатых колес. К этой же группе следует отнести и способ зубодолбления по роторной схеме [35], совмещающий обработку с транспортированием. Обработка заготовки *1* долбяком *2* по роторной схеме (рисунок 4.5) осуществляется при их перемещении по концентрическим окружностям с общим центром *O*.

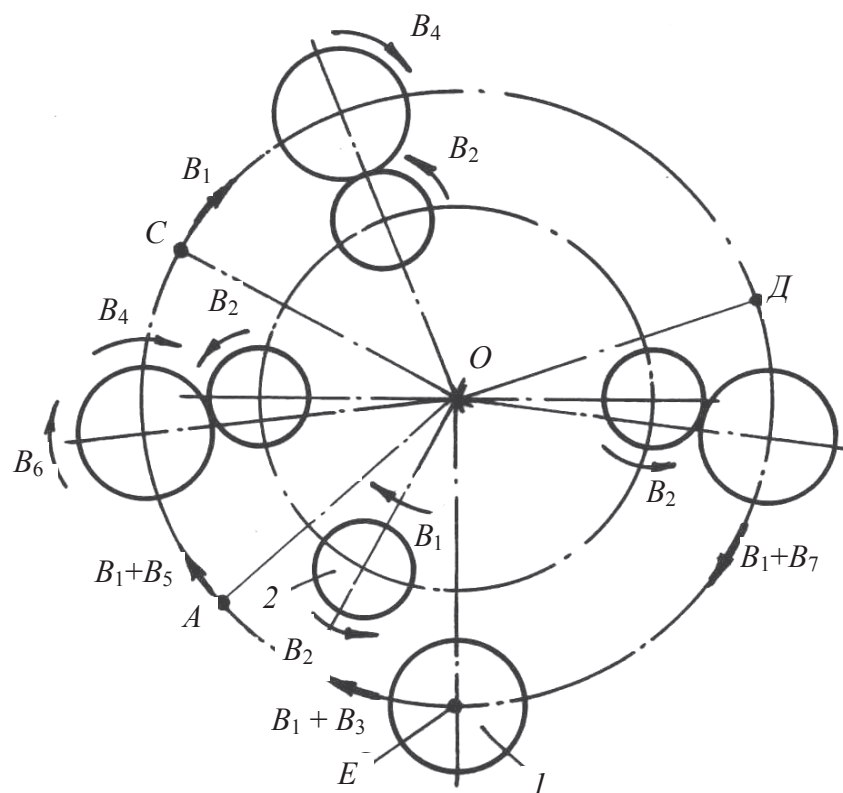


Рисунок 4.5. – Способ зубодолбления  
при непрерывном транспортировании пары долбяк – заготовка

В течение цикла обработки долбяк 2, совершающий движение  $\Pi_1$  скорости резания и движение «отскока»  $\Pi_6$ , синхронизированное с движением  $\Pi_1$  (на рисунке 4.5 движения  $\Pi_1$  и  $\Pi_6$  не показаны), перемещаются относительно центра  $O$  с постоянной угловой скоростью движения транспортирования  $B_1$  и вращается вокруг собственного центра с угловой скоростью  $B_2$  круговой подачи. Угловая скорость заготовки  $I$  относительно центра  $O$  имеет различные значения. В начальный момент цикла после установки заготовки  $I$  в положение  $E$  ей сообщают движение позиционирования  $B_1 + B_3$ , превышающее угловую скорость  $B_1$  транспортирования долбяка на величину угловой скорости  $B_3$  позиционирования. В результате на участке позиционирования  $EA$  заготовка догоняет долбяк с угловой скоростью позиционирования  $B_3$ . На участке касательного врезания  $AC$  заготовке сообщают движение  $B_4$ , согласованное с движением  $B_2$  долбяка (согласованные движения  $B_2$  долбяка и  $B_4$  заготовки образуют движение обката  $B_2B_4$ ), движение касательного врезания  $B_1+B_5$ , превышающее угловую скорость  $B_1$  транспортирования долбяка на угловую скорость подачи касательного врезания  $B_5$  (движение  $B_5$  является аналогом прямолинейного движения подачи касательного врезания в первообразном способе по рисунку 1.6) и согласованное с движением  $B_5$  дополнительное движение  $B_6$ . Врезание на высоту зуба заканчивается в позиции  $C$ , где движения  $B_5$  и  $B_6$  прекращаются. На участке  $CD$  заготовка и долбяк относительно центра  $O$  перемещаются с одинаковыми угловыми скоростями транспортирования  $B_1$ . На этом участке осуществляют профилирование заготовки движением обката  $B_2B_4$ , которое продолжается в течение одного поворота заготовки вокруг собственного центра. Профилирование заканчивается в позиции  $D$ . Здесь долбяк выводят в крайнее верхнее положение в движении  $\Pi_1$ , движение  $B_4$  заготовки прекращают и одновременно ей сообщают движение  $B_1+B_3$ , превышающее угловую скорость транспортирования  $B_1$  долбяка относительно центра  $O$  на угловую скорость позиционирования  $B_3$ . В итоге на участке  $DE$  заготовка уходит от долбяка, и при достижении позиции загрузки-выгрузки  $E$  останавливается, где производят замену обработанного колеса новой заготовкой. За время смены заготовки долбяк в движении  $B_1$  проходит позицию  $E$  и обгоняет заготовку. Затем цикл обработки повторяется.

Рассмотренный способ позволяет одновременно обрабатывать несколько заготовок за счет последовательного перемещения по концентрическим окружностям относительно центра  $O$  нескольких пар долбяк – заготовка. Допустим, например, что приведенная на рисунке 4.5 схема является мгновенным положением четырех пар долбяк – заготовка. Тогда мож-

но утверждать, что на позиции  $E$  устанавливается очередная заготовка, на участках  $AC$  и  $CD$  две заготовки проходят зону обработки, а на участке  $DE$  еще одна заготовка после окончания ее обработки в позиции  $D$  перемещается в зону загрузки-выгрузки  $E$ . При увеличении диаметров концентрических окружностей, по которым совместно перемещаются пары долбяк – заготовка, количество таких пар может быть увеличено.

Данный способ при использовании одной пары долбяк – заготовка по производительности равнозначен рассмотренному ранее способу зубодолбления с касательным врезанием (см. рисунок 1.6). Вместе с тем он сложнее, так как содержит в кинематической структуре дополнительную составляющую, осуществляющую транспортирование пары долбяк – заготовка. При использовании  $n$  пар данный способ представляет собой совокупность  $n$  способов, включающих по одной паре долбяк – заготовка, объединенных общей транспортирующей составляющей кинематической подсистемы. Увеличение производительности в  $n$  раз в этом случае обеспечивается за счет объединения  $n$  одинаковых способов, а следовательно и зубодолбежных станков с касательным (дуговым) врезанием в одном объекте (на общем роторе, несущем  $n$  одинаковых зубодолбежных станков).

Рассмотренный способ зубодолбления при непрерывном транспортировании  $n$  пар долбяк – заготовка создает условия для последовательно-параллельной обработки зубчатых колес. Это обстоятельство обеспечивает некоторое увеличение производительности обработки по сравнению с  $n$  отдельных одинаковых зубодолбежных станков. При этом увеличение производительности будет тем выше, чем больше на общем роторе одинаковых станков.

Математическая модель кинематической подсистемы при одной паре долбяк – заготовка есть множество:

$${}^{\kappa}M = (JU E)_O \cup (JJU E)_H \cup \{(JJU E)_{Bp} \cap (JU E)_{Пз}\} \cup (JU E)_{Tp} \cup (JU E)_{Bc},$$

Функция этой подсистемы:

$${}^{\kappa}F = \{\{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C-H^K, \{\Phi_O(\downarrow\Pi_1), \Phi_H(B_2B_3), Bp(B_7B_4), Пз(B_7+B_8), \\ \wedge Tp(B_7), / Bc(\downarrow\Pi_6)\}\}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен 12.

Базирующая подсистема есть множество

$${}^{\sigma}M = \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma}M_i.$$

Функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема.

Математическая модель кинематической подсистемы при  $n$  пар долбяк – заготовка есть множество:

$${}^k M = n \{ (J \cup E)_O \cup (JJ \cup E)_H \cup \{ (JJ \cup E)_{Bp} \cap (J \cup E)_{Пз} \} \cup \\ \cup (J \cup E)_{Tp} \cup n (J \cup E)_{Bc}.$$

Функция этой подсистемы:

$${}^k F = \{ n \{ M_{Э} \}_K, H^C - H^K, n \{ \Phi_O(\downarrow \Pi_1), \Phi_H(B_2 B_3), Bp(B_7 B_4), Пз(B_7 + B_8) \}, \wedge \\ \wedge Tp(B_7), /n \{ Bc(\downarrow \Pi_6) \} \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы равен  $12n+1$ . Базирующая подсистема есть произведение  $n$  одинаковых множеств

$${}^o M = n \left\{ \bigcup_{i=1}^3 {}^o M_i \right\}.$$

Коэффициент сложности базирующей подсистемы равен  $3n$ .

Следует также отметить, что этот способ открывает возможность создания абсолютно нового по компоновке роторного зубодолбежного станка для крупносерийного и массового производства зубчатых колес. Вместе с тем проектирование такого станка на основе механических связей представляется нецелесообразным.

#### 4.4 Принцип изменения правил выполнения приемов

Принцип изменения правил выполнения отдельных приемов широко распространен при различных видах обработки, в том числе формообразующей для достижения конкретных целей. Например, для обеспечения стабильности или оптимизации процесса повышение качества поверхностного слоя или прочности соединения прибавляемого материала с основным материалом твердого тела, снижения размерного износа инструмента или энергоемкости процесса. Характерной особенностью  $S$ -систем, полученных на основе этого принципа, является изменение обобщенного параметра состояния компонент внутренней среды первообразного способа. Примерами таких  $S$ -систем могут служить способ соединения двух керамических материалов по авторскому свидетельству [36], способ электро-

эрозионной обработки по авторскому свидетельству [37], способ электронно-лучевой обработки по авторскому свидетельству [38], способ электрохимического шлифования по авторскому свидетельству [39] и др.

Менее распространен принцип изменения правил выполнения приемов в формообразующей обработке посредством механического резания. Рассмотрим возможности его применения в области обкатного зубодолбления.

Выше были рассмотрены три первообразных способа: зубодолбление при радиальном врезании (см. рисунок 1.1), при касательном врезании (см. рисунок 1.6) и зубодолбление по роторной схеме (см. рисунок 4.5). Дальнейшее развитие процесса зубодолбления идет в направлении введения в структуру первообразных способов дополнительных приемов и изменения правил выполнения отдельных приемов этих способов. При этом в качестве цели выступает, как правило, или увеличение производительности, или повышение периода размерной стойкости долбяков.

Для всех способов зубодолбления с радиальным врезанием (см. рисунок 1.1), путь врезания превышает на величину безударного перебега высоту зуба нарезаемого колеса. При зубодолблении с касательным врезанием (см. рисунок 1.6) этот путь существенно возрастает, и его величина без учета безударного перебега определяется по формуле [40]

$$h = m \sqrt{2(Z_1 + z_{II}) + 4},$$

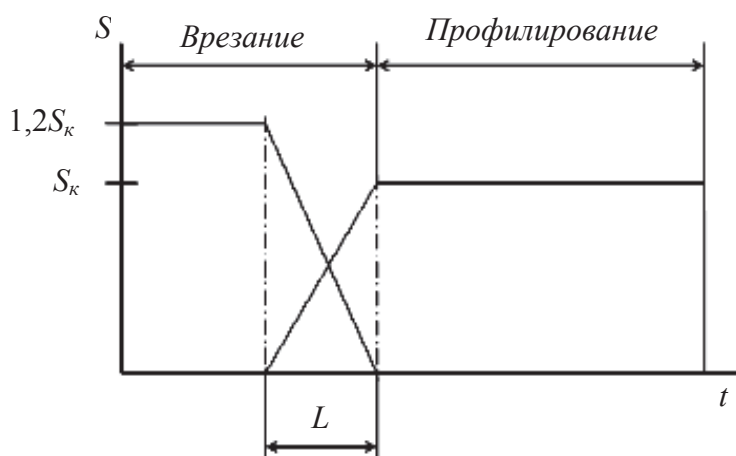
где  $h$  – путь врезания, мм;  $m$  – модуль, мм;  $z_1$  и  $z_{II}$  – число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка.

Из приведенного выражения видно, что при касательном врезании путь врезания возрастает как при увеличении числа зубьев нарезаемого колеса, так и при увеличении числа зубьев долбяка. Вполне естественна следующая производная цель – уменьшение машинного времени врезания.

Рассмотрим возможные варианты достижения данной цели. По сложившейся традиции врезание осуществляют одновременно с обкатом. Причем подачу врезания устанавливают 0,1...0,3 значения круговой подачи. Следовательно, процесс зубодолбления на этапе врезания осуществляется при суммарной подаче, значение которой при касательном врезании составляет 1,1...1,3 значения круговой подачи. Считая, что суммарная подача на этапе врезания лимитирует технологическую надежность станка, можно уменьшить машинное время выполнения этого этапа посредством последовательного выполнения врезания и обката, установив значение подачи врезания, равное суммарной подаче, например, среднее ее значение, составляющее 1,2 значения круговой подачи.

Расчеты показывают, что при нарезании зубчатых колес с числом зубьев от 20 до 120 долбяком с числом зубьев, равным 50, машинное время обработки уменьшается в 1,2...1,7 раза. Причем эффект уменьшения машинного времени возрастает с увеличением числа зубьев нарезаемого колеса.

При использовании способа зубодолбления при последовательном выполнении касательного врезания и обката (профилирования) в структуре соответствующего станка в момент прекращения движения врезания и включения движения профилирования в цепи обката происходит натяжение кинематических передач под воздействием силы резания. В итоге происходит круговое смещение долбяка относительно нарезаемого колеса на величину, пропорциональную суммарной круговой податливости передач, следствием чего является заужение (утонение по толщине) последнего нарезаемого зуба. Устранить это, как правило, нежелательное явление можно следующим образом (рисунок 4.6).



**Рисунок 4.6. – Правило выполнения подач при зубодолблении с касательным врезанием**

Необходимо движение касательного врезания на протяжении  $2/3...3/4$  пути осуществлять с подачей  $1$ , составляющей  $1,2$  значения круговой подачи  $S_K$ . Затем на участке  $L$  подачу врезания регрессивно уменьшают, а круговую подачу  $2$  прогрессивно увеличивают так, что суммарная подача сохраняется постоянной. К моменту окончания касательного врезания круговая подача увеличивается до значения  $S_K$ , а подача касательного врезания уменьшается до нулевого значения.

В данном варианте по сравнению с предшествующим несколько увеличивается время выполнения этапа врезания. Вместе с тем этот вариант обеспечивает повышение точности получаемых зубчатых колес.

#### 4.5. Принцип совмещения исполнительных движений

Совмещение исполнительных движений позволяет уменьшить общее количество движений, необходимое для формообразования обрабатываемых поверхностей. Это упрощает способ обработки и, как следствие, кинематическую структуру станка. На этом принципе основаны первообразные способы обкатной обработки зубчатых колес, когда образование профиля зубьев осуществляют движением обката. Характерным для данных способов обработки является совмещение сложного движения профилирования зубьев с простым движением деления и обеспечение на этой основе непрерывности процесса зубонарезания.

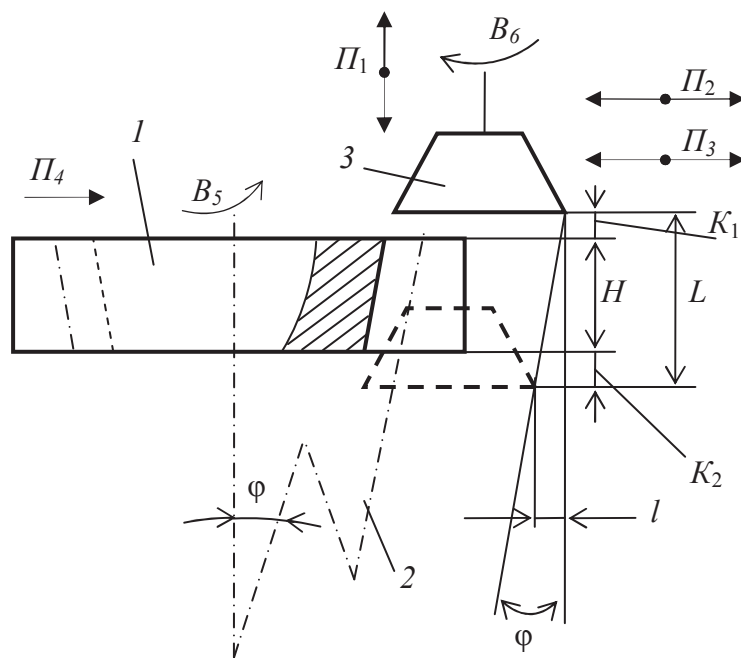
Для нарезания цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями зуборезными долбьяками используется способ зубодолбления, согласно которому инструмент (или заготовку) устанавливают под углом к оси заготовки (или к оси инструмента), равным углу наклона нарезаемых зубьев. Такое решение реализуется посредством изменения компоновки станка на этапе конструирования. Изменение компоновки снижает коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубодолбежных станков, так как их наладка на обработку традиционных зубчатых колес или переналадка на иной угол наклона зубьев проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу при обработке колес с наклонными зубьями.

На рисунке 4.7 приведена схема способа зубодолбления колес с наклонными зубьями [41]. Для обработки заготовку 1 устанавливают в исходное положение относительно долбяка 3. Причем начальное и конечное положение долбяка в движении  $P_1$  устанавливают с учетом параметра пути  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов долбяка. Для воспроизведения линии зуба на делительном конусе 2 долбяку 3 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубодолбления с линией зуба на цилиндре поступательно-возвратное движение  $\downarrow P_1$  скорости резания и дополнительное радиальное равномерное движение  $\downarrow P_2$ , синхронное с движением  $\downarrow P_1$ . Причем путь дополнительного движения  $\downarrow P_2$  рассчитывается по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $l$  – путь дополнительного движения  $P_2$ , мм;  $L$  – путь поступательно-возвратного движения  $\downarrow P_1$ , мм;  $\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе обработки колес с наклонными зубьями линия зуба должна воспроизводиться сложным двух-элементарным движением  $\Phi_O \uparrow (\Pi_1 \Pi_2)$  скорости резания. При этом движения обката  $\Phi_H (B_5 B_6)$ , врезания  $Bp (\Pi_4)$  и отвода («отскока») долбяка  $Bc (\uparrow \Pi_3)$  при его холостом ходе в движении  $\Phi_O$  остаются такими же как у классического (первообразного) способа зубодолбления.



**Рисунок 4.7. – Способ долбления цилиндрических колес с наклонными зубьями**

Элементарные движения  $\uparrow \Pi_1$  скорости резания,  $B_6$  круговой подачи и  $\Pi_4$  подачи врезания являются нормируемыми характеристиками процесса зубодолбления. Функциональную связь дополнительного радиального равномерного движения  $\uparrow \Pi_2$  с нормируемым движением  $\uparrow \Pi_1$  устанавливают на основе известного в станковедении правила составления расчетных перемещений исполнительных органов расчетных кинематических (структурных) цепей:

*L мм перемещения долбяка в движении  $\Pi_1 \rightarrow l$  мм перемещения долбяка в движении  $\Pi_2$ .*

При обработке долбяку 3 сообщают движение скорости резания  $\Phi_O \uparrow (\Pi_1 \Pi_2)$  и движение отвода  $Bc (\uparrow \Pi_3)$ , а заготовке 1 – движение врезания



$Vp(\Pi_4)$  на высоту зуба нарезаемого колеса. Затем заготовке и долбяку сообщают движение обката  $\Phi_H(B_5 B_6)$ . В результате сообщения долбяку и заготовке указанных движений долбяк воспроизводит линию зуба (образующую) по делительному конусу 2, которая переносится по профилю зуба (направляющей). В итоге на заготовке образуется зубчатый венец с наклонными зубьями.

В данном способе зуборезный долбяк в радиальном направлении по циклу обработки совершает элементарное движение  $\downarrow\Pi_2$ , входящее в сложное формообразующее движение  $\Phi_v\downarrow(\Pi_1\Pi_2)$ , и элементарное вспомогательное движение  $\downarrow\Pi_3$ . Элементарные движения  $\downarrow\Pi_2$  и  $\downarrow\Pi_3$  выполняют синхронно с движением  $\Phi_v\downarrow(\Pi_1\Pi_2)$  и, следовательно, синхронно между собой. Названные элементарные движения различаются только параметром траектории. Следовательно, используя особенности тягового вала кинематической группы зубодолбежного станка, воспроизводящей движение  $Vc(\downarrow\Pi_3)$ , можно использовать кулачок тягового вала этой группы одновременно как физический программноситель траектории движения  $\downarrow\Pi_2$  и не вводить дополнительную структурную составляющую в кинематическую подсистему первообразного способа зубодолбления и, следовательно, при разработке кинематической схемы соответствующего станка не преобразовывать группу скорости резания  $\Phi_v(\downarrow\Pi_1)$  базовой модели станка в сложную группу  $\Phi_v\downarrow(\Pi_1\Pi_2)$ , характерную для рассматриваемого способа.

Таким образом, при совмещении формообразующего движения  $\downarrow\Pi_2$  и вспомогательного движения  $\downarrow\Pi_3$  в рассматриваемом способе обеспечивается повышение коэффициентов мобильности и универсальности при сохранении коэффициента сложности первообразного способа зубодолбления.

Для сравнения приведем математическое описание кинематической подсистемы первообразного и рассматриваемого способов зубодолбления.

Первообразный способ:

$${}^K M = (JUE)_O \cup (JJUE)_H \cup (JUE)_{Bp} \cup (JUE)_{Bc}.$$

$${}^K F = \{ \{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C-H^K, \{ \Phi_O(\downarrow\Pi_1), \Phi_H(B_5 B_6), Vp(\Pi_4), /Vc(\downarrow\Pi_3) \} \}.$$

Рассматриваемый способ:

$${}^K M = [(JJUE)_{\Phi} \cap (JUE)_{Bc}]_O \cup (JJUE)_H \cup (JUE)_{Bp}.$$

$${}^K F = \{ \{M_{\mathcal{E}}\}_K, H^C-H^K, \{ \Phi_O[\downarrow\Pi_1(\downarrow\Pi_2 \cap \downarrow\Pi_3)], \Phi_H(B_5 B_6), Vp(\Pi_4) \} \}.$$

Рассмотренное совмещение формообразующего и вспомогательного движений на примере зубодолбления с радиальным врезанием без измене-

ний можно использовать также в рассмотренных ранее способах зубодобления с касательным врезанием. Естественно эффект от этого будет таким же, как и в рассмотренном способе.

Ряд способов формообразующей обработки, предложенных на основе использования принципа совмещения исполнительных движений, можно найти в описаниях изобретений по авторским свидетельствам и патентам.

#### 4.6. Принцип согласования ритмов физического воздействия на заготовку

Объединим рассмотренные ранее способ планетарного точения (см. рисунок 3.12) и способ точения с наложением электростатического поля (см. рисунок 3.7). Получим комбинированный способ формообразующей обработки, обеспечивающий суммирование эффектов, получаемых объединяемыми способами по отдельности, то есть надежное стружкодробление и повышение периода размерной стойкости инструмента. По этому способу (рисунок 4.8) по кругу относительно общего шпинделя  $I$  устанавливаются несколько заготовок  $2$ .

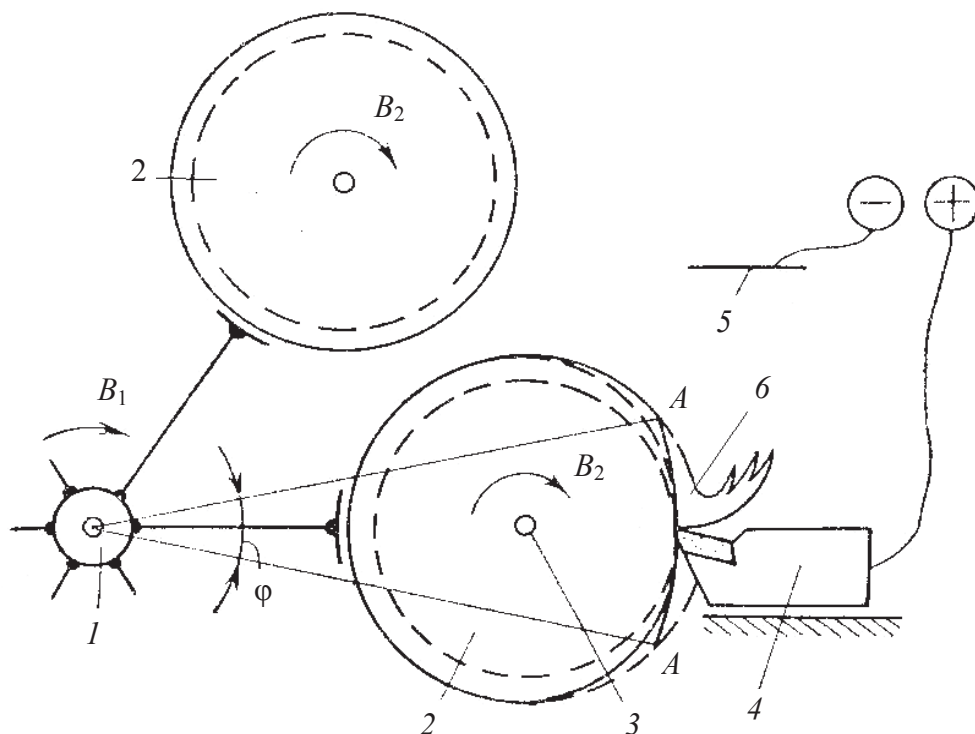


Рисунок 4.8. – Способ планетарного точения с наложением электростатического поля

Процесс обработки осуществляют, сообщая заготовкам 2 вращение  $B_2$  вокруг собственных осей 3 и вращение  $B_1$  вокруг оси шпинделя 2, а резцу 4 – движение  $П_3$  в направлении продольной подачи (на схеме не показано). Одновременно между резцом и изолированной металлической пластиной 5 создают внешнее электростатическое поле, противонаправленное электродвижущей силе собственного поля среды резания.

При указанном характере воздействия на заготовки резцом и электростатическим полем припуск  $b$  срезается в виде слоев  $A-A$ , равномерно расположенных по сечению заготовок, соответствующих углу  $\varphi$  в переносном движении  $B_1$ . В то же время внешнее электростатическое поле создается между резцом 4 и пластиной 5 постоянно. Таким образом, процессы срезания припуска и дополнительного электростатического воздействия на среду резания имеют различный ритм. В периоды, когда припуск не срезается, происходят непроизводительные затраты энергии на создание внешнего электростатического поля. Устранить их, то есть снизить энергоемкость процесса обработки, можно согласованием ритмов силового и электростатического воздействия на материал заготовки. Для этого необходимо внешнее электростатическое поле создавать только на периоды срезания припуска с заготовок. При этом форма напряжения электростатического поля может быть различной, например, прямоугольной или в виде полуволны синусоиды и т.п.

Данный комбинированный способ точения отличается от сборного прототипа синхронизацией электростатического воздействия на среду резания с периодами срезания припуска. Этот способ с большой степенью вероятности мог быть признан изобретением при подаче соответствующей заявки до разглашения его в открытой печати [14].

В приведенном примере для достижения цели осуществляется согласование ритмов физического воздействия двух компонент энергетической подсистемы способа обработки.

В ряде способов формообразующей обработки, содержащих однокомпонентную энергетическую подсистему, для увеличения периода размерной стойкости инструмента осуществляется согласование ритмов формообразующих движений. В частности, такое согласование рационально применять для устранения явления затирания, возникающего при зубообработке в условиях обката инструментами, совершающими поступательно-возвратное движение, например, при долблении зубчатых колес и зубчатых реек долбяком, долблении колес зубчатой рейкой, строгании конических колес резцами. Ниже, в разделе, посвященном эволюции множества спосо-

бов нарезания зубчатых колес зуборезными долбьяками, будет рассмотрена природа возникновения явления затирания, влияние этого явления на износ инструмента и пути его устранения посредством согласования ритмов формообразующих движений: скорости резания и круговой подачи.

Приведенные примеры использования принципа согласования ритмов энергетического воздействия на заготовку или ритмов исполнительных движений (воздействий) позволяют создавать новые способы формообразующей обработки с качественно иной структурой и функцией по сравнению с исходными (первообразными) способами. Это позволяет утверждать, что принцип поиска на основе анализа и согласования ритмов физических воздействий в способах получения реальных поверхностей может быть использован для создания технических новаций, обеспечивающих решение конкретных производных задач.

#### **4.7 Различимость способов формообразующей обработки**

Из определения понятия способа формообразующей обработки следует, что одинаковые способы невозможны. Все известные и возможные новые способы обработки различны. Причем мера их различимости даже в пределах одной группы, полученной на основе одного и того же первообразного способа посредством соответствующих изменений приемов, их последовательностей и правил выполнения, будет также различна. При системном анализе способов формообразующей обработки было показано, что абсолютное большинство  $S$ -систем на первом уровне разбиения может быть представлено в виде объединения трех подсистем: кинематической, базирующей и энергетической. Незначительную группу составляют  $S$ -системы, содержащие в своей структуре еще и подсистему стабилизации силового параметра.

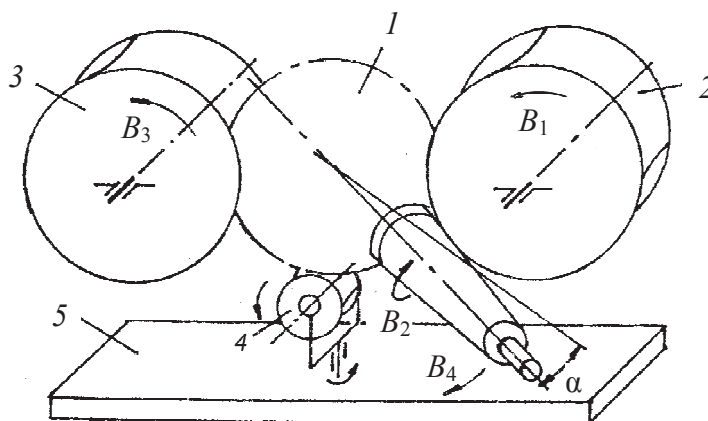
Энергетическая подсистема воспроизводит внутреннюю среду  $S$ -системы, определяющую природу физического воздействия на твердое тело при формообразующей обработке. Внутренняя среда  $S$ -систем содержит не менее одной компоненты. Одна из компонент внутренней среды – силовое воздействие – обычно воспроизводится кинематической подсистемой, другие составляющие энергетической подсистемы, как правило, не имеют общих элементов с кинематической подсистемой. Как было показано ранее, энергетическая подсистема может выполнять функцию не только кинематической, но и базирующей подсистемы. Это позволяет рассматривать энергетическую подсистему в качестве основного подмножест-

ва  $S$ -систем. Отсюда первый наиболее общий уровень различимости способов формообразующей обработки – по виду физического воздействия на твердое тело заготовки.

В пределах одного и того же вида физического воздействия посредством кинематической подсистемы воспроизводится поверхность заданной формы. При этом поверхность конкретной геометрической формы может быть получена различными по структуре кинематическими подсистемами, что объясняется большим разнообразием характеристических образов инструментов и еще большим числом классов и подклассов геометрического образования поверхностей. Отсюда – следующий, достаточно общий, уровень различимости способов формообразующей обработки в пределах любого отдельного вида или произвольной совокупности видов физического воздействия определяется классом характеристического образа инструмента и классом или подклассом геометрического воспроизведения поверхности.

По сложившейся традиции, как в технической, так и в патентной литературе описание любого способа формообразующей обработки обычно поясняется схемой взаимодействия объектов – инструмента и заготовки. Как правило, она иллюстрирует принцип получения геометрической формы поверхности и исходную ориентацию заготовки относительно инструмента, то есть кинематическую и базирующую подсистемы.

На рисунке 4.9 приведена схема способа чистовой обработки поверхностей пластическим деформированием шаровых поверхностей большого диаметра [41].



**Рисунок 4.9. – Способ обкатки сферической поверхности с самоподачей**

Шаровую поверхность детали 1 размещают между ведущим 2, поджимным 3 и опорным 4 роликами, которые обеспечивают ориентацию

(базирование) и вращение детали. Для осуществления подачи по периметру обкатываемой поверхности цапфа детали размещается на опоре 5 под некоторым углом  $\alpha$  к плоскости осей деформирующих роликов 2 и 3. Затем при сообщении вращения  $V_1$  ведущему ролику 2 деталь 1 получает наряду с вращением обкатки  $V_1$  еще и круговую подачу  $V_4$ , скорость которой зависит от диаметра ведущего ролика и угла наклона цапфы детали на опоре 5. В результате такого целенаправленного воздействия роликов на деталь происходит обработка поверхностным пластическим деформированием (обкаткой) ее сферической поверхности.

Внутренняя среда способа содержит одну компоненту – силовое воздействие роликов на обкатываемую поверхность. Кинематическая подсистема способа по сравнению с аналогичной подсистемой первообразного способа, имеющего отдельную структуру движения подачи, упрощена посредством расположения оси детали под некоторым углом к плоскости осей накатных роликов. При такой ориентации детали скорость ее самоподачи есть функция скорости вращения ведущего ролика, его диаметра и угла наклона оси детали. В этом сущность новизны способа.

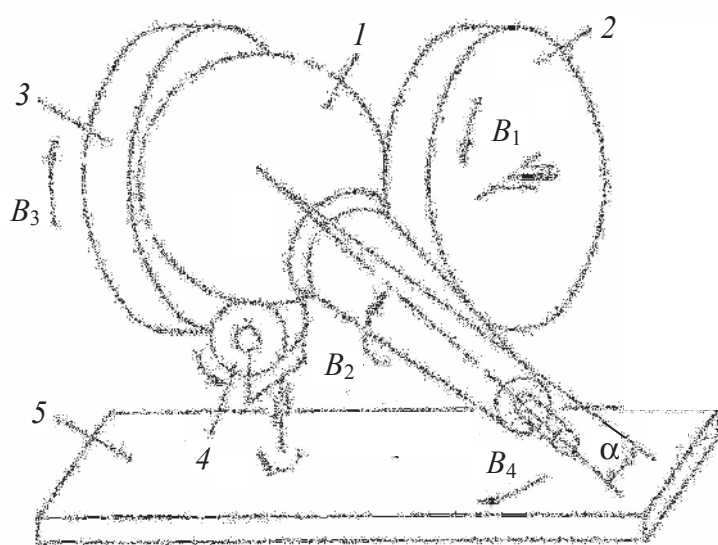
Возможно несколько модификаций вспомогательного элемента инструмента (рабочей поверхности накатных роликов). При этом вспомогательный элемент инструмента может иметь форму дуги окружности, радиус которой несколько больше или равен радиусу обкатываемой сферы. Он может быть также очерчен дугами двух окружностей, радиус внутренней дуги равен радиусу обкатываемой сферы, радиус внешней дуги – несколько больше радиуса сферы. В общем случае характеристический образ инструмента (комплект из двух накатных роликов) есть декартово произведение

$$P = \{M_{Э1} \times M_{Э2}\},$$

где  $M_{Э1}$  и  $M_{Э2}$  – соответственно мощность образующей и направляющей вспомогательного элемента отдельного ролика.

По патентным источникам известны еще два способа обкатки сферической поверхности большого диаметра с самоподачей. По способу, представленному на рисунке 4.10 [43], шаровую поверхность детали 1 также размещают между роликами 2, 3, 4. Для осуществления самоподачи цапфу детали располагают на опоре 5 под углом к плоскости осей роликов 2 и 3. При сообщении вращения  $V_1$  ведущему ролику 2 деталь 1 получает вращение обкатки  $V_2$  и круговую самоподачу  $V_4$ . В итоге производится чистовая обработка (обкатка) ее сферической поверхности.

Новизна способа по сравнению с предыдущим заключается в том, что вспомогательные элементы роликов – ведущего 2 и поджимного 3 – выполнены не на периферии, а на торце. Перенос вспомогательных элементов с периферии на торец роликов не изменил характеристического образа инструмента. Однако такой перенос обеспечил достижение производной цели – повышение безопасности процесса обработки при снижении требования к точности расположения центра обрабатываемой сферы относительно плоскости осей ведущего и поджимного роликов. По существу именно достижение этой цели обеспечило признание данной технической идеи изобретением.



**Рисунок 4.10. – Способ обкатки сферической поверхности торцом роликов**

На рисунке 4.11 [44] показана схема способа, по которому шаровую поверхность детали 6 также размещают между тремя роликами 1, 3, 4. Цапфу детали для осуществления самоподачи размещают на опоре 5 также как и в предшествующих примерах. При сообщении вращательного движения  $B_1$  ведущему ролику 1 деталь получает движение  $B_2$  обкатки и движение  $B_4$  самоподачи.

Новизна данного способа по сравнению с представленным на рисунке 4.9 заключается в том, что ведущий ролик 1 выполнен в виде кольца, а его вспомогательный элемент расположен не на периферии, а на внутренней цилиндрической поверхности. Такой перенос вспомогательного элемента не изменил его характеристический образ. Однако перенос вспомогательного элемента на внутреннюю цилиндрическую поверхность обеспечил увеличение зоны контакта характеристического образа инстру-

мента с обкатываемой поверхностью. Это обстоятельство позволяет осуществлять обкатку поверхности при большом угле  $\alpha$  размещения цапфы на опоре 5, что обеспечивает повышение производительности обкатки сферы. Обеспечивается также повышение безопасности процесса обработки.

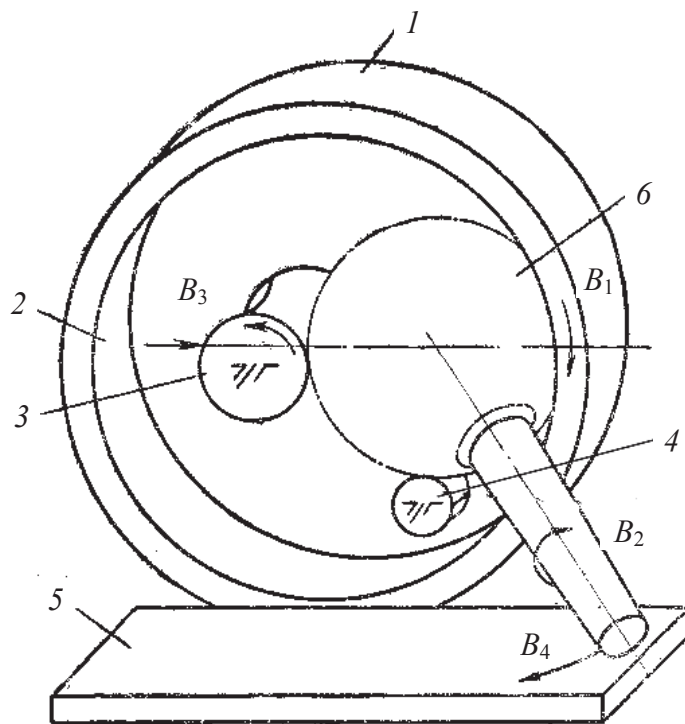


Рисунок 4.11. – Способ обкатки сферы

Рассмотренные способы обкатки сферической поверхности большого диаметра по своей структуре и принципу функционирования эквивалентны. Комбинированный класс (подкласс) образования поверхности  $H^k-H^c * E$ .

Характерная особенность этих способов обкатки сферической поверхности большого диаметра – перенос функции базирующей подсистемы на характеристический образ инструмента:

$$P = \{M_{Э1} \times M_{Э2}\} \cap {}^B M^{1-6}.$$

Комплект баз аналогичен комплекту баз способа бесцентрового врезного шлифования и представляет собой множество:

$${}^B M = \{{}^B M^{1-4}, {}^B M^5, {}^B M^6\}.$$

Коэффициент сложности базирующей подсистемы  $C_B = 0$ . Опорные точки базирующей подсистемы, каждая из которых символизирует одну из шести связей заготовки с системой координат, в процессе обкатки син-



хронно перемещаются по обрабатываемой сферической поверхности. Уместно заметить, что ГОСТ 21495-76, используемый в технологии машиностроения, базирование изделий (заготовок) обрабатываемых в условиях самоподачи не рассматривает.

Кинематическая подсистема и ее функция есть множества

$${}^K M = (J J U E)_H^K \cup (J U E)_H^C * E;$$

$${}^K F = \{ \{ M_{Э1} \times M_{Э2} \}, H^K - H^C * E, \Phi_O(B_1 B_2), \Phi_H(B_4) \}.$$

Коэффициент сложности кинематической подсистемы  $C_K = 5$ .

Математическая модель рассмотренных способов обкатки сферических поверхностей большого диаметра есть множество

$${}_1 S_S = \{ \{ {}^K M \cap {}^Э M, {}^B M^{1-6} \cap P \}, \{ F \}_3 \}.$$

Сравнивая описания этих способов на различных языках: вербальном (функциональное описание способа и его логической формулы изобретения); графическом в виде схемы взаимодействия объектов; математическом в виде множества подсистем, составляющих способ, – несложно заметить, что они различимы только на уровне графического представления.

Перенос вспомогательного элемента с одной поверхности инструмента на другую известен также и в других группах способов формообразующей. Например, в значительном многообразии способов обработки самовращающимися резцами, признанных в разное время изобретениями, передняя поверхность, несущая вспомогательный элемент (режущую кромку), расположена или на торце чашки инструмента, или на его конической периферии, или выполнена в виде винтовой поверхности. В этом многообразии способы обработки также различимы, как правило, на уровне графического изображения.

На рисунке 4.12 показаны возможные схемы способов нарезания резьбы резцом, профиль которого соответствует профилю впадины резьбы. По первой наиболее распространенной пионерной схеме (рисунок 4.12, а) при нарезании резьбы заготовке 1 сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – продольное перемещение  $P_2$ . Приоритет этого способа подтверждается патентами, полученными английским механиком Г. Мондсли в 1798 году (токарно-винторезный станок со сменными ходовыми винтами) и в 1800 году (токарно-винторезный станок с двухколесной гитарой сменных зубчатых колес). Другие схемы получены посредством перераспределения элементарных движений  $B_1$  и  $P_2$  между заготовкой и резцом.

Для приведенных схем характеристический образ инструмента, класс образования резьбы и условия базирования заготовки одинаковы. Образующая винтовой поверхности по каждой схеме воспроизводится копированием, а направляющая – одним и тем же сложным формообразующим движением  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ . Структура кинематической подсистемы для каждой из схем также одинакова и описывается формулой, воспроизводящей направляющую  ${}^kM = {}^kM_n$ , а ее функция есть множество

$${}^kF = \{\{E\}_1, E-H^c, \Phi_H(B_1\Pi_2)\}.$$

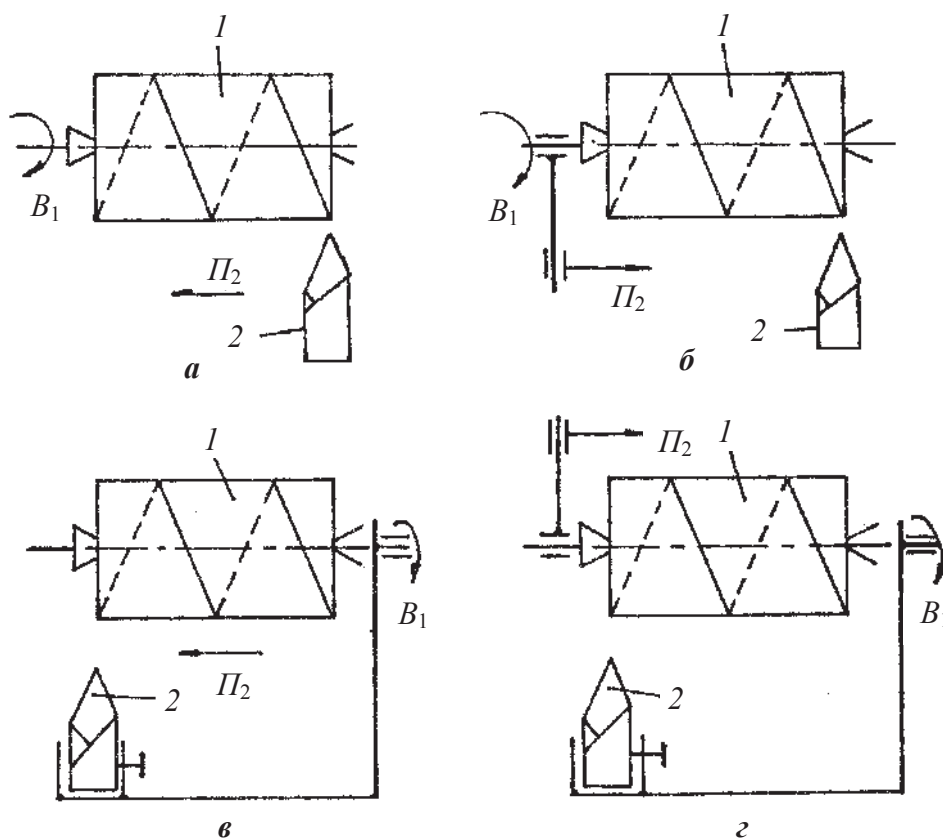


Рисунок 4.12. – Способы нарезания резьбы фасонным резцом

Вместе с тем каждая схема имеет область предпочтительного использования. Так, первая схема (рисунок 4.12, а) наиболее распространена в универсальных токарно-винторезных станках, вторая (рисунок 4.12, б) положена в основу прецизионных высокоточных станков, третья (рисунок 4.12, в) применяется в тяжелых станках, а четвертая (рисунок 4.12, г) еще не используется. Причем такое распределение областей предпочтительного использования рассмотренных схем (способов) имеет вполне определенную для каждого конкретного варианта цель, например: возможность создания

универсального станка токарной группы, создания специализированного высокоточного резьбообрабатывающего станка или улучшения динамических характеристик специализированного тяжелого станка.

Таким образом, в рассмотренном примере перераспределение движений между заготовкой и инструментом, обеспечивающее достижение дополнительной (производной) цели, позволяют утверждать, что схемы, представленные на рисунке 4.12 (б, в, г), иллюстрируют относительно новые способы нарезания резьбы резцом, производные от пионерного способа, представленного схемой 4.12, а. Вполне вероятно, что способы по рисунку 4.12 (б, в) в разное время были защищены соответствующими авторскими свидетельствами или патентами.

Способы нарезания резьбы резцами могут также содержать в своей структуре подсистему стабилизации силового параметра. В этом случае их функция есть множество

$${}_1F_S = \{E\}_1, E-H^C, \{(^K M_H \cap {}^C M) \cap {}^Э M\} \cup {}^B M.$$

Естественно, подобное схемное перераспределение движений между заготовкой и инструментом возможно также и для других способов формообразующей обработки. При этом чем большее число элементарных движений составляет структуру способа, тем больше возможных технических (схемных) решений.

Из определения способа обработки как целенаправленной  $S$ -системы следует, что целенаправленное изменение последовательности приемов или правил их выполнения приводит к созданию новых способов обработки. При этом схема взаимодействия заготовки и инструмента производных способов неразличима со схемой первообразного способа. Вместе с тем производные способы имеют качественно и количественно иную структуру и функцию, что обеспечивает скачкообразное достижение качественно нового эффекта, недостижимого при использовании исходного способа в любой конкретной ситуации. Поэтому названные общие принципы получения новых способов обработки характеризуют вполне определенный уровень различимости способов в пределах конкретных групп  $S$ -систем. В этом случае каждый новый способ может иллюстрироваться схемой первообразного способа. Данный тезис подтверждается, например, рассмотренными ранее группой способов зубодолбления с касательным врезанием и группой способов зубодолбления, обеспечивающих устранение явления затирания.

При воспроизведении конкретной геометрической поверхности возможны различные варианты базирования. Например, при нарезании цилин-

дрического зубчатого колеса в зависимости от длины его ступицы возможны две схемы базирования. Причем воспроизводятся они базирующими подсистемами, имеющими одинаковый коэффициент сложности (см. рисунок 3.3 и таблицу 3.2). Аналогично для установки цилиндрической заготовки при токарной обработке возможно использование трех различных базирующих подсистем, имеющих одинаковый коэффициент сложности.

При разработке конкретного технологического процесса выбор комплекта баз из совокупности возможных схем имеет принципиальное значение. Вместе с тем качественные различия отдельных комплектов баз при одном и том же коэффициенте сложности базирующей подсистемы несущественны с точки зрения структуры и принципа функционирования *S*-систем. Это позволяет для примеров, аналогичных приведенным, считать варианты базирующей подсистемы, имеющие одинаковый коэффициент сложности неразличимыми в *S*-системе.

При изложении методики системного описания базирующей подсистемы было показано, что известны способы обработки, в которых частично или полностью функцию базирующей подсистемы выполняет характеристический образ инструмента, что упрощает базирующую подсистему, в частности уменьшается ее коэффициент сложности. В данном случае изменение структуры базирующей подсистемы существенно с точки зрения структуры и функции *S*-системы. На этой основе *S*-системы при одинаковых энергетической и кинематической подсистемах, но при качественно различных базирующих подсистемах, имеющих ту или иную вполне определенную функциональную связь с характеристическим образом инструмента, будем считать различимыми на уровне базирующей подсистемы.

Понятие о различимости способов формообразующей обработки вытекает из определения способа как технической целенаправленной *S*-системы. Из изложенного также следует, что характер различимости *S*-систем на разном уровне требует разной детализации системы или составляющих ее подсистем. Например, на высшем уровне, характеризующемся видом физического воздействия, детализация системы, по существу, не требуется. Вместе с тем, например, на уровне изменения правил выполнения отдельных приемов требуется достаточно подробная детализация энергетической или кинематической подсистем для выявления различия между *S*-системами, представляющими группу способов, для иллюстрации которых используется одна и та же схема взаимодействия инструмента и заготовки. Такой многоуровневый подход к различимости *S*-систем позволяет применять его при анализе, синтезе и классификации способов формообразующей обработки.

# 5 КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

## 5.1 Методика классификации

В данном разделе рассматривается возможный вариант общей методики классификации способов формообразующей обработки поверхностей деталей (изделий) различного вида. В основу построения такой схемы положен принцип многоуровневого описания технических систем, при котором на каждом последующем уровне для конкретизации общей схемы включаются новые признаки.

При разработке общей схемы не учитываются размеры получаемых в результате формообразующей обработки поверхностей, а также изменения макро- и микрогеометрии поверхностей и физико-химических свойств поверхностного слоя. Эти характеристики рационально рассматривать при количественном сравнительном анализе по конкретным параметрам качества различных групп способов, охватываемых общей схемой.

В технической литературе понятие формообразующей обработки ассоциируется с разрушением, изменением или возникновением связей в твердом теле (заготовке) в процессе обработки. Поэтому различают:

- способы обработки, основанные на удалении части материала с заготовки (механическое резание, физическое, химическое, комбинированное удаление материала),  $V_{изд} < V_{заг}$ ;

- способы обработки, основанные на формоизменении материала заготовки (литье, порошковая металлургия, пластическая деформация, послойный синтез и т.д.),  $V_{изд} = V_{заг}$ ;

- способы обработки, основанные на прибавлении материала к заготовке (наплавка, сварная сборка, склеивание и т.д.),  $V_{изд} > V_{заг}$ .

В приведенных определениях  $V_{изд}$  и  $V_{заг}$  – соответственно объем изделия (детали) и заготовки.

По существу в данном определении все многообразие технических решений (виртуальных идей) в области формообразующей обработки на высшем иерархическом уровне (рисунок 5.1) состоит из трех развивающихся множеств групп способов, отлич-

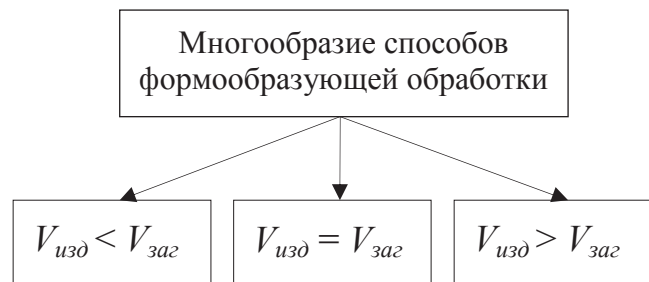
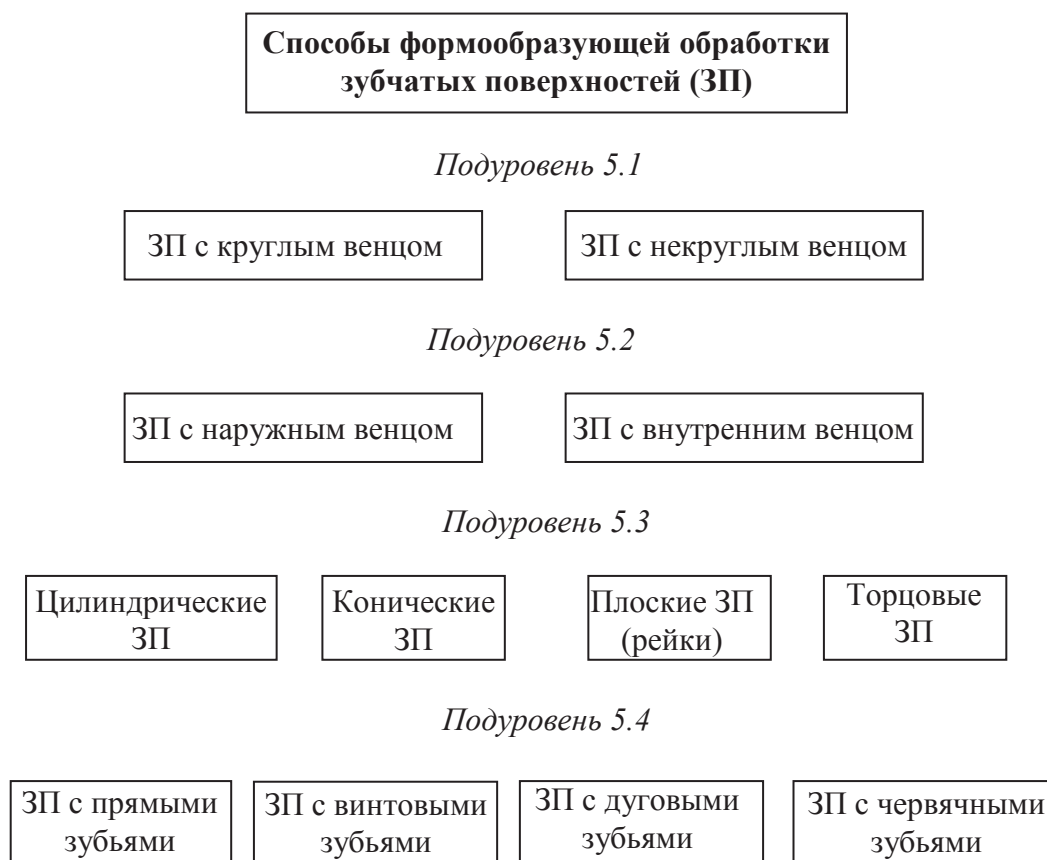


Рисунок 5.1. – Граф множества способов формообразующей обработки



товки. Тогда все известные и возможные новые способы обработки, составляющие эту часть (рисунок 5.2), на 2-м уровне будут различаться видом первичного воздействия на заготовку (или видом используемой энергии). На третьем уровне в пределах каждого вида или совокупности видов используемой энергии каждая группа способов разделяется на множества, различающиеся формой воспроизводимой поверхности, а на четвертом уровне – видом обрабатывающего инструмента, в том числе видом физического явления, используемого в качестве инструмента. На пятом уровне в зависимости от вида инструмента и вида используемой энергии многообразие способов обработки разбивается на виды, например, точение, фрезерование, шлифование, зубонарезание, лазерное резание, комбинированные виды обработки и т.п.

На нескольких последующих подуровнях способы обработки последовательно разбиваются на подгруппы, конкретизированные в пределах соответствующей формы воспроизводимой поверхности. Вероятно, наибольшее число подуровней содержат способы обработки зубчатых поверхностей (рисунок 5.3).



**Рисунок 5.3. – Схема классификации способов  
формообразующей обработки зубчатых колес**

На первом подуровне эта группа способов делится на способы для обработки поверхностей с круглым и некруглым венцом, на втором – для обработки зубчаток с наружным и внутренним венцом, на третьем – на способы, различающиеся по виду получаемых зубчаток (цилиндрических, конических, плоских, торцовых), на четвертом – на способы, различающиеся формой зуба по длине (с прямым, винтовым, дуговым, червячным зубом).

Теоретически группа способов формообразующей обработки зубчатых поверхностей, характеризующаяся удалением части материала заготовки, при использовании наиболее распространенного вида энергии (механическое резание) должна состоять из 64 подгрупп. В действительности таких подгрупп только 29. Объясняется это тем, что некоторые виды зубчаток непредставимы и, следовательно, не используются в машиностроении. Например, бесполезно торцовое колесо с некруглым или внутренним венцом. То же можно отметить и для зубчатой рейки.

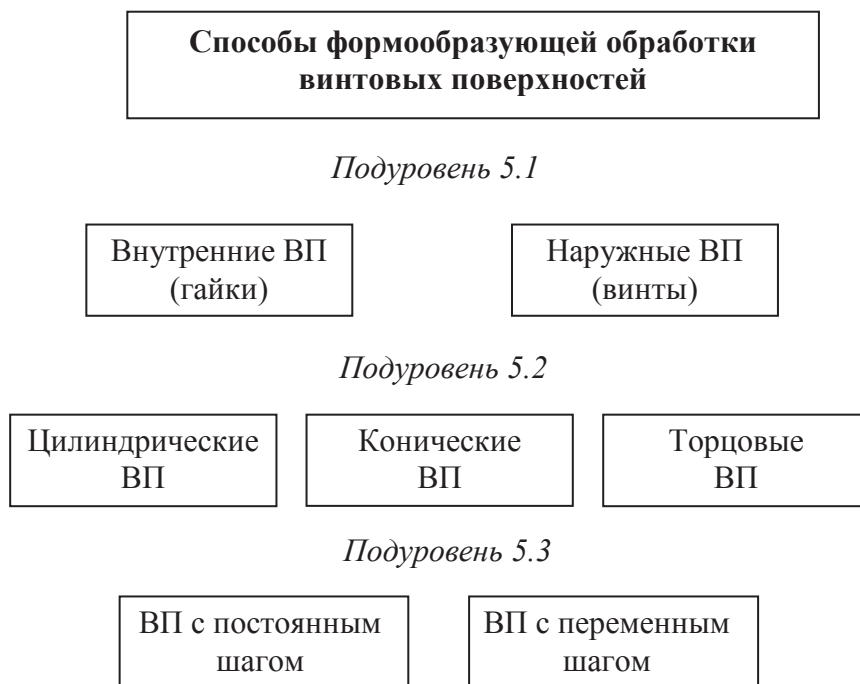
Выше было рассмотрено несколько способов обработки зубчатых колес зуборезным долбяком и червячной фрезой. В частности, пионерный способ зубодолбления и предложенный на его основе способ со стабилизацией силового параметра, то есть с адаптивным управлением. Рассмотрены также относительно новые способы обработки – зубодолбления цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями и способ зубофрезерования червячной фрезой таких же колес, признанные изобретениями (патенты Республики Беларусь).

На рисунке 5.4 приведены подуровни пятого уровня разбиения, позволяющие определить и классифицировать все возможные подгруппы способов формообразующей обработки винтовых поверхностей (ВП) при резании. На первом подуровне эта группа способов делится на способы для обработки внутренних и наружных ВП, на втором – для обработки цилиндрических, конических и торцовых ВП, на третьем – на способы для обработки ВП, с постоянным и переменным шагом. Теоретически возможны 12 подгрупп. В действительности таких подгрупп только 10, так как наружные и внутренние торцовые поверхности неразличимы.

Аналогично можно рассматривать подгруппы способов формообразующей обработки, входящие в другие группы пятого уровня. Сочетая группы и подгруппы этого уровня разбиения с признаками предшествующих уровней, получим все возможные группы и подгруппы способов формообразующей обработки. Элементарный подсчет показывает, что таких подгрупп несколько тысяч. Полученные таким образом подгруппы пред-



ставляют собой минимальные подсистемы способов формообразующей обработки. Каждая из них описывается строго определенным набором признаков, определяющих характер воспроизведения поверхностей определенной формы при условии использования конкретного вида или видов первичного воздействия на заготовку.



**Рисунок 5.4. – Схема классификации способов формообразующей обработки винтовых поверхностей**

Каждая подгруппа включает все известные и возможные новые способы формообразующей обработки, различающиеся между собой структурой и функцией. Отметим также, что уровень развития подгрупп различен. Например, по патентным источникам информации известно большое многообразие способов формообразующей обработки механическим резанием поверхностей различного вида. Отсюда высокий уровень развития соответствующих групп и составляющих их подгрупп. Вместе с тем в патентной и технической литературе минимум информации о способах получения реальных изделий посредством формоизменения вещества заготовки с использованием управляемых физических полей и потоков энергии.

Далее в качестве примера рассматривается классификация ряда пионерных (первообразных) способов формообразующей обработки резанием прямозубых цилиндрических колес.

## **5.2 Структурный анализ и классификация пионерных способов обработки резанием прямозубых цилиндрических колес**

В основу известных к настоящему времени способов обработки зубчатых колес положен один из следующих видов профилирования их зубьев.

*Копирование*, при котором профиль впадины нарезаемого колеса представляет точную копию профиля зуба инструмента. В этом случае для нарезания цилиндрических зубчатых колес с прямыми зубьями используют пальцевые и дисковые модульные фрезы и контурные зубодолбежные головки.

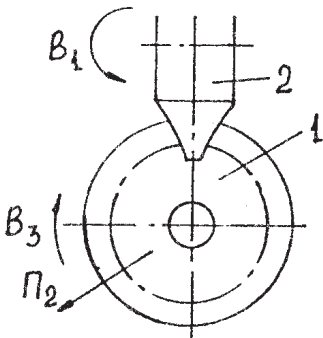
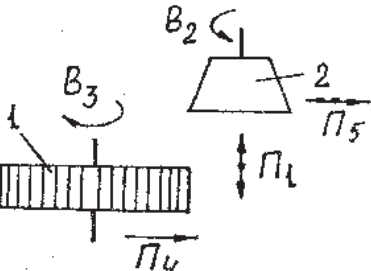
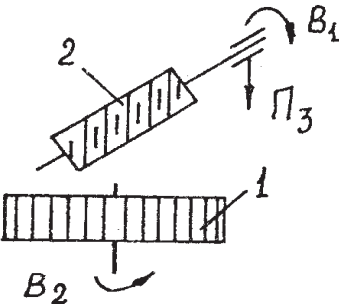
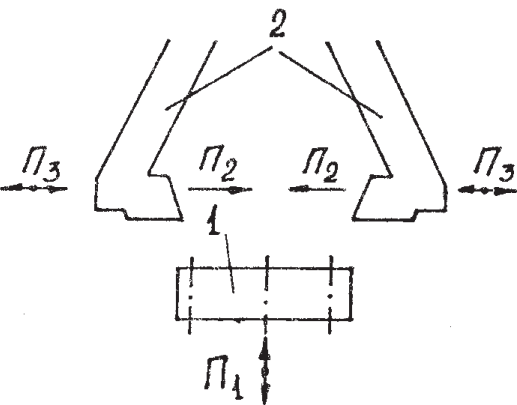
*Центроидное обкатывание*, при котором центроиды инструмента и нарезаемого колеса обкатываются без скольжения. Профиль нарезаемых зубьев получается как огибающая различных положений режущих кромок. В качестве инструмента в этом случае применяют зуборезные гребенки, червячные фрезы и долбяки.

*Бесцентроидное обкатывание*, при котором профиль нарезаемых зубьев получается как огибающая различных положений режущих кромок инструмента, но в процессе нарезания центроиды инструмента и нарезаемого колеса отсутствуют. При обработке прямозубых цилиндрических колес этот метод профилирования еще не получил распространения.

Схемы пионерных (первообразных) способов обработки прямозубых цилиндрических колес, созданные в разное время на основе первых двух видов профилирования приведены в таблице 5.1.

Рассматриваемая подгруппа способов характеризуется использованием одного вида энергетического воздействия на твердое тело. При механическом резании функцию энергетической подсистемы выполняет кинематическая подсистема. Поэтому для всех способов подгруппы критерий сложности энергетической подсистемы равен нулю. При качественно различной длине ступицы нарезаемого колеса возможны две схемы базирования. Поэтому для каждого способа анализируемой подгруппы возможны два варианта базирования, то есть два варианта базирующей подсистемы. Конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента для обоих вариантов базирования равно нулю. Следовательно, критерий сложности базирующей подсистемы для всех способов подгруппы равен трем. Тогда общий критерий сложности рассматриваемых способов обработки будет равен сумме критериев сложности кинематической и базирующей подсистем.

Таблица 5.1. – Классификация пионерных способов обработки резанием цилиндрических прямозубых колес

Номер рисунка	Схема способа формообразующей обработки зубчатой поверхности	Класс образования поверхности	Критерий сложности
1	2	3	4
1		$E-P$	9
2		$H^C-H^K$	12
3		$H^K-P$	11
4		$E-H^C$	9

1	2	3	4
5		$H^C-H^K$	10
6		$H^K-H^C$	8

Рисунок 5.1.1 иллюстрирует способ фрезерования колес фасонной (модульной) фрезой. При фрезеровании образующая – линия профиля впадины нарезаемого колеса 1 – воспроизводится зеркальным отображением профиля режущих зубьев фрезы 2, то есть копированием, а направляющая – прямая, определяющая форму зуба по длине, – составным движением, состоящим из двух элементарных – вращения  $V_1$  фрезы и подачи  $P_2$  заготовки. Для прорезки каждой последующей впадины периодически последовательно с составным движением осуществляют движение деления  $V_3$ .

Класс образования поверхности ( $E-P$ ). Критерий сложности кинематической подсистемы равен шести, а общий критерий сложности девяти.

Способ фрезерования модульной фрезой непроизводителен и не обеспечивает требуемой в настоящее время точности. Поэтому используется главным образом в ремонтном производстве.

Рисунок 5.1.2 иллюстрирует классический способ зубодолбления, используемый в большинстве зубодолбежных станков. Подробное описание данного способа приведено в разделе 1.

Рисунок 5.1.3 иллюстрирует способ зубофрезерования прямозубых колес червячной фрезой, положенный в основу большинства зубофрезерных станков. При зубофрезеровании образующая – линия профиля зубьев

колеса – воспроизводится движением обката  $B_1B_2$ , состоящим из двух согласованных движений – вращения  $B_1$  фрезы 2 и вращения  $B_2$  заготовки 1, а направляющая – прямая, параллельная оси колеса, – движение  $\Pi_3$  фрезы. Класс образования поверхности ( $H^K$ - $\Pi$ ).

Критерий сложности кинематической подсистемы равен пяти, а общий критерий сложности способа – восьми.

На рисунке 5.1.4 показан способ контурного зубодолбления одновременно всех впадин колеса 1 резцами 2, собранными в долбежную головку. По этому способу одновременно обрабатываются все впадины колеса. При этом образующая – линия профиля впадин – воспроизводится зеркальным отображением профиля резцов, а направляющая – прямая, определяющая форму зуба по длине, поступательно-возвратным движением  $\Pi_1$  заготовки 1 нарезаемого колеса. При долблении резцы 2 получают также подачу врезания  $\Pi_2$  и движение «отскока»  $\Pi_3$  для устранения затирания резцов о заготовку при ее обратном ходе в движении  $\Pi_1$ .

Класс образования поверхности ( $E$ - $H^C$ ). Критерий сложности кинематической подсистемы равен шести, а общий критерий сложности – девяти.

По производительности контурное зубодолбление превосходит все другие способы зубообработки. Недостаточное распространение данного способа объясняется большой конструктивной сложностью инструмента и относительно узкой специализацией, поэтому он используется только в крупносерийном и массовом производстве зубчатых колес.

Рисунок 5.1.5 иллюстрирует способ долбления зубчатого колеса 1 зуборезной гребенкой 2. Способ осуществляется при условии, если число зубьев гребенки больше числа зубьев нарезаемого колеса. В этом случае характеристический образ инструмента имеет вид

$$P = \{M_{\mathcal{E}}\}_K, \quad (K > Z),$$

где  $K$  – число зубьев гребенки;  $Z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

При долблении образующая – прямая, параллельная оси заготовки, воспроизводится движением  $\Pi_1$ , а направляющая – линия, очерчивающая профиль колеса, сложным движением обката  $\Pi_2B_3$ . Класс образования зубчатой поверхности ( $H^C$ - $H^K$ ). При долблении заготовке сообщают также вспомогательное движение  $\Pi_4$ , предназначенное для ее отвода от гребенки при свободном ходе последней.

Критерий сложности кинематической подсистемы равен семи, а общий критерий сложности способа равен десяти.

Описанный способ используется главным образом в станках для обработки мелко- и среднемодульных зубчатых колес с небольшим числом зубьев. На базе этого способа создан еще один способ, позволяющий короткой гребенкой с малым числом зубьев нарезать крупномодульные зубчатые колеса с большим числом зубьев. Характеристический образ короткой гребенки

$$P = \{M_{\mathcal{D}}\}_k, \quad (k \ll Z).$$

На тяжелых зубообрабатывающих станках используются гребенки, у которых  $k = 3$ . По этому способу, по сравнению с первообразным, гребенке дополнительно после прорезки одной впадины, не прекращая движения обката, сообщают движение деления на один зуб, что усложняет кинематическую структуру способа. Однако такое усложнение обеспечивает повышение точности обработки зубчатых колес.

Класс образования поверхности ( $H^C-H^K$ ). Критерий сложности кинематической подсистемы равен девяти, а общий критерий сложности – 12.

На рисунке 5.1.6 показан способ зуботочения заготовки 1 чашечным резцом 2. Подробное описание этого способа изложено в разделе 2.

Класс образования поверхности ( $H^K-H^C$ ). Критерий сложности кинематической подсистемы равен пяти, а общий критерий сложности – восьми.

После изобретения способа зуботочения на первом этапе оценки его возможностей утверждалось, что зуботочение позволит постепенно отказаться от зубодолбления. В пользу зуботочения приводился довод о том, что этот процесс более производительен, так как инструмент при образовании формы зуба по длине совершает поступательное, а не поступательно-возвратное, как при зубодолблении. Отмечалось, что процесс зуботочения не требует движения врезания и, следовательно, проще зубодолбления. Однако дальнейшие исследования показали, что зуботочение имеет недостатки, в частности существенно уступает зубодолблению в универсальности.

В таблицу 5.1 включены наиболее известные пионерные и первообразные способы формообразующей обработки прямозубых цилиндрических колес. Вместе с тем любому иному пионерному или первообразному способу как известному, так и возможному новому в соответствии с общей схемой классификации отводится вполне определенное место в подгруппе, например, по признаку возрастания темпа воспроизведения образующей и направляющей линий получаемого зубчатого колеса.

### 5.3 Синергетическая модель эволюции способов обработки резанием цилиндрических зубчатых колес

Используя классификацию пионерных и первообразных способов обработки резанием цилиндрических прямозубых колес (см. таблицу 5.1), оказавшихся у истоков открытого множества способов зубообработки, рассмотрим с позиций синергетики эволюцию (целенаправленное развитие) данного множества способов формообразующей обработки.

Английский механик Г. Мондсли в 1800 году, организовав свое дело и получив патент на токарно-винторезный станок с двухколесной гитарой сменных зубчатых колес, приступил к производству металлорежущих станков на промышленной основе. Этот год считается годом рождения станкостроения как специализированной отрасли машиностроения. Мондсли выпускал различные станки, в том числе токарно-винторезные, зубострогальные, ряд модификаций фрезерных станков. Исходя из этого перечня выпускаемых в то время металлорежущих станков можно сделать вывод о том, что способ строгания прямозубых цилиндрических колес фасонным резцом и, вероятно, с некоторым сдвигом во времени, способ фрезерования таких же колес фасонной фрезой, предшественницей современной модульной фрезы, были известны (точки бифуркации *A* и *B*, рисунок 5.5).

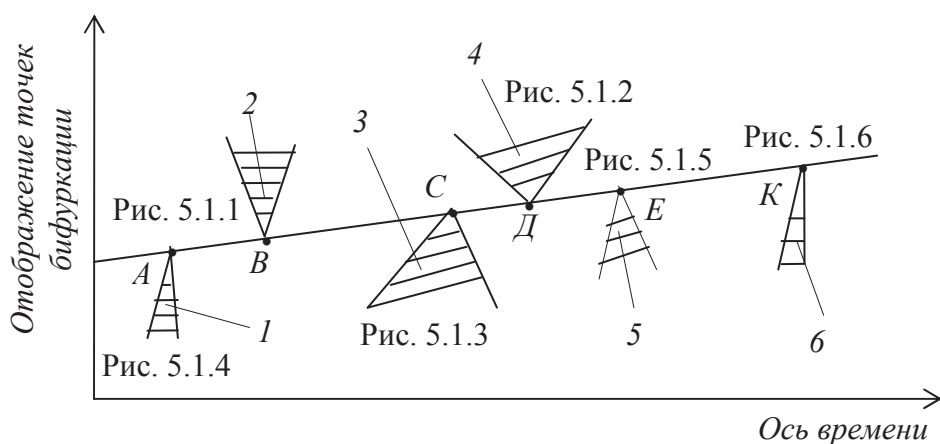


Рисунок 5.5. – Поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов обработки резанием зубчатых колес

Оба способа зубообработки были созданы на основе интуиции и практического опыта конструирования и изготовления соответствующих станков. После точек бифуркации *A* и *B*, как правило, образуются траектории или достаточно узкие коридоры *1* и *2* траекторий эволюции соответственно подмножества способов строгания зубчатых колес фасонным резцом

и способов фрезерования таких же колес фасонной фрезой. В синергетике коридор эволюции принято называть аттрактором.

При зубострогании линия зуба воспроизводится в виде следа фасонного резца при его поступательно-возвратном движении. Причем одна половина этого движения является движением резания, а другая – движением деления, переносящим траекторию движения резания, являющегося формообразующим, в исходное положение для его повторения.

Каждому поступательно-возвратному движению резца предшествует движение врезания на часть припуска, соответствующего высоте зуба (глубине впадины). Последовательная обработка всех зубьев (впадин) обеспечивается периодическим движением деления, выполняемым после обработки каждого предшествующего зуба. Отсюда следует, что пионерный способ фасонного зубострогания характеризуется низкой производительностью, так как более половины машинного времени обработки приходится на вспомогательные движения: деление по профилю зуба, деление по линии зуба и врезание. На основе данного способа в прошлом столетии было изобретено еще два способа фасонного зубострогания. В начале столетия предложен способ строгания одновременно двух зубьев (впадин) конического прямозубого колеса двумя фасонными резцами, воспроизводящими линию зуба в противофазе. Цель такого технического решения – повышение производительности обработки за счет сокращения в два раза времени деления по профилю зуба. Данный производный способ в настоящее время используется в частной структуре зубострогальных станков, например, моделей 523 и 526 и их последующих модификаций, выпускаемых в России. В середине двадцатого столетия предложен способ контурного строгания (долбления) цилиндрических прямозубых колес (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.4), рассмотренный выше. Цель такого технического решения – существенное повышение производительности обработки за счет одновременного строгания всех зубьев колеса. Способ реализован в кинематической структуре станков моделей 5110 и 5120. Недостаток способа контурного строгания – сложность конструкции инструментальной головки, её неуниверсальность и нетехнологичность. Это существенно ограничивает использование данного способа нарезания зубчатых колес.

Низкая производительность пионерного способа фасонного зубострогания привела к изобретению пионерного способа фасонного зубофрезерования, описанного выше (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.1). По этому способу линия зуба воспроизводится составным движением касания, состоящим из двух элементарных движений: вращения фасонной фрезы и поступательного перемещения заготовки в направлении, параллельном линии зуба.



Последовательная обработка всех зубьев (впадин) обеспечивается периодическим движением деления, аналогичным такому же движению при фасонном зубострогании. При фасонном зубофрезеровании отпадает необходимость в движении деления по линии зуба и в движении врезания. Возрастает также период размерной стойкости инструмента. В итоге существенно возрастает производительность зубообработки. На его основе предложены также способы нарезания косозубых и винтовых как цилиндрических, так и конических колес. В настоящее время пионерный способ фасонного зубофрезерования и способы, разработанные на его основе, реализуются преимущественно на универсальных вертикальных и горизонтальных фрезерных станках с использованием универсальных делительных головок в ремонтном и единичном производствах. Эти же способы используются на станках инструментального производства, например, на производственных станках для прорезки винтовых канавок на сверлах.

Развитие теории червячного и зубчатого зацеплений стало объективной предпосылкой изобретения пионерных способов нарезания зубчатых колес при их профилировании обкатом, обеспечивших революционные преобразования в области формообразующей обработки зубчатых колес.

Фирма «Пфаутер» (Германия) в 1895 г. выпустила первый зубофрезерный станок для нарезания цилиндрических прямозубых колес червячной фрезой по патенту 1876 г. Таким образом, на основе научного подхода были изобретены способ обкатного зубофрезерования зубчатых колес (точка бифуркации  $C$ , рисунок 5.5), червячная фреза и соответствующий зубообрабатывающий станок. Описание пионерного способа обкатного зубофрезерования приведено в предыдущем параграфе (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.3). По этому способу в основу воспроизведения профиля зуба цилиндрического колеса положена схема зацепления червяк – червячное колесо. Способ обкатного фрезерования превосходит способ фасонного фрезерования по производительности, универсальности и качеству зубообработки. Его аттрактор  $3$  в точке бифуркации  $C$  содержит значительный массив траекторий эволюции способов зубофрезерования косозубых и червячных колес, колес с наклонными по делительной окружности зубьями, конических колес с дуговыми зубьями и т.д.

В 1905 году фирма «Феллоу» (США) приступила к выпуску зубодолбежных станков, в основу кинематической структуры которых положен способ долбления (строгания), обеспечивающий воспроизведение профиля зубьев посредством обката, воспроизводящего зацепления пары зубчатых колес: зуборезного долбяка и нарезаемой заготовки. Описание пионерного

способа обкатного зубодолбления приведено выше (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.2). Его аттрактор 4 в точке бифуркации  $D$  содержит также значительный массив траекторий эволюции способов обкатного зубодолбления прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов колес внутреннего зацепления, зубчатых реек и секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, основанные на изменении последовательности и правил выполнения приемов как пионерного, так и производных от него способов.

Пионерный способ обкатного зубодолбления со временем стал прототипом первообразного способа нарезания цилиндрических прямозубых колес зуборезной гребенкой (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.5), у которой число зубьев больше числа зубьев нарезаемого колеса (точка бифуркации  $E$ ). На основе этого способа был создан дополнительный способ, осуществляющий процесс зубонарезания посредством гребенки, у которой число зубьев существенно меньше числа зубьев нарезаемого колеса. Структура этого способа сложнее первообразного. Область его использования – тяжелые зубообрабатывающие станки для нарезания крупномодульных колес, как правило, зуборезной гребенкой, имеющей три зуба. Аттрактор 5 подмножества способов нарезания зубчатых колес зуборезной гребенкой содержит незначительный массив траекторий эволюции преимущественно на основе изменения правил выполнения приемом. Объясняется это значительной схожестью рассматриваемого способа с пионерным способом зубодолбления зуборезным долбяком.

Основной недостаток способов обкатного зубодолбления зуборезным долбяком, снижающем производительность формообразующей обработки – необходимость в выполнении движения деления по линии зуба. Этот недостаток устранен в способе зуботочения обкатным резцом типа долбяка (см. таблицу 5.1, рисунок 5.1.6), предложенном в середине двадцатого столетия. Способ получен посредством сообщения долбяку в движении обката скорости резания, а вместо поступательно-возвратного движения – сообщения ему поступательного движения подачи. Аттрактор 6 в точке бифуркации  $K$  данного первообразного способа содержит минимальное количество траекторий эволюции способов зуботочения.

Как показывает анализ патентных источников и проспектов станкостроительных фирм, выпускающих зубообрабатывающие станки, наиболее интенсивно эволюционируют подмножества способов зубофрезерования червячными фрезами и зубодолбления зуборезными долбяками. В следующем разделе на основе системного анализа способов зубодолбления будет рассмотрена эволюция этого вида формообразующей обработки зубчатых колес.

## 5.4 Критерии сравнительной оценки способов формообразующей обработки

Системология как точная наука предполагает возможность сравнения принципов, видов и способов обработки на основе наиболее общих критериев. Будем считать первым таким критерием сложность  $S$ -системы, сформулированная на основе методики морфологического (структурного) описания способов обработки. Данный критерий носит всеобщий характер и не зависит от принципа обработки и вида используемой энергии. Применение критерия сложности для сравнения различных способов обработки наиболее рационально в пределах конкретного вида обработки или в пределах близких по своей природе видов. Например, сравнение способов зубофрезерования червячными фрезами цилиндрических зубчатых колес или сравнение способов, составляющих данный вид обработки со способами зубодолбления, составляющими по своей сущности близкий вид обработки – обкатное зубодолбление. Другим всеобщим критерием является энергоёмкость. Однако этот критерий приемлем только на уровне сравнения принципов и видов обработки.

Как известно, наиболее полными показателями эффективности любого технологического процесса являются производительность и стоимость обработки деталей требуемого качества. Следовательно, сравнительный анализ должен давать ответ в виде отношений основного и штучного времени, а также стоимости операций. Последнее невозможно при сравнении способов обработки, так как их невозможно характеризовать стоимостью единицы времени работы технологической машины. Сформулируем на основе понятия производительности технологического процесса соответствующие критерии для сравнения способов формообразующей обработки.

Основное время цикла функционирования  $S$ -системы по аналогии с выполнением перехода технологической операции выражается в общем случае уравнением

$$t_0 = \frac{L}{s \cdot n},$$

где  $L$  – длина поверхности;  $s$  – подача;  $n$  – круговая частота вращения заготовки.

Выражая подачу через расчетную высоту микронеровностей, а круговую частоту через скорость обработки, получим зависимость вида

$$t_0 = \frac{1}{R_z v} f(A).$$

Здесь  $R_z$  – высота неровностей;  $v$  – скорость обработки (скорость резания);  $A$  – геометрические параметры детали и инструмента.

От основного времени можно перейти к штучному времени, которое в общем случае определяется выражением

$$t_{um} = t_0 + t_e,$$

где  $t_e$  – вспомогательное время, затрачиваемое на движения, предшествующие формообразующим.

При нормировании технологических операций в штучное время входит также дополнительное время, затрачиваемое на обслуживание рабочего места. Обычно это время составляет 6...8% от  $t_{um}$ . Способ обработки это техническая идея. Поэтому данная составляющая при оценке производительности  $S$ -систем не имеет смысла.

Выражения для  $t_0$  и  $t_{um}$  по существу определяют производительность способов обработки по времени формообразования поверхности и по времени цикла функционирования при условии достижения конкретного теоретического уровня качества поверхности.

Отношение времени формообразования одним способом к времени формообразования той же поверхности другим способом может быть выражено в виде непрерывной функции параметров процесса

$$\frac{t_{01}}{t_{02}} = \frac{v_1}{v_2} f(B, C, D \dots).$$

От отношения времени формообразования можно перейти к отношению времени цикла

$$\frac{t_{um1}}{t_{um2}} = \frac{t_{01} + t_{e1}}{t_{02} + t_{e2}},$$

Будем считать полученные выражения критериями относительной производительности по времени формообразования (ПФ) и по времени цикла функционирования (ПЦ) способов обработки. Данные критерии, как и критерии сложности, носят всеобщий характер.

Для обеспечения максимально возможной точности при сравнении способов обработки по производительности скорость обработки, например скорость резания, необходимо задавать или усредненно по нормативным данным, или по достигнутому уровню.

## 6. ЭВОЛЮЦИЯ СПОСОБОВ ОБКАТНОГО ДОЛБЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

### 6.1. Системный анализ пионерного способа зубодолбления

Для пионерного способа формообразующей обработки зубчатых колес долбяками характерны принципиальные особенности – дискретный (прерывистый) характер резания и неодинаковость толщин стружек, срезаемых вершинной и боковыми режущими кромками зубьев долбяка. При этом количество резов обратно пропорционально скорости обката, определяемой круговой подачей долбяка. Рассмотрим эти особенности и их влияние на характер износа и размерную стойкость зубьев долбяка.

При нарезании колес зуборезными долбяками (см. рисунок 1.1) срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow P_1$  скорости резания. Вместе с тем движение обката  $B_2B_3$  (функционально связанные вращения долбяка и заготовки), скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме, что неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу приводит к возникновению явления затирания. Это явление проявляется в виде трения скольжения боковых режущих кромок зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса.

Природу явления затирания можно объяснить следующим образом. При обкате долбяка и заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. На первом рабочем ходе долбяка в движении  $\uparrow P_1$  на заготовке копируется часть профиля зуба, а при последующих рабочих ходах копирование сопровождается обкатом. Причем по мере прохождения каждым зубом долбяка зоны резания протяженность копирующей части профиля зуба сначала возрастает от нуля до некоторого максимума, а затем убывает, приближаясь к нулю. Перенос зоны копирования по линии зуба осуществляется по винтовой линии, угол подъема которой равен углу между вектором скорости резания и вектором движения формообразования, определяемом как геометрическая сумма векторов скорости резания и круговой подачи. При холостом ходе в движении  $\uparrow P_1$  (деление по линии зуба нарезаемого колеса) долбяк контактирует боковыми задними поверхностями каждого зуба с материа-

лом заготовки на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, то есть возникает явление затирания. Это явление циклически повторяется на каждом зубе долбяка, вступающем в процесс долбления. Наиболее неблагоприятные условия резания каждым зубом соответствуют начальному этапу, где преобладает копированием и, следовательно, возникают наибольшие по величине натяги при затирании. На режущих кромках данному этапу соответствуют зоны более интенсивного износа по задним поверхностям входных боковых режущих кромок у вершин зубьев долбяка, чем у их ножек.

Основная масса припуска при зубодолблении срезается вершинными и входными режущими кромками зубьев долбяка. Причем толщина стружек, срезаемых режущими кромками на окружностях выступов, приблизительно одинакова, а толщина стружек, срезаемых выходными режущими кромками, значительно меньше толщин стружек, срезаемых входными режущими кромками на одноименных окружностях. Таким образом, для зубодолбления характерны неодинаковость толщин стружек на различных режущих кромках зубьев долбяка и возрастание толщин стружек от основания к вершине его зубьев. При малых круговых подачах выходная режущая кромка срезает тонкие стружки, соизмеримые с естественным радиусом закругления режущей кромки. С увеличением круговой подачи толщина стружек на различных участках режущих кромок зубьев долбяка возрастает пропорционально круговой подаче.

При прохождении каждым зубом долбяка зоны обработки прослеживаются три качественно различных периода срезания стружки [45; 46]:

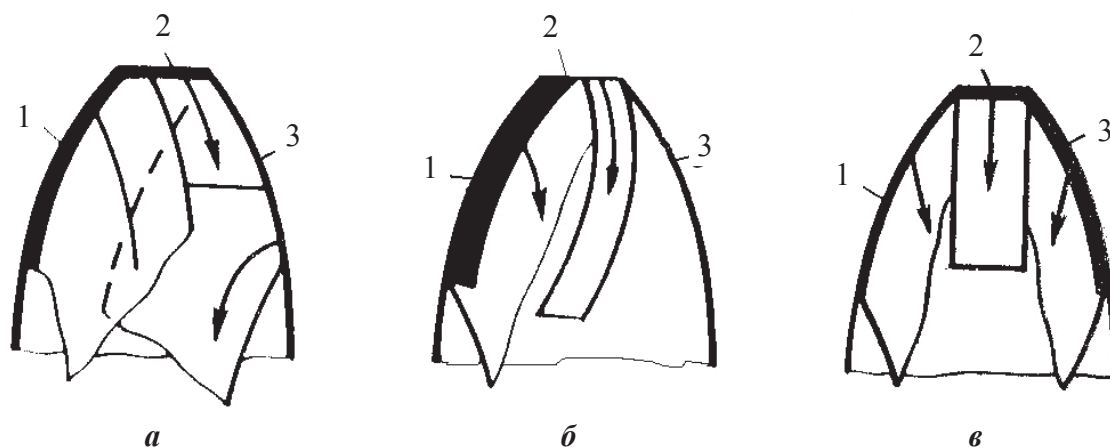
1) период, начинающийся с момента начала резания вершинной и входной режущими кромками до вступления в зону обработки выходной режущей кромки. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму;

2) период резания вершинной, входной и выходной режущими кромками. Срезаемые стружки имеют *U*-образную форму;

3) период выхода зуба долбяка из зоны резания. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму, постепенно переходящую в *I*-образную.

При зубодолблении по классической (пионерной) схеме наиболее распространен тип *U*-образного схода стружки (рисунок 6.1, *a*), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более толстые стружки, чем выходная режущая кромка 3. Вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности и затрудняет ее сход. Стружка, срезаемая вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвер-

гается высокой растягивающей нагрузке, что приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка. Затем обе стружки сходят беспрепятственно и не вызывают высоких механических или температурных деформаций на границе между вершинной и входной режущими кромками. Тонкая стружка, срезаемая выходной режущей кромкой зуба, также отделяется от толстой стружки, сходящей с вершинной режущей кромки. Эта стружка выдавливается толстыми стружками в зазор между боковой стороной зуба долбяка и обрабатываемой поверхностью, где она истирается на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. Здесь образуется лунка локального износа по передней поверхности. Расстояние от выходной режущей кромки до центра лунки зависит от круговой подачи. При ее увеличении это расстояние также увеличивается.



**Рисунок 6.1. – Схемы схода стружек при зубодолблении**

При зубодолблении, как и при любой другой обработке резанием, износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Однако лимитирует размерную стойкость долбяков лунка локального износа по передней поверхности у выходной режущей кромки. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки. Постепенное увеличение лунки локального износа приводит к разрушению выходной режущей кромки по передней поверхности.

При зубодолблении по классической схеме для снижения интенсивности развития лунки локального износа используется технологический прием, заключающийся в изменении направления движения обката перед

обработкой очередной заготовки. В этом случае лунки локального износа образуются симметрично на входной и выходной режущих кромках. Однако интенсивность их развития замедляется примерно в 2 раза.

Наряду с указанным технологическим приемом назовем на основе анализа схода стружек еще два возможных пути существенного замедления лунки локального износа. Первый путь связан с такой модификацией классической схемы, которая обеспечит срезание вместо *U*-образной более простой *L*-образной стружки. Такой тип стружки, срезаемой входной 1 и вершинной 2 режущими кромками, представлен на рисунке 6.1, б. Выходная режущая кромка 3 в резании не участвует, *L*-образная стружка после разрыва промежуточной зоны между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка сходит беспрепятственно и не вызывает высоких деформаций на границе между этими режущими кромками.

Второй путь – создание условий резания, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова (рисунок 6.1, в). В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыке между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность зубьев долбяка подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование зоны локализованного износа сдвигается во времени и одновременно происходит ее перераспределение на обе боковые режущие кромки. Таким образом, лунки локального износа на передней поверхности появляются в окрестностях вершинной режущей кромки у обеих боковых режущих кромок. Однако интенсивность их развития также замедляется примерно в два раза, что соответственно увеличивает период размерной стойкости долбяков.

Совместное влияние явления затирания и образования лунок локализованного износа на передней поверхности интенсифицируют разрушение режущих кромок у вершин зубьев долбяков.

Поиск технических решений, обеспечивающих устранение явления затирания и реализации названных путей замедления развития лунок локального износа по передней поверхности и, следовательно, повышение периода размерной стойкости зуборезных долбяков, потребовало существенного изменения классической (пионерной) схемы зубодолбления. Это обстоятельство на длительный период эволюции обкатного зубодолбления определило одно из основных направлений поиска виртуальных технических идей в этой области формообразующей зубообработки резанием.



## 6.2 Способы зубодолбления, обеспечивающие устранение явления затираания

На раннем этапе поиска (1960-е годы) технических решений, обеспечивающих устранение явления затираания, доминировала виртуальная идея «косого отскока». Наибольший интерес представляет вариант, при котором долбяку сообщают дополнительный «круговой отскок» в сторону, противоположную вектору круговой подачи. В этом случае за счет сложения векторов радиального и кругового «отскоков» при холостом ходе воспроизводится «косой отскок». Способ зубодолбления с «косым отскоком» используется в зубодолбежных станках фирмы «Тос Челаковице» (Чехия).

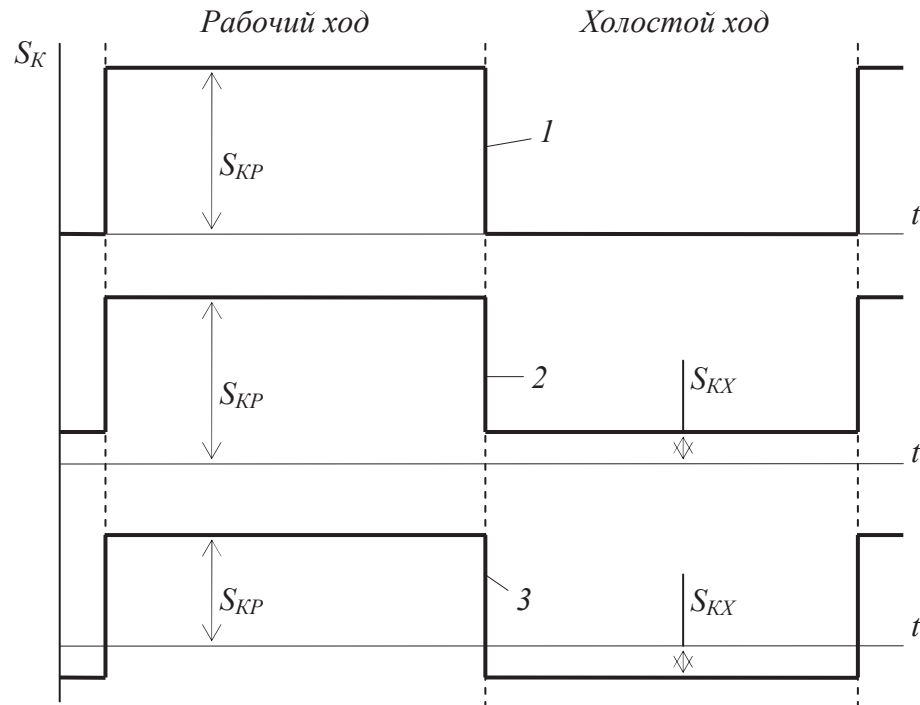
В [47] показано, что «косой отскок» не решает в целом задачу устранения явления затираания. Причем при однопроходном зубодолблении «косой отскок» переносит зону возникновения явления затираания на противоположную боковую режущую кромку зубьев долбяка.

Представляются более рациональными решения, основанные на принципе согласования ритмов формообразующих движений скорости резания  $\downarrow\Pi_1$  и обката  $B_2B_3$  (см. рисунок 1.1). Рассмотрим возможные пути решения этой задачи.

Первый путь основан на приведении ритма движения обката  $B_2B_3$  к ритму движения  $\downarrow\Pi_1$ . Для этого необходимо заменить непрерывный характер движения обката дискретным, что возможно, например, согласно [48] посредством прекращения движения обката на периоды холостого хода долбяка в движении  $\downarrow\Pi_1$  (рисунок 6.2, вариант 1). Такой вариант приводит к существенному качественному изменению функции пионерного способа, но структура его кинематической подсистемы не претерпевает значительных изменений. Тем не менее такое техническое решение в некоторых случаях может ухудшить динамику группы обката зубодолбежного станка, так как при дискретном обкате кинематические связи этой группы будут периодически натягиваться и ослабляться. В итоге понизится кинематическая точность ее внутренней связи и, следовательно, ухудшится качество обработки. Поэтому рассматриваемый вариант согласования ритмов формообразующих движений можно видоизменить на основе следующего обоснования.

Экспериментально или теоретически с помощью математической модели по расчету боковых зазоров можно определить минимальную круговую подачу, при которой гарантируется для зуба долбяка, находящегося в наилучших условиях обработки, минимальный зазор между режущей кромкой и профилируемой впадиной при свободном ходе долбяка. Сообщая полу-

ченое минимальное значение круговой подачи во внутреннюю связь (цепь обката) группы обката параллельно с дискретной рабочей подачей, можно обеспечить постоянное натяжение этой цепи (рисунок 6.2, вариант 2).



**Рисунок 6.2. – Варианты дискретного изменения круговой подачи:**  
 $S_{KP}$  и  $S_{KX}$  – круговая подача соответственно при рабочем и холостом ходе

Дискретный характер движения обката можно заменить качательным ( $\updownarrow B_2 B_3$ ), синхронизированным с движением  $\updownarrow \Pi_1$ . При этом для обеспечения процесса формообразования при рабочем ходе долбяка в движении  $\updownarrow \Pi_1$  движение обката должно иметь большую скорость, чем при возвратном свободном ходе (см. рисунок 6.2, вариант 3). Во избежание потери производительности разность круговых подач при рабочем и свободном ходах необходимо установить с учетом допустимой условиями обработки высоты огранки поверхности зубьев в направлении их профиля. Для этого можно воспользоваться выражением, полученным из уравнения (2.11):

$$S_{KP} - S_{KX} = 2 \sqrt{\frac{\Delta m Z_1^2 \left[ (Z_1 + Z_2) \sin \alpha - \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha} \right]}{(Z_1 + Z_2) \sin \alpha \sqrt{(Z_1 + 2)^2 - Z_1^2 \cos^2 \alpha}}},$$

где  $\Delta$  – допустимая высота огранки поверхности зубьев в направлении их профиля.

Варианты 2 и 3 согласования ритмов формообразующих движений так же, как и вариант 1, приводят к качественному изменению функции пионерного способа зубодолбления. При этом структура производных способов остается неизменной, то есть графическое представление пионерного и производных способов неразличимы.

Согласно второму пути дискретный ритм движения  $\downarrow\Pi_1$  приводится к ритму движения  $V_2V_3$ . Для этого необходимо снизить скорость движения  $\downarrow\Pi_1$  до уровня подачи токарной обработки и осуществлять это движение в течение всего цикла обработки не поступательно-возвратно, а поступательно. Необходимо также увеличить круговую частоту  $V_2$  долбяка, определяющую скорость движения обката, до уровня скорости резания при точении. Это приводит к замене зубодолбления зуботочением (см. рисунок 2.8, к).

Одновременно вследствие непрерывности зуботочения отпадает необходимость в движениях врезания  $\Pi_4$  и «отскока»  $\downarrow\Pi_5$  инструмента. Отметим также, что этот путь согласования ритмов формообразующих движений приводит к перестановке воспроизводящих линий: линия, имеющая форму профиля зубчатого колеса, будет образующей, а прямая линия зуба по длине – направляющей. Существенно изменятся структура и функция кинематической подсистемы (см. таблицу 3.1), хотя мощность характеристического образа инструмента остается прежней. Изменится и обобщенный параметр состояния внутренней среды, так как воздействие на твердое тело заготовки в течение всего цикла обработки будет непрерывным.

Кинематика зуботочения аналогична кинематике токарной обработки, при которой не возникает явление затиранья. Следовательно, зуботочение не сопровождается возникновением этого явления.

Вероятно, именно так рассуждал автор изобретения способа зуботочения, анализируя пионерный способ зубодолбления, предложенный на несколько десятилетий раньше.

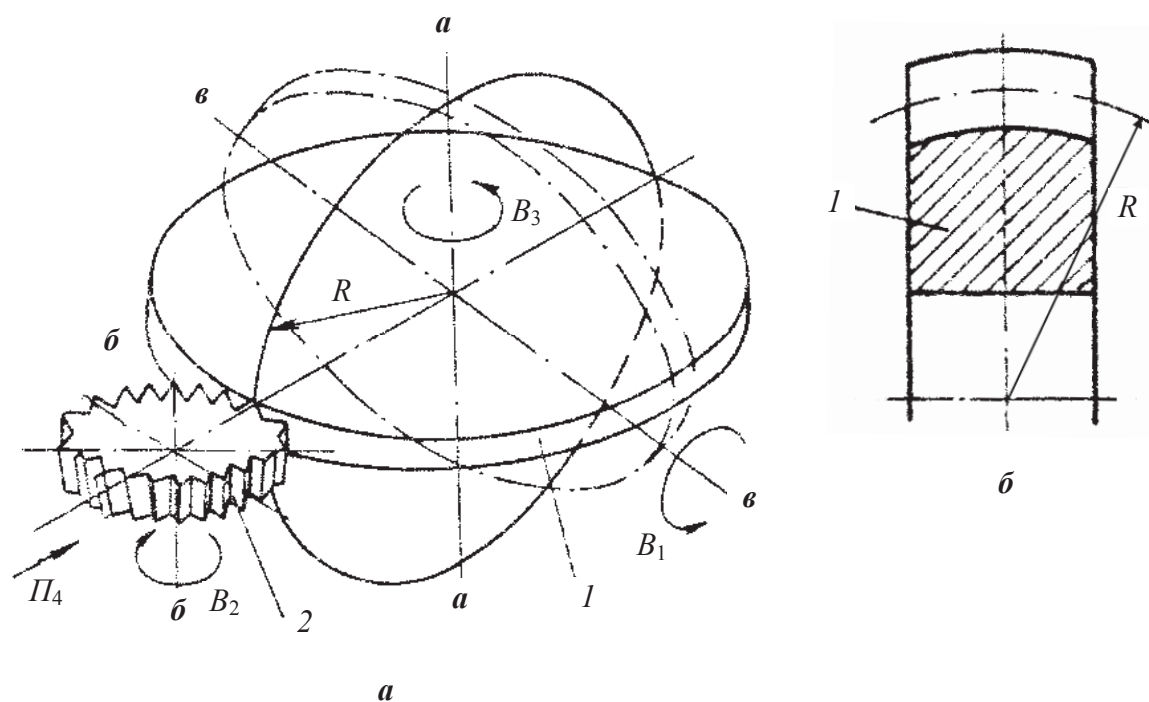
Третий путь основан на передаче функции движения скорости резания заготовке.

Схема способа [49], реализующего этот путь, приведена на рисунке 6.3, а. При обработке заготовке  $I$  сообщают движение  $V_1$  вокруг оси  $v-v$  скорости резания, воспроизводящее образующую (линию зуба колеса), а долбяку  $2$  и заготовке  $I$  сообщают согласованные движения соответ-

венно  $B_2$  вокруг оси  $b-b$  и  $B_3$  вокруг оси  $a-a$ , образующие сложное двух-элементарное движение, воспроизводящее направляющую (профиль нарезаемых зубьев). На этапе врезания долбяку сообщают также движение врезания  $\Pi_4$  на высоту зуба.

По утверждению авторов, исключение поступательно-возвратного движения  $\uparrow\Pi_1$  долбяка позволяет увеличить скорость резания в 2...3 раза. Одновременно устраняется возможность возникновения явления затирания, так как заготовка и долбяк контактируют только при срезании припуска.

При обработке формируется выпуклая форма линии зуба по дуге окружности радиуса  $R$  делительной сферы (рисунок 6.3, б).



$a$  – кинематическая схема;  
 $b$  – форма линии зуба по длине

Рисунок 6.3. – Способ нарезания зубчатых колес долбяком

При необходимости получения иной формы линии зуба, в том числе традиционной при  $R = 0$ , долбяку 2 сообщают качательно-возвратное движение относительно оси, параллельной оси  $b-b$  вращения колеса 1 [50].

Как и в предыдущем примере, существенно изменяются структура и функция кинематической подсистемы способа, хотя мощность характеристического образа инструмента остается прежней.



Данный способ отличается от пионерного (см. рисунок 1.1) дополнительной дискретной круговой подачей, синхронизированной с поступательно-возвратным движением  $\uparrow\Pi_1$  долбяка. Эта подача функционально не связана с движением  $B_3$  заготовки и, следовательно, является вспомогательным движением, периодически изменяющим ориентацию движения обката  $B_2B_3$ .

Структура кинематической подсистемы рассматриваемого способа описывается множеством

$${}^K M = (\uparrow J U E)_O \cup (J J U E)_H \cup (J U E)_{Bp} \cup (\uparrow J U E)_{Bc1} \cup (J U E)_{Bc2}.$$

Функция этой подсистемы есть множество

$${}^K F = \{ \{M_3\}_{Zu}, H^C-H^K, \{ \Phi_O(\uparrow\Pi_1), \Phi_O(B_2B_3), Bp(\Pi_4), Bc_1(\uparrow\Pi_5), Bc_2(B_6), \Delta s \} \}.$$

В выражении для функции кинематической подсистемы дискретная круговая подача  $\Delta s$  является специфическим правилом выполнения дополнительного приема – движения  $B_6$ .

Базирующая и энергетическая подсистемы рассматриваемого способа совпадают с соответствующими подсистемами прототипа (пионерного способа). Критерий сложности кинематической подсистемы увеличивается на 2 за счет дискретной круговой подачи  $B_6$ . Общий критерий сложности способа равен 11.

При однопроходном зубодолблении нормальными долбяками реализация рассмотренного способа замедления лунки локального износа невозможна, а при двух-, трехпроходном – мало эффективна. Именно поэтому в области конструирования зубодолбежных станков ведущих станкостроительных фирм произошел переход от классического одно-, трехпроходного зубодолбления к многопроходному при шести – десяти проходах с увеличенными круговыми подачами до 3,5...4,5 мм/двойной ход долбяка на предварительных черновых и получистовых проходах. Такой режим при сохранении производительности традиционного зубодолбления с малыми круговыми подачами обеспечивает повышение периода размерной стойкости зуборезных долбяков. Объясняется это следующими обстоятельствами. С увеличением круговой подачи толщина стружки возрастает, одновременно уменьшается ее длина, то есть происходит перераспределение параметров сечения стружки. При этом количество срезаемых стружек уменьшается примерно на порядок. Увеличение толщины стружек, срезаемых выходной режущей кромкой, обеспечивает более благоприятные условия их схода и, как следствие, лунку локального износа сдвигает к центру передней поверхности зуба, а интенсивность развития лунки локально-

го износа заметно замедляет. Кроме того, каждый зуб долбяка, срезая существенно меньшее количество стружек, меньше нагревается. В результате возрастает термоциклическая стойкость режущих кромок зубьев.

При многопроходной обработке нет необходимости использовать долбяки с заууженными зубьями по делительной окружности при срезании *L*-образной стружки. А при использовании нормальных долбяков дополнительную круговую подачу рационально сообщать при очередном врезании перед каждым последующим проходом. В итоге долбление на проходах, кроме первого, будет осуществляться либо вдоль входной, либо вдоль выходной режущей кромки.

Более предпочтительно при многопроходной обработке для минимизации влияния неодинаковости толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками, на период размерной стойкости долбяков создание условий для срезания *U*-образной стружки. Рассмотрим решение данной задачи, предложенное в [52]. При врезании перед очередным проходом долбяку сообщают угловое смещение, противоположное его круговой подаче, и одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться *U*-образная стружка, имеющая одинаковую толщину на боковых режущих кромках.

Из описания принципа функционирования рассматриваемого технического решения следует, что эта *S*-система содержит подсистему стабилизации момента силы резания, обеспечивающую повышение периода размерной стойкости долбяка посредством создания условий для срезания симметричной *U*-образной стружки на каждом проходе, кроме первого.

Источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия служит среда резания. В свою очередь, эта подсистема является источником информации для структуры врезания кинематической подсистемы. Следовательно, структура рассматриваемого способа зубодолбления на первом уровне есть множество

$${}_1S = ({}^K M \cap {}^Э M \cap {}^C M) \cup {}^B M.$$

Функция данного способа

$${}_1F_S = \{M_{Э}\}_{Z_b} H^C - H^K, \{[{}^K M_O \cup {}^K M_H \cup ({}^K M_{Bp} \cap {}^C M) \cup {}^K M_{Bc1} \cup {}^K M_{Bc1}] \cap {}^Э M\} \cup {}^B M.$$

Коэффициенты сложности кинематической, базирующей и энергетической подсистем этого способа равны соответствующим коэффициентам

первообразного способа зубодолбления, а коэффициент сложности подсистемы стабилизации силового воздействия на этапах врезания равен единице.

Данный способ можно изменить так, чтобы выполнять процесс зубодолбления с *L*-образной стружкой на втором и последующих, кроме последнего, проходах. Для этого при каждом последующем врезании угловое смещение долбяка изменяют на противоположное и одновременно изменяют момент силы резания. При достижении моментом силы резания максимального значения, что соответствует максимальной по толщине стружки, срезаемой одной из боковых режущих кромок, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге, на проходе будет срезаться *L*-образная стружка. На последнем чистовом проходе срезание припуска должна осуществляться в форме *U*-образной стружки.

При большом количестве проходов возрастает машинное время врезания. Устранить этот недостаток классической схемы позволяет способ зубодолбления [53], по которому на предварительных проходах врезание осуществляют непрерывно по спирали (рисунок 6.5). При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе предварительных проходов при непрерывном врезании долбяка 1 относительно заготовки 2 действительная траектория врезания имеет вид архимедовой спирали 3.

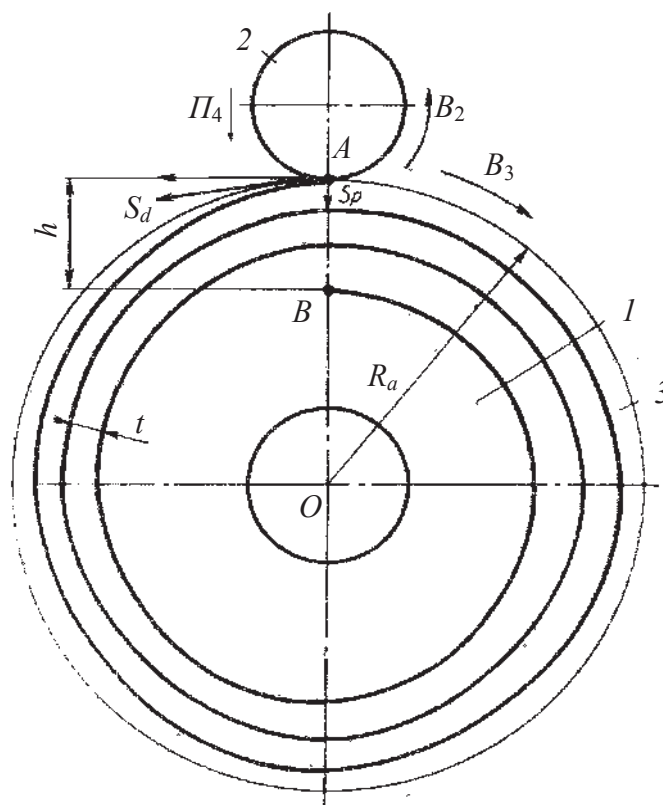


Рисунок 6.5. – Траектория движения долбяка при врезании по спирали



Результирующая (спиральная) подача врезания долбяка равна геометрической сумме составляющих ее подач:

$$S_{\delta} = \sqrt{S_K^2 + S_P^2},$$

где  $S_{\delta}$  – действительная (спиральная) подача врезания, мм/дв. ход долбяка;  $S_K$  – круговая подача, мм/дв. ход долбяка;  $S_P$  – радиальная подача врезания, мм/дв. ход долбяка.

Круговая подача является нормируемой величиной, устанавливаемой при назначении режимов резания.

Тогда радиальную подачу можно определить как часть круговой подачи, используя принцип пропорциональности перемещений:

$$S_P = S_K \frac{h}{L},$$

где  $h$  – принимаемая величина радиального перемещения долбяка на этапе черновых проходов, мм;  $L$  – длина архимедовой спирали между точками  $A$  и  $B$ , по которой перемещается долбяк относительно заготовки, мм.

Известно, что длина архимедовой спирали, начиная от полюса, определяется по формуле:

$$l = \frac{a}{2} \left( \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \operatorname{Arsh} \varphi \right),$$

где  $l$  – длина архимедовой спирали, мм;  $a$  – параметр архимедовой спирали, мм;  $\varphi$  – угол поворота радиус-вектора точки в полярных координатах, рад.

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк на этапе врезания, можно определить как разность длин спиралей: полюс  $O$  – точка  $A$  и полюс  $O$  – точка  $B$ .

После элементарных преобразований получим

$$L = \frac{a}{2} \left[ \left( \varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right) + \left( \operatorname{Arsh} \varphi_2 - \operatorname{Arsh} \varphi_1 \right) \right],$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса до точки  $B$  и от полюса до точки  $A$ .

Углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определим из выражений:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a};$$

$$\varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

где  $R_a$  – радиус заготовки (радиус окружности выступов обрабатываемого колеса) мм.

Параметр  $a$  и шаг  $t$  архимедовой спирали связаны соотношением:

$$t = 2\pi a.$$

Шаг архимедовой спирали при зубодолблении можно выразить через количество проходов  $k$ :

$$t = h / k.$$

Следовательно,

$$a = h / 2\pi \cdot k.$$

В выражении для определения  $L$  второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах приемлемого числа предварительных проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь при практических расчетах. После подстановки значения  $L$  в выражение для  $S_p$  окончательно получим:

$$S_p = \frac{2S_k h}{a (\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2})}.$$

Для данного способа зубодолбления из-за особенностей движения врезания машинное время обработки определяется по следующей, отличной от традиционной, формуле:

$$T_M = \frac{\pi m Z}{n S_{K1}} + \frac{L}{n S_\delta},$$

где  $T_M$  – машинное время обработки, мин;  $m$  – модуль, мм;  $Z$  – число зубьев нарезаемого колеса;  $S_{K1}$  – круговая подача на чистовом проходе, мм/дв. ход долбяка;  $n$  – число двойных ходов долбяка в минуту.

Базирующая и энергетическая подсистемы рассматриваемого способа совпадают с соответствующими подсистемами прототипа – первообразного способа с радиальным врезанием.

Особенность кинематической подсистемы – сложная двухэлементарная структура врезания  $Bp(B_2\Pi_4)$ , элементарное движение  $B_2$  которой входит также в структуру сложного движения профилирования (обката)  $\Phi_H(B_2B_3)$ . Следовательно, эти составляющие кинематической подсистемы пересекаются. Отсюда структура и функция этой подсистемы есть множества:

$${}^K M = (\downarrow J \cup E)_O \cup [(JJ \cup E)_H \cap (JJ \cup E)_{Bp}] \cup (\downarrow J \cup E)_{Bc}.$$

$${}^K F = \{ \{M_{\Sigma}\}_{Zu}, H^C-H^K, \{\Phi_O(\downarrow\Pi_1), \{\Phi_H(B_2B_3) \cap Bp(B_2\Pi_4)\}, Bc(\downarrow\Pi_5)\} \}.$$

Функционируют пересекающиеся структуры последовательно по следующему правилу: многопроходное спиральное врезание  $\rightarrow$  профилирование (чистовой проход).

Функциональная связь между движениями  $B_2$  и  $B_3$ , образующими сложное движение обката (профилирования), устанавливается по известным правилам для настройки расчетных цепей обката зубодолбежных станков и выражается зависимостью

$$i_x = Z_1 / Z_H,$$

где  $Z_1$  и  $Z_H$  – соответственно число зубьев нарезаемого колеса и долбяка.

Функциональную связь между движениями  $B_2$  и  $\Pi_4$ , образующими сложное движение врезания, можно определить на основе следующих РП.

*1 оборот заготовки нарезаемого колеса  $\rightarrow$  ( $t = h/k$ ) перемещения долбяка.*

Тогда РП имеют вид:

$$(t = h/k) = 1 \cdot i_y.$$

Отсюда находим функциональную связь (ФН)

$$i_y = h/k.$$

Рассмотренный способ многопроходного зубодолбления со спиральным врезанием используется в одной из частных структур зубодолбежных станков с ЧПУ германской фирмы «Lorenz» [54; 55].

## **6.4 Способы зубодолбления, обеспечивающие повышение производительности при касательном врезании**

В формообразующей обработке постоянно присутствует проблема – поиск путей повышения производительности. При этом прослеживаются два основных направления. Первое определяется возможностями увеличения режимов резания при сохранении неизменным известного многообразия способов формообразующей обработки, второе связано с постепенной эволюцией этого многообразия способов. Это в полной мере относится и к процессу обкатного зубодолбления.

Повысить производительность обкатного зубодолбления при использовании известного способа можно или посредством увеличения скорости резания – частоты двойных ходов долбяка, или путем увеличения скорости обката – круговой подачи. Увеличение частоты двойных ходов долбяка приводит к возрастанию динамического воздействия на станочную систему, что снижает не только качество обработки, но также надежность и технологическую долговечность станка или увеличивает его стоимость. Поэтому это направление, очевидно, исчерпало себя достигнутой к настоящему времени быстроходностью зубодолбежных станков.

С увеличением круговой подачи возрастает воздействие на размерную стойкость зуборезных долбяков следующих факторов:

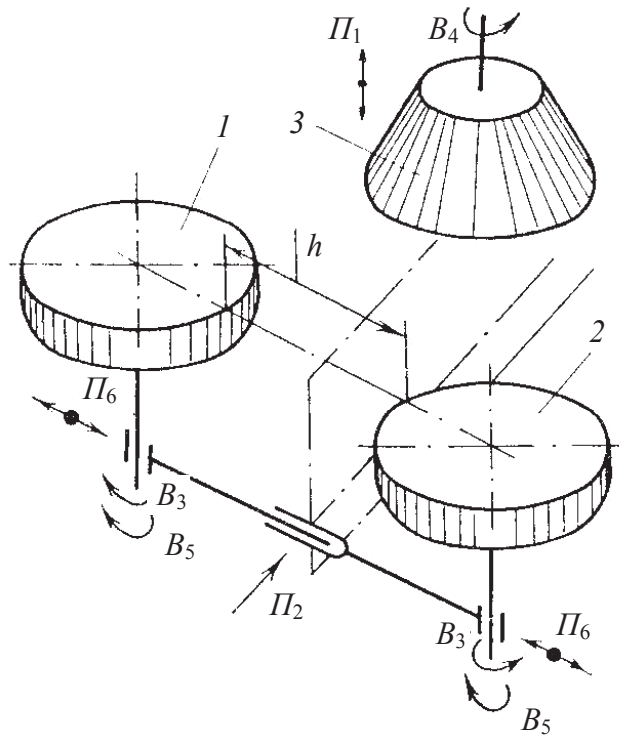
- 1) явления затирания, возрастания толщины стружки от основания к вершинной режущей кромке зубьев долбяка;
- 2) неодинаковость толщин стружек, срезаемых входной и выходной режущими кромками зубьев долбяка.

С увеличением двойных ходов долбяка отрицательное воздействие названных факторов возрастает.

В настоящее время в области зубодолбления из двух рассматриваемых направлений повышения производительности доминирующим является второе.

В разделе 1 был рассмотрен способ обкатного зубодолбления с касательным движением врезания (см. рисунок 1.6). Иное расположение заготовки относительно долбяка, предусмотренное схемой данного способа создает условия для обработки одним стандартным долбяком двух заготовок на двух позициях как параллельно (одновременно), так и последовательно. В этом случае некоторое усложнение структуры первообразного способа зубодолбления с касательным врезанием оправдывается существенным повышением производительности обработки.

На рисунке 6.6 представлен способ параллельного (одновременного) зубодолбления двух колес одним долбяком [56].



**Рисунок 6.6. – Способ параллельной обработки двух зубчатых колес одним долбяком**

По этому способу заготовки  $1$  и  $2$  устанавливают симметрично относительно направления резания с расстоянием  $h$  между делительными окружностями, равным делительному диаметру долбяка  $3$ . Затем долбяку  $3$  сообщают поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  скорости резания и процесс зубодолбления выполняют в два этапа. На первом этапе заготовкам  $1$  и  $2$  сообщают движение резания  $\Pi_2$ , согласованное с их вращением  $B_3$  в разные стороны, а долбяку  $3$  и заготовкам  $1$  и  $2$  – движение обката (профилирования), состоящее из согласованных вращений  $B_4$  долбяка и вращения  $B_5$  заготовок в одну сторону. Этот этап продолжают до тех пор, пока не будет достигнуто врезание долбяка на высоту зуба. После чего движение резания прекращают, и на втором этапе в течение полного оборота заготовок  $1$  и  $2$  профилируют зубья движением обката. На обоих этапах обработки заготовкам сообщают движение «отскока»  $\Pi_6$ , синхронизированное с движением  $\Pi_1$  для устранения затирания (обратного резания) долбяка по вершинным режущим кромкам при холостом ходе.

Структура рассматриваемого способа зубодолбления одновременно двух колес включает следующие элементы: приемы – установка заготовок 1 и 2, сообщение долбяку 3 движения  $\Pi_1$  скорости резания, сообщение заготовкам 1 и 2 движения врезания, состоящего из поступательного движения  $\Pi_2$  и согласованного с ним вращения  $B_3$  заготовок в разные стороны, сообщение заготовкам 1 и 2 и долбяку 3 движения обката (профилирования), состоящего из согласованных вращения  $B_4$  долбяка и вращения  $B_5$  заготовок в одну сторону, сообщение заготовкам движения «отскока»  $\Pi_6$ ; последовательности выполнения приемов – сначала установка заготовок, затем сообщение долбяку движения  $\Pi_1$ , а заготовкам – движения «отскока»  $\Pi_6$ , после этого одновременно сообщение движений врезания  $\Pi_2 B_3$  и обката  $B_4 B_5$ , наконец, после завершения врезания на высоту зуба прекращение движения  $\Pi_2 B_3$ ; правила выполнения отдельных приемов – определенность установки (базирования) заготовок относительно направления врезания, синхронизация движений  $\Pi_1$  и  $\Pi_6$ , существенно меньшая скорость движения врезания по сравнению со скоростью обката.

Задача, решаемая анализируемым способом обработки, – повышение (примерно удвоение) производительности зубообработки по сравнению с прототипом – первообразным способом по рисунку 1.6.

Этот способ как  $S$ -система отличается от прототипа по структуре и функции. Математическая модель кинематической подсистемы способа есть множество

$${}^k M = (J U E)_O \cup 2(J J U E)_H \cup (J J U E)_{Bp} \cup 2(J U E)_{Bc}.$$

Таким образом, кинематическая подсистема по сравнению с прототипом включает две дополнительные структуры, одна из которых воспроизводит профиль зубьев на второй заготовке, другая – ее отскок при холостом ходе долбяка.

Функция кинематической подсистемы есть множество

$${}^k F = \{ \{ M_{\mathcal{E}} \}_K, H^C - H^K, \{ \Phi_O(\downarrow \Pi_1), 2 \Phi_H(B_4 B_5), Bp(\Pi_2 B_3), /2 Bc(\downarrow \Pi_6) \} \}.$$

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 16.

Базирующая подсистема удваивается, то есть преобразуется в множество, состоящее из двух одинаковых подмножеств

$${}^o M = \{ \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^o M_i \}, \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^o M_i \} \}.$$

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен нулю.

Характерная особенность рассмотренного способа – неодинаковые условия резания на этапе врезания на обеих заготовках из-за различных суммарных скоростей подачи. Однако это не оказывает принципиального влияния на качество получаемых зубчатых колес, так как на этапе профилирования условия резания на обеих заготовках одинаковы. Тем не менее указанный недостаток устранен в следующем способе зубодолбления [57].

По этому способу (рисунок 6.7) заготовки 1 и 2 устанавливают с противоположных сторон долбяка 3 на расстоянии  $r$  от плоскости движения 4 движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка. При обработке долбяку 3 сообщают поступательно-возвратное движение  $\Pi_1$  скорости резания. На этапе касательного врезания заготовкам 1 и 2 сообщают движения  $\Pi_2$  навстречу друг другу и одновременно вращательные движения  $B_3$ , согласованные с движениями врезания  $\Pi_2$ . Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 3 не совместится с линией  $A-A$ , что соответствует окончанию врезания на высоту зуба. Затем движения  $\Pi_2$  и  $B_3$  прекращают, и на втором этапе долбяку и заготовкам сообщают движения обката (профилирования), состоящие из вращения  $B_4$  долбяка, согласованного с вращениями заготовок 1 и 2 в ту же сторону, что и при врезании. На обоих этапах заготовки сообщают также движение «отскока»  $\Pi_6$  в направлении, перпендикулярном плоскости резания.

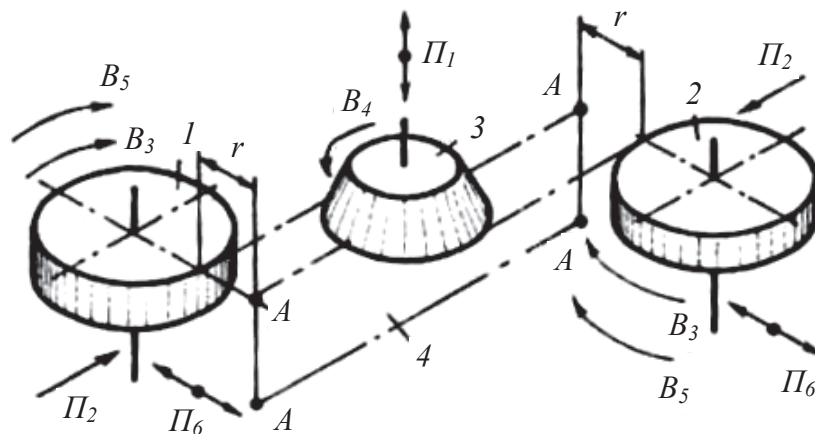


Рисунок 6.7. – Способ долбления двух зубчатых колес при встречном движении врезания

Данный способ как  $S$ -система отличается от предшествующего иным расположением заготовок относительно долбяка. Это обстоятельство

во является причиной включения в кинематическую подсистему способа дополнительной структурной составляющей для осуществления движения врезания. Таким образом, математическая модель кинематической подсистемы и ее функция есть множества:

$${}^k M = (J \cup E)_O \cup 2(JJ \cup E)_H \cup 2(JJ \cup E)_{Bp} \cup 2(J \cup E)_{Bc},$$

$${}^k F = \{ \{ M_{\mathcal{E}} \}_K, H^C - H^K, \{ \Phi_O(\downarrow \Pi_1), 2\Phi_H(B_4 B_5), 2Bp(\Pi_2 B_3), / 2Bc(\downarrow \Pi_6) \} \}.$$

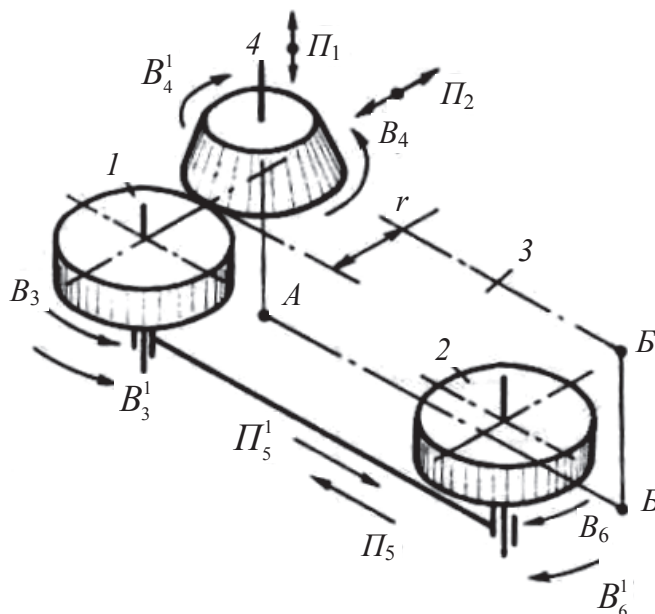
Критерий сложности кинематической подсистемы равен 16.

Базирующая подсистема так же, как и в предшествующем способе, удваивается, то есть преобразуется во множество, состоящее из двух одинаковых подмножеств:

$${}^{\sigma} M = \{ \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i \}, \{ \bigcup_{i=1}^3 {}^{\sigma} M_i \} \}.$$

Энергетическая подсистема совмещена с кинематической подсистемой. Критерий сложности этой подсистемы равен нулю.

На рисунке 6.8 показан способ зубодолбления с касательным врезанием [58], позволяющий установку каждой последующей заготовки совместить с обработкой предшествующей.



**Рисунок 6.8. – Способ последовательного зубодолбления двух заготовок при касательном врезании**



Заготовки 1 и 2 размещают в плоскости, отстоящей от плоскости касательного врезания 3 на расстоянии  $r$ , равном половине диаметра делительной окружности долбяка 4. В процессе обработки долбяк совершает поступательно-возвратное движение  $П_1$  скорости резания и синхронное с ним движение отскока  $П_2$  в плоскости, перпендикулярной направлению движения врезания. Профилирование заготовки 1 осуществляют согласованными вращательными движениями  $B_3$  заготовки и  $B_4$  долбяка в течение одного оборота заготовки после прекращения движения врезания. После завершения профилирования заготовки 1 долбяк 4 в движении  $П_1$  выводят в крайнее верхнее положение, движение  $B_4$  долбяка реверсируют (движение  $B_4^1$ ), а движение  $B_3$  заготовки 1 прекращают. Затем движением  $П_5$  на ускоренном ходе (позиционирование) заготовки совместно перемещают в положение, соответствующее исходному для обработки заготовки 2, где движение  $П_5$  переключают на подачу врезания (рабочий ход), долбяку 4 сообщают движение  $П_1$ , заготовке 2 – движение  $B_6$ , согласованное с движением  $П_5$ , и движение  $B_6^1$ , согласованное с движением  $B_4^1$  долбяка 4. Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 4 не совпадет с линией  $B-B$ , соответствующей окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В этом положении движение  $П_5$  прекращают, одновременно прекращают согласованное с ним движение  $B_6$  заготовки 2, и на втором этапе в течение одного оборота заготовки осуществляют профилирование ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений  $B_4^1$  долбяка и  $B_6^1$  заготовки 2. Во время профилирования заготовки 2 заменяется нарезанное зубчатое колесо новой заготовкой 1.

После завершения профилирования заготовки 2 долбяк выводят в крайнее верхнее положение, движение  $B_4^1$  реверсируют (движение  $B_4$ ), а движение  $B_6^1$  заготовки 2 прекращают. Затем на ускоренном ходе движением  $П_5^1$  заготовки перемещают в положение для обработки заготовки 1. В этом положении движение  $П_5^1$  переключают на подачу врезания, долбяку 4 сообщают движение  $П_1$ , а заготовке 1 – движение  $B_3^1$ , согласованное с движением  $П_5^1$ , и движение  $B_3$ , согласованное с движением  $B_4$  долбяка. Этап врезания продолжают до тех пор, пока ось долбяка 4 не совпадет с линией  $A-A$ . В этом положении движение  $П_5^1$  и согласованное с ним движение  $B_3^1$  заготовки 1 прекращают, и в течение полного оборота заготовки 1 осуществляют профилирование ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений  $B_3$  заготовки 1 и  $B_4$  долбяка.

Одновременно на этапе профилирования заготовки 1 устанавливают очередную заготовку 2 вместо обработанной и т.д.

Задача, решаемая данным способом, – повышение производительности зубообработки за счет совмещения вспомогательного времени, необходимого для замены нарезанного зубчатого колеса очередной заготовкой, с машинным временем обработки на другой позиции по сравнению с прототипом по рисунку 1.6.

Рассмотренный способ как  $S$ -система отличается от первообразного (прототипа) по структуре и функции. Составляющая его кинематическая подсистема содержит дополнительную составляющую  ${}^K M_{Bp} = JJ \cup E$ , функция которой  ${}^K F = Bp (P_5^1 B_6^1)$ .

Базирующая и энергетическая подсистемы совпадают с соответствующими подсистемами  $S$ -систем, представленных на рисунках 6.6 и 6.7.

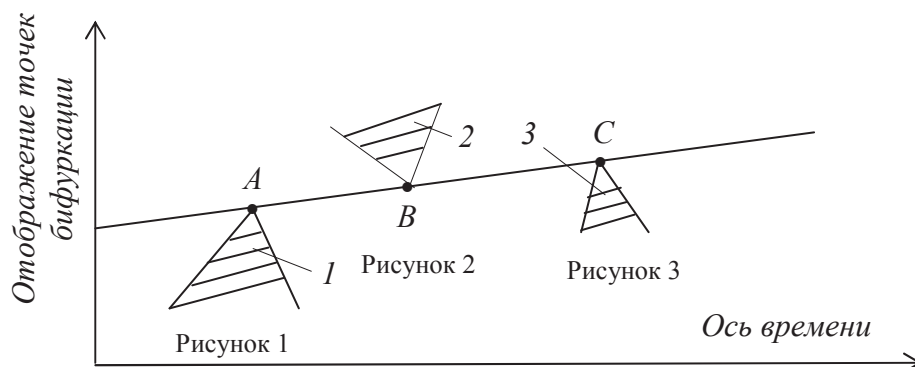
### **6.5 Синергетическая модель целенаправленного развития открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес**

Рассмотренный пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием (см. рисунок 1.1) и производные от него первообразные способы с касательным врезанием (см. рисунок 1.6) и со спиральным врезанием (см. рисунок 6.5) на первом уровне системного описания их кинематической подсистемы различаются только видом врезания. С позиций синергетики эта триада на поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес [2] в точке бифуркации образует аттрактор (коридор целенаправленного развития) способов обкатного зубодолбления.

Анализ патентных и других библиографических источников, показывает, что этот аттрактор содержит значительный массив способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, аналогами которых являются способы названной триады. Следовательно, данный аттрактор можно рассматривать как поле эволюции открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, состоящее из трех подмножеств, различающихся видом движения врезания (рисунок 6.9).

В точке бифуркации  $A$  аттрактор 1 пионерного способа обкатного зубодолбления содержит значительный массив траекторий эволюции подмножества способов обкатного зубодолбления с радиальным врезанием прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов внутреннего зацепления,

зубчатых секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, основанные в основном на изменении последовательности и правил выполнения приемов как пионерного, так и производных от него способов.



**Рисунок 6.9. – Поле ветвящихся путей целенаправленного развития подмножеств способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес**

В точке бифуркации *B* аттрактор 2 первообразного способа обкатного зубодолбления с касательным врезанием содержит массив эволюции подмножества способов зубодолбления цилиндрических колес внешнего зацепления. Однако наиболее рациональная область использования – долбление одним долбяком параллельно и последовательно двух зубчатых колес, зубчатых колес при их планетарном движении относительно долбяка и при совмещении зубодолбления с роторным перемещением пар долбяк – нарезаемое колесо.

В точке бифуркации *C* аттрактор 3 первообразного способа обкатного зубодолбления со спиральным врезанием содержит незначительный массив подмножества способов обкатного зубодолбления. Объясняется это тем, что эти способы осуществимы в основном в мехатронных обрабатывающих системах, то есть на зубодолбежных станках с ЧПУ.

## **7 РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ В СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

### **7.1 Парадигма познания кинематической структуры технологических машин**

В основу любой технологической машины, предназначенной для получения деталей заданной геометрической формы и размеров с требуемыми физико-механическими свойствами, положен вполне определенный способ или группа однотипных способов формообразующей обработки, различающихся преимущественно только последовательностью и правилами выполнения отдельных приемов. С точки зрения теории технических систем технологическую машину, в том числе металлорежущий станок, можно рассматривать в виде объединения кинематической структуры, системы управления и компоновки (несущей системы). Однако первичной базой большинства конструкций технологических машин является кинематическая структура, так как назначение такой машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на твердом теле. Несмотря на разнообразие технологических машин, предназначенных для выполнения не только различных, но и однотипных технологических операций, кинематическая структура любой из них базируется на ряде основных достаточно общих кинематических закономерностей, присущих всем машинам. В конструкции технологической машины кинематическая структура выражается кинематической схемой. Развитость ее, в первую очередь, зависит как от сложности воспроизводимой поверхности, так и от количества используемых источников энергии движения. Современная тенденция – использование не только в каждой кинематической группе, но и для каждого исполнительного органа отдельного электродвигателя, что обеспечивает сокращение количества передач в кинематических цепях и, как следствие, повышение кинематической точности, а также снижение шумовых характеристик технологического оборудования. Применение отдельных приводов обусловлено также развитием систем управления на базе электронной техники, например, систем ЧПУ и систем непосредственного компьютерного управления.

Среди многообразия технологических машин наиболее значительный класс как по количеству, так и по разнообразию вариантов и развитости кинематической структуры составляют металлорежущие станки.

Одним из свойств способа формообразующей обработки является промышленное применение, под которым в научно-технической эксперти-

зе изобретений понимается реализация способа в соответствующей технологической машине, в частности в металлорежущем станке. Поэтому далее будет рассмотрена кинематическая структура ряда зубообрабатывающих станков, в основу которых положены относительно новые соответствующие способы зубообработки, рассмотренные в предшествующих разделах. Существенное значение при этом имеет выбор парадигмы, то есть комплекса научных данных или аксиом, принимаемых за истину, на основе которых развивается научная теория, для анализа кинематической структуры и функции (принципа работы) металлорежущих станков.

В настоящее время в технической и учебной литературе используются две парадигмы для описания кинематических (структурных схем) металлорежущих станков. Автором *первой парадигмы* является профессор Г.М. Головин. Используя принцип возможных перемещений, известный в теоретической механике как принцип Даламбера, Г.М. Головин разработал единую теорию настройки металлорежущих станков и на ее основе ввел в практику учебного процесса курс кинематики металлорежущих станков, разработав соответствующее учебное пособие [59]. Целевая направленность этого курса – изучение и описание кинематической структуры станочного оборудования, вывод формул настройки для механических органов настройки этого оборудования (гитар сменных зубчатых колес, сменных шкивов и т.д.), расположенных в расчетных цепях, и специфических механизмов, используемых в станочном оборудовании на различных этапах развития станкостроения.

Теория настройки станков рассматривает кинематическую структуру станка как совокупность составляющих ее кинематических, в том числе расчетных, цепей, связывающих исполнительные органы станка между собой и с источником механической энергии. Наряду с выводом формул настройки эта теория длительное время используется для объяснения физической сущности функционирования металлорежущих станков при изучении их в системе профессионального образования различного уровня и при описании в технической литературе различного назначения. Определенные сомнения в корректности такого использования теории настройки высказывал ее автор. Описывая работу станка для точения резьбы (червяка) чашечным резцом типа долбяка, он отмечает: «Достоинством здесь оказывается и то обстоятельство, что при выполнении резьбовых работ шаг ( $n \cdot t$ ) изготавливаемой резьбы оказывается получающимся независимо от подачи ( $s$ ), при которой производится обработка. Это парадоксальное явление может быть объяснено тем обстоятельством, что возникающий при

этом процесс распадается на составляющие его части, одной из которых является копирование инструментом и заготовкой в каждый отдельный момент, независимо от участия в процессе движения подачи, работы червячной передачи, а второй – процесс резания, обеспечиваемый подачей независимо от того, участвуют ли инструмент и заготовка в копировании работы червячной передачи или же нет» [59]. Данное парадоксальное явление, по существу, является противоречием между кинематической структурой технической системы (металлорежущего станка), рассматриваемой на основе принципа возможных перемещений, и функцией этой системы, основанной на ином законе теоретической механики. Это противоречие разрешил автор *второй парадигмы* профессор А.А. Федотенок, разработавший на основе закона разветвления энергии движения в механических цепях современную теорию кинематической структуры металлорежущих станков [17]. По этой теории кинематика станка – это объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит конкретное элементарное (вращательное или поступательное) или сложное, состоящее из элементарных исполнительное рабочее или вспомогательное движение, характеризующееся вполне определенными настраиваемыми параметрами. При этом теория настройки станков кумулятивно, то есть без изменений вошла в теорию кинематической структуры как ее составная часть.

*Понятие о кинематической структуре* [17; 60]. Металлорежущие станки общего назначения, как правило, включают несколько частных кинематических структур. Например, универсальные токарно-винторезные станки обычно содержат следующие частные кинематические структуры: для нарезания резьбы (обработка винтовых поверхностей); для продольного точения (обработка цилиндрических поверхностей); для поперечного точения (обработка торцевых поверхностей). Каждая частная структура реализует вполне определенный способ формообразующей обработки.

В разделе 3 рассмотрена схема классического способа нарезания резьбы фасонным резцом (см. рисунок 3.1), у которого характеристический образ соответствует профилю нарезаемой резьбы. По этой схеме заготовке  $1$ , определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу  $2$  – поступательное движение  $P_2$ , функционально связанное с движением  $B_1$  заготовки. Класс образования резьбы (винтовой поверхности) копирование – след  $(E-H^C)$ . Причем сложное исполнительное движение  $\Phi_1(B_1P_2)$ , состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного  $B_1$  и поступательного  $P_2$ , воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверх-

ности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна осуществлять только одно сложное формообразующее движение, состоящее из двух функционально связанных элементарных вращательного и поступательного движений.

Для создания траектории сложного исполнительного движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , воспроизводящего на заготовке  $1$  направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы (рисунок 7.1), соединяют шпиндель  $3$ , смонтированный в подшипниках передней бабки  $4$ , с тяговым валом ( $TB$ ) каретки  $5$ , несущей резец  $2$ , посредством жесткой кинематической связи в виде штриховой линии  $6-7$ . Эта связь, состоящая из последовательно соединенных передач, накладывает ограничения на шпиндель  $3$  и каретку  $5$ , не позволяющие им занимать произвольные положения относительно друг друга и иметь произвольные скорости. Данная связь (кинематическая цепь) создает потенциальную возможность винтового движения. Для реализации этой возможности соединяют произвольное промежуточное звено  $9$  кинематической связи  $6-7$  с электродвигателем  $M$  (кинематическая связь  $8-9$ ).

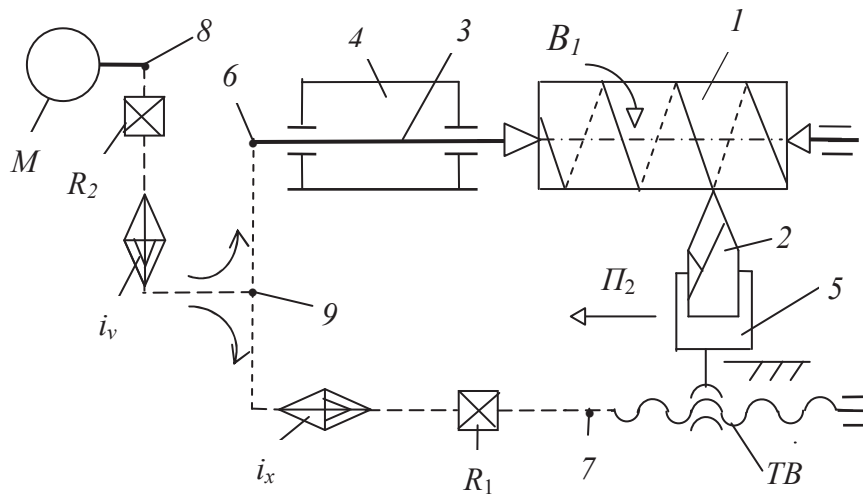


Рисунок 7.1. – Структурная схема станка для нарезания резьбы

При включении электродвигателя энергия движения по кинематической связи  $8-9$  будет сообщаться через звено  $9$  в кинематическую связь  $6-7$ . Это вызовет вращение  $B_1$  шпинделя, несущего заготовку, и продольное перемещение  $\Pi_2$  каретки, несущей резец. В итоге характеристический образ резца будет совершать относительно заготовки винтовое движение. При этом соотношение элементарных движений  $B_1$  и  $\Pi_2$  зависит только от передаточного отношения кинематической связи  $6-7$ . Следовательно, эта связь обеспечивает качественную характеристику движения  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , то есть его

траекторию. Кинематическую связь, воспроизводящую траекторию исполнительного движения, называют *внутренней связью*. Количественную характеристику исполнительного движения, то есть скорость воспроизведения направляющей, обеспечивает кинематическая связь 8–9, соединяющая источник энергии с внутренней связью. Такую связь принято называть *внешней связью*. Внутренняя и внешняя связи имеют общее кинематическое звено 9, называемое *звеном соединения связей*.

Совокупность источника энергии движения исполнительных органов, внутренней и внешней связей, называется *кинематической группой* с названием, соответствующим названию движения, которое создает эта группа.

Таким образом, внутренняя связь сложной винторезной кинематической группы при функционировании имитирует передачу «винт – гайка». Скорость этой имитации (темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности) зависит только от скорости звена соединения связей, являющегося конечным звеном внешней связи. Это правило характерно для любой сложной формообразующей группы, имитирующей другую передачу, например, червячную, зубчатую, зубчато-реечную.

Сложное винтовое движение имеет незамкнутую траекторию. Следовательно, оно должно настраиваться по всем пяти параметрам. Для этого во внутреннюю связь устанавливают два органа настройки:  $i_x$  и  $R_1$ . Средством первого из них настраивают шаг нарезаемой резьбы, а посредством второго – возможность нарезания левой или правой резьбы. Во внешней связи устанавливают орган настройки на скорость  $i_v$  воспроизведения направляющей и технологический реверс  $R_2$ , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке в исходное положение или при задании направления нарезания резьбы к передней бабки или от нее.

Расположение звена соединения связей 9 имеет принципиальное значение и зависит от расчетной цепи для органа настройки  $i_v$ . Элементарные движения  $B_1$  и  $P_2$ , образующие сложное движение  $\Phi_v(B_1P_2)$ , всегда одновременны и одинаковы по продолжительности. Это позволяет оценивать скорость сложного исполнительного движения через скорость одного из входящих в него элементарных движений. По сложившейся традиции в теории резания это движение исполнительного органа, имеющего большую скорость и потребляющего большую мощность. В рассматриваемой структурной схеме это шпиндель 3. Следовательно, звено соединения связей 10 целесообразно располагать между шпинделем 3 и органом настройки на траекторию  $i_x$ .



Органы настройки исполнительного движения на путь и исходную точку, как правило, на схемах не показывают. Регулирование этих параметров на станках с ручным управлением обычно осуществляют вручную по лимбам (упорам), на станках-автоматах с механическими связями – жесткими программносителями (кулачками), на станках, оснащенных системами ЧПУ, программно, например, непосредственно на дисплее устройства ЧПУ.

Описание связей структурной схемы винторезного станка, состоящего из одной кинематической группы, приведено на вербальном языке. При системном анализе (познании) кинематической структуры следует отдать предпочтение языку символов, так как это обеспечивает большую наглядность и компактность описания. Приведем описание рассмотренной кинематической структуры станка на языке символов, используемом в научной литературе по станковедению и в учебной литературе для вузов.

Внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 6 \leftarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 7 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 9.$$

Разнонаправленные стрелки в описании внутренней связи показывают направление разветвлений энергии движения после звена соединения связей 9 по обеим ветвям внутренней связи.

Вывод на основе принципа возможных перемещений формул настройки (ФН) для органов настройки  $i_x$  и  $i_v$ .

Орган настройки  $i_x$ . Внутренняя связь кинематической группы  $\Phi_v(B_1P_2)$  содержит один орган настройки. Поэтому расчетная цепь для этого органа настройки совпадает с внутренней связью. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для органа настройки  $i_x$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (P_2),$$

где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ):

$$P = 1 \cdot i_x \cdot i_{01} \cdot P_{TB},$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;  $P_{TB}$  – шаг тягового вала.

ФН:

$$i_x = P/c_1,$$

где  $c_1 = i_{01} \cdot P_{TB}$  – константа.

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь связывает электродвигатель  $M$  со шпинделем 3 станка. Следовательно, РП для органа настройки  $i_v$  имеют следующий вид:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1),$$

Тогда, УКЦ:

$$n_{ш} = n_M \cdot i_v \cdot i_{02},$$

где  $i_{02}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;

ФН:

$$i_v = n_{ш} / c_2,$$

где  $c_2 = n_M \cdot i_{02}$  – константа.

Выше (см. рисунок 1.5) приведена схема пионерного способа механической обработки цилиндрической поверхности резцом. Характеристический образ инструмента – вершина резца (точка, или поверхность малой протяженности). При обработке заготовки 1 сообщают вращательное движение  $B_1$ , а резцу 2 – поступательное  $П_2$ . Класс образования поверхности след – след ( $H^C-H^C$ ). При этом элементарное движение  $\Phi_v(B_1)$  воспроизводит образующую реальной геометрической поверхности (окружность), а элементарное движение  $\Phi_s(П_2)$  – направляющую (прямую линию, параллельную оси заготовки). Следовательно, частная токарная структура станка для обработки цилиндрической поверхности должна осуществлять два элементарных формообразующих движения (вращательное и поступательное) соответствующими формообразующими группами.

Спроектируем обе формообразующие группы и объединим их в частную структурную схему токарного станка с общим электродвигателем (рисунок 7.2). Обычно внутренняя связь простой кинематической группы – это вращательная или поступательная кинематическая пара. В этом случае траектория исполнительного движения (окружность или прямая линия) обеспечивается конструкцией исполнительного органа.

Группа  $\Phi_v(B_1)$ , воспроизводящая образующую. Ее внутренняя связь – вращательная кинематическая пара

*корпус передней бабки 4 → шпиндель 3, несущий заготовку 1 ( $B_1$ ).*

Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_v(B_1)$  и обеспечивает его качественную характеристику, то есть траекторию.

Соединим вращающееся звено внутренней связи (шпиндель 3) посредством внешней связи с электродвигателем  $M$ . Вращательное движение  $B_1$  имеет замкнутую траекторию и настраивается по двум параметрам – на ско-

рость воспроизведения образующей и направление. Поэтому установим во внешней связи соответствующие органы настройки  $i_v$  и  $R_1$ .

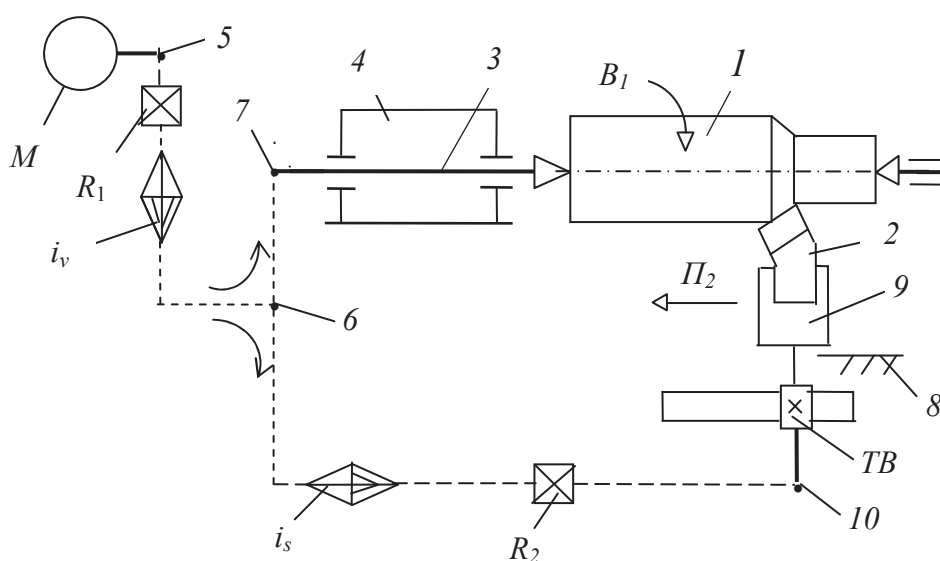
Таким образом, внешняя связь группы  $\Phi_v(B_1)$  имеет вид:

$$M \rightarrow 5 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow \text{шпиндель } 3 (B_1).$$

Группа  $\Phi_s(\Pi_2)$  – воспроизводящая направляющую. Внутренняя связь этой группы – поступательная кинематическая пара

*направляющие 8 станины станка → каретка 9, несущая резец 2 ( $\Pi_2$ ).*

Эта связь создает потенциальную возможность движения  $\Phi_s(\Pi_2)$  и обеспечивает его качественную характеристику, то есть траекторию.



**Рисунок 7.2. – Структурная схема станка для обработки цилиндрической поверхности**

Соединим  $TB$  (зубчато-реечная передача), преобразующий вращательное движение ведущего звена – реечного колеса – в поступательное движение каретки 9 посредством внешней связи 5–6–10 с электродвигателем  $M$ . Поступательное движение  $\Pi_2$  каретки имеет незамкнутую траекторию и настраивается по четырем параметрам. Орган настройки  $i_s$  – на скорость воспроизведения направляющей; орган настройки  $R_2$  на направление устанавливают во внешней связи. Настройку на путь и исходную точку (исходное положение) осуществляют, как и в винторезной структуре, по упорам.

В структуре токарного станка обе формообразующие группы соединены через общий электродвигатель и межгрупповую связь (общую часть внешних связей 5–6 обеих групп). В токарных станках с общим электродвигателем по традиции, сложившейся задолго до создания теории кине-

матической структуры, принято скорость подачи задавать относительно одного оборота шпинделя. По существу, скорость воспроизведения направляющей (прямой, параллельной оси, воспроизводимой поверхности) задается относительно абсолютной скорости воспроизведения образующей (окружности). В этом случае проявляется противоречие между понятием функции кинематической структуры станка и его настройкой. В токарных станках с ЧПУ, оснащаемых отдельным приводом групп скорости резания и подачи, такого противоречия нет. При проектировании в этих станках скорость (подача) воспроизведения направляющей задается абсолютным значением.

Вывод ФН для органов настройки  $i_v$  и  $i_s$ .

Орган настройки  $i_v$ . Расчетная цепь совпадает с внешней связью. Следовательно, РП для этого органа настройки имеют вид:

$$n_{M1} \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1).$$

Тогда УКЦ:

$$n_{ш} = n_{M1} \cdot i_v \cdot i_{03},$$

где  $i_{03}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

ФН:

$$i_v = n_{ш} / c_3,$$

где  $c_3 = n_{M1} \cdot i_{03}$  – константа.

Орган настройки  $i_s$ . Расчетная цепь связывает шпиндель 3 с кареткой 5. Следовательно, РП для органа настройки  $i_s$  имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя } 3 \rightarrow s \text{ мм перемещения каретки } 5 (P_2).$$

Тогда УКЦ:

$$s = 1 \cdot i_s \cdot i_{04} \cdot [P_{ТВ} = \pi \cdot m \cdot z],$$

где  $P_{ТВ}$  – шаг тягового вала;  $m$  и  $z$  – модуль и число зубьев колеса зубчатой передачи, выполняющей функцию ТВ;  $i_{04}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

ФН:

$$i_s = s / c_4,$$

где  $c_4 = i_{04} \cdot \pi \cdot m \cdot z$  – константа.

На этапе интуитивного познания металлорежущих станков в виде совокупности кинематических цепей рассмотренные структурные схемы практически неразличимы. В частности, орган настройки на траекторию исполнительного движения в винторезной структуре рассматривался как

орган настройки на скорость подачи инструмента. В результате сложное двухэлементарное винтовое движение, воспроизводящее направляющую резьбы, разлагается на два элементарных (вращательное и поступательное), функционально не связанных между собой. По существу, винторезная структура станка трансформируется в структуру станка для продольного точения.

На основе рассмотренного примера можно утверждать о том, что *вторая парадигма*, основанная на современной теории кинематической структуры металлорежущих станков, объективно строго на научной основе рассматривает структуру, функцию и настройку станочного оборудования.

Из приведенного примера следует, что вторая парадигма на основе двух законов теоретической механики объективно раскрывает сущность кинематической структуры, настройку и функцию (принцип работы) станка. Поэтому именно эта парадигма будет использоваться при анализе зубообрабатывающих станков в последующих разделах. Уместно отметить, что кинематическая структура станка для точения резьбы (червяка) чашечным резцом типа долбяка, обсуждаемая автором теории настройки, подробно рассмотрена на языке второй парадигмы в работе [60].

## **7.2 Зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями**

Выше (см. рисунок 4.7) рассмотрен способ долбления цилиндрических колес с наклонными по делительной окружности зубьями. На рисунке 7.3 представлена частная структура зубодолбежного станка [41], реализующего названный способ формообразующей обработки. В суппорте 3 смонтирована с возможностью поступательно-возвратного движения гильза 4, в которой установлен шпиндель 1, несущий долбяк. Суппорт закреплен на стойке 20 с обеспечением качательного движения относительно оси червяка делительной передачи 10 шпинделя 1. Качательное движение шпинделя осуществляется кулачковым механизмом, включающим кулачок 14, толкатель 13, соединенный шарниром 12 с суппортом 3, и пружину, обеспечивающую силовое замыкание. Кулачок 14 посредством передач 15 и 16 кинематически связан с ведущим звеном 18 (приводной вал станка) кулисного механизма 2 привода поступательно-возвратного движения гильзы 4. Источником энергии для кулисного механизма является электродвигатель  $M_1$ , соединенный посредством передач 19 и 17 с приводным валом.

Червяк делительной передачи 10 шпинделя 1 посредством настраиваемой расчетной цепи обката (внутренняя связь группы обката), содер-

жашей органа настройки  $i_x$  соединен с делительной передачей 8 делительного стола 6, на котором устанавливаются обрабатываемые заготовки 5. Привод круговых подач осуществляется электродвигателем  $M_2$ , кинематически связанным через орган настройки  $i_s$  и передачу 11 с цепью обката. В приводе радиального врезания на высоту зуба, нарезаемого колеса, используется гидроцилиндр 9.

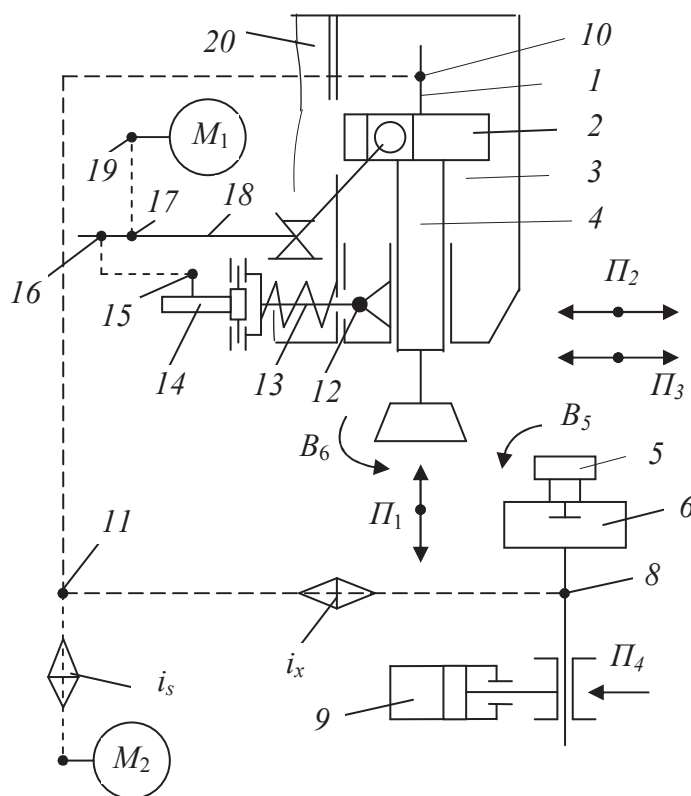


Рисунок 7.3. – Кинематико-компоновочная структура зубодолбежного станка

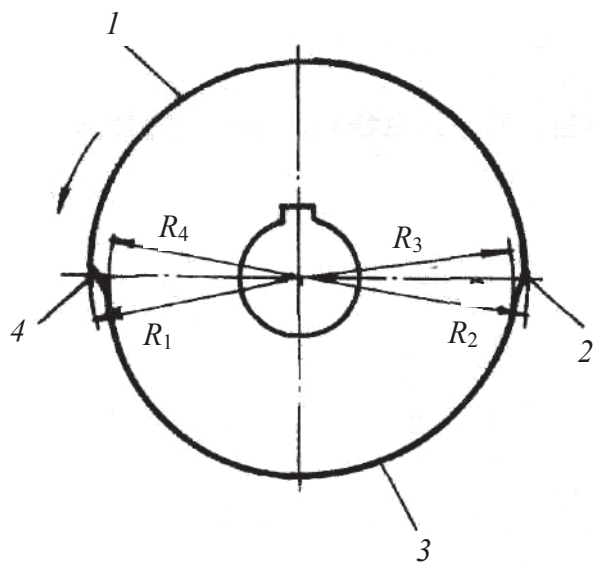
Кулачок (рисунок 7.4) кулачкового механизма имеет форму диска с отверстием для его установки на станке. Рабочий профиль кулачка выполнен в виде двух дуг 1 и 3, разделенных переходными кривыми 2 и 4. Дуги 1 и 3 выполнены по архимедовой спирали. При указанном направлении вращения кулачка дуга 1 соответствует движению резания в поступательно-возвратном движении долбяка  $\Pi_1$ , а дуга 3 – его возвратному движению. При этом конечный радиус  $R_2$  дуги 1 больше ее начального радиуса  $R_1$ , а конечный радиус  $R_4$  дуги 3 меньше ее начального радиуса  $R_3$ .

Разности радиусов для обеих дуг одинаковы и равны пути  $l$  дополнительного движения  $\Pi_2$  долбяка. То есть

$$(R_2 - R_1) = (R_3 - R_4) = l.$$

Таким образом, разности радиусов  $(R_2 - R_1)$  и  $(R_3 - R_4)$  равны пути дополнительного радиального равномерного перемещения долбяка в движении  $\Pi_2$ .

Переходные кривые 2 и 4 выполнены в виде дуг окружности, радиус которой соответствует радиусу ролика толкателя кулачкового механизма.



**Рисунок 7.4. – Кулачок – орган настройки на траекторию движения  $\Phi_s(\Pi_2\Pi_3)$**

Разности радиусов  $(R_1 - R_4)$  и  $(R_2 - R_3)$  равны пути отвода («отскока») долбяка в движении  $\Pi_3$ . Следовательно, при введенном выполнении кулачка его профиль как жесткий, физический программноситель несет информацию о двух элементарных движениях  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ , которые в соответствии с описанным ранее способом зубодолбления должны осуществляться синхронно и синфазно с движением  $\Pi_1$ . Причем движение  $\Pi_2$  совместно с движением  $\Pi_1$  образует сложное формообразующее движение  $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$ , воспроизводящее линию зуба нарезаемого колеса по делительному конусу.

Формообразующее движение  $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$  в кинематической структуре станка воспроизводится кинематической группой того же названия. Эта группа воспроизводит образующую зубчатого колеса – линию зуба.

Ее внутренняя связь:

$\Pi_1 \rightarrow$  гильза 4  $\rightarrow$  кулисный механизм 2  $\rightarrow$  приводной вал 18  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  передача 16  $\rightarrow$  передача 15  $\rightarrow$  кулачок (орган настройки  $i_x$ )  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  толкатель 13  $\rightarrow$  шарнир 12  $\rightarrow$  суппорт 3  $\rightarrow \Pi_2$ .

Внешняя связь:

$M_1 \rightarrow$  передача 19  $\rightarrow$  передача 17  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  приводной вал 18 (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию кулачком 14, на скорость, путь и исходную точку – органами настройки базового станка.

Группа обката  $\Phi_s(B_5B_6)$  воспроизводит направляющую зубчатого колеса – профиль зубьев. Ее внутренняя связь:

$B_6 \rightarrow$  шпиндель 1  $\rightarrow$  передача 10  $\rightarrow$  передача 11  $\rightarrow i_y$   
 $\rightarrow$  делительный стол 5  $\rightarrow B_5$ .

Внешняя связь:

$M_2 \rightarrow i_s \rightarrow \text{передача } II \text{ (звено соединения связей)}$ .

Группа настраивается на траекторию и скорость так же, как и аналогичная группа базового станка.

Группа врезания  $Vp(II_4)$  долбяка на высоту зуба имеет простую структуру. Ее внутренняя связь:

*направляющие станины*  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  *продольный стол, несущий делительный стол б.*

Внешняя связь:

*гидроцилиндр 9*  $\rightarrow$  *продольный стол (звено соединения связей)*.

Группа настраивается на скорость, путь и исходную точку органами настройки базового станка.

В структуре станка нет группы  $Vc(II_3)$ . Функцию движения  $II_3$  отвода долбяка при его возвратном ходе в движении  $II_1$  выполняет группа  $\Phi_v(II_1 II_2)$  за счет формы рабочего профиля кулачка кулачкового механизма.

Станок работает следующим образом. Заготовка 5 устанавливается на делительном столе б. Затем включается электродвигатель  $M_1$ , сообщаящий вращательное движение приводному валу 18. От этого вала долбяк получает поступательно-возвратное движение  $II_1$  и синхронно с ним посредством кулачкового механизма поступательно-возвратное радиальное движение, представляющее собой геометрическую сумму дополнительно равномерного движения  $II_2$  и поступательно-возвратного движения  $II_3$  подвода-отвода долбяка на участках верхнего и нижнего перебегов. В итоге долбяк совершает поступательно-возвратное движение по траектории в виде прямой, наклоненной к оси заготовки на угол, равный углу наклона зубьев колеса. При включении электродвигателя  $M_2$  долбяку и делительному столу с заготовкой сообщается движение обката со скоростью круговой подачи, состоящее из согласованных вращений  $V_5$  делительного стола и  $V_6$  долбяка. Движение обката обеспечивает воспроизведение профиля зубьев колеса. Одновременно на этапе врезания на высоту зубьев делительному столу сообщается движение  $II_4$  посредством гидроцилиндра 9. По окончании этапа врезания в течение полного оборота делительного стола выполняется профилирование цилиндрического зубчатого колеса с наклонными по делительному конусу зубьями.

При выполнении кулачкового механизма со сменным кулачком на станке можно обрабатывать цилиндрические зубчатые колеса с различными углами наклона зубьев при соответствующем профилировании сменных кулачков. В кулачковом механизме можно использовать также кула-



чок, у которого дуги 1 и 3 (см. рисунок 7.4) рабочего профиля имеют иную форму. Это позволяет нарезать зубчатые колеса с бочкообразными зубьями. А при использовании кулачка, у которого рабочие профили выполнены в виде дуг окружностей, можно нарезать традиционные зубчатые колеса с линией на делительном цилиндре. В этом случае сложная формообразующая группа  $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$  преобразуется в простую  $\Phi_v(\Pi_1)$ . Одновременно образуется группа отвода-подвода (радиального отскока) долбяка  $Vc(\Pi_3)$ , обеспечивающая отвод долбяка при его возвратном ходе в движении  $\Pi_1$ .

Рассмотренная схема может быть использована при модернизации современных зубодолбежных станков для расширения их универсальности. Ее можно также использовать при проектировании станков с ЧПУ, так как группа  $\Phi_v(\Pi_1\Pi_2)$ , воспроизводящая линию зуба колеса по делительному конусу, в этом случае не изменяется.

### 7.3 Зубофрезерные станки для нарезания цилиндрических колес с наклонными зубьями

На рисунке 7.5 приведена структурная схема зубофрезерного станка [26], реализующего описанный выше (см. рисунок 3.13) способ фрезерования червячной фрезой цилиндрических колес с наклонными зубьями.

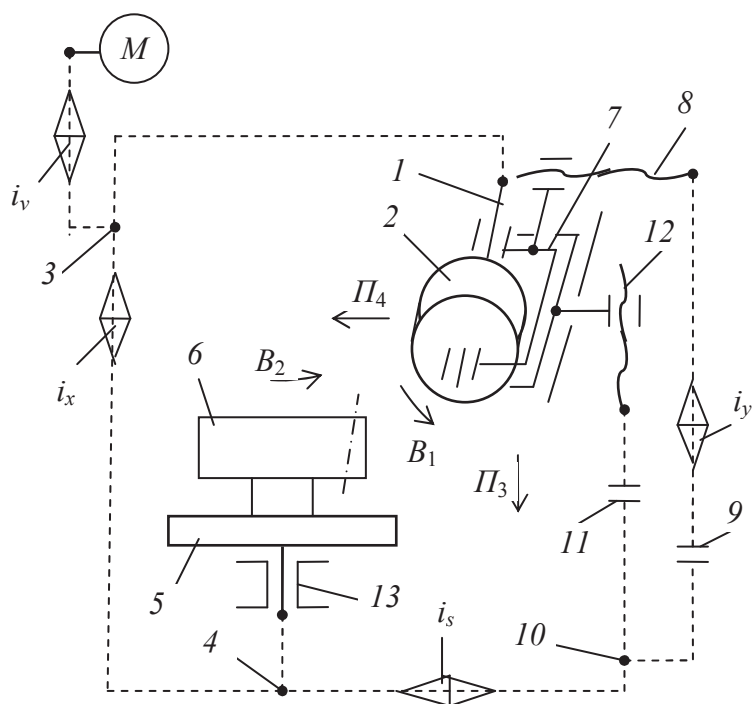


Рисунок 7.5. – Структурная схема зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

Кинематическая структура станка с механическими связями включает двухэлементарные группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(P_3P_4)$ , связанные между собой общим электродвигателем.

Группа скорости резания воспроизводит образующую (профиль зубьев).

Ее внутренняя связь:

$B_1 \rightarrow$  шпиндель 1 фрезы 2  $\rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow$  делительный стол 5,  
несущий заготовку 6  $\rightarrow B_2$ .

Внешняя связь:

$M \rightarrow i_v \rightarrow 3$  (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию и скорость (резания) органами настройки  $i_x$  и  $i_v$  соответственно.

Группа подачи воспроизводит направляющую (линию зуба).

Ее внутренняя связь:

$P_3 \rightarrow$  суппорт 7 фрезы  $\rightarrow$  тяговый вал 12  $\rightarrow$  муфта 11  $\rightarrow 10 \rightarrow$   
 $\rightarrow$  муфта 9  $\rightarrow i_y \rightarrow$  тяговый вал 8  $\rightarrow P_4$ .

Внешняя связь:

$M \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow i_s \rightarrow 10$  (звено соединения связей).

Группа настраивается на траекторию и скорость (подачи) органами настройки  $i_y$  и  $i_s$  соответственно; на путь и исходное положение – по упорам системы управления.

В станках с механическими связями органы настройки на траекторию обоих формообразующих движений и органы настройки на скорости резания и подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес. Формулы настройки для органов настройки на траектории формообразующих движений выводятся на основе расчетных перемещений, приведенных при обсуждении способа зубофрезерования, а формулы настройки для органов настройки на скорость резания и подачу выводятся на основе правил, принятых для зубофрезерных станков.

Станок работает следующим образом. По циклу обработки после установки заготовки на делительном столе включается электродвигатель  $M$ . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель фрезы 2 получает вращательное движение  $B_1$  скорости резания. Одновременно делительный стол 5, несущий заготовку 6, получает вращательное движение  $B_2$ , согласованное с движением  $B_1$ . Согла-

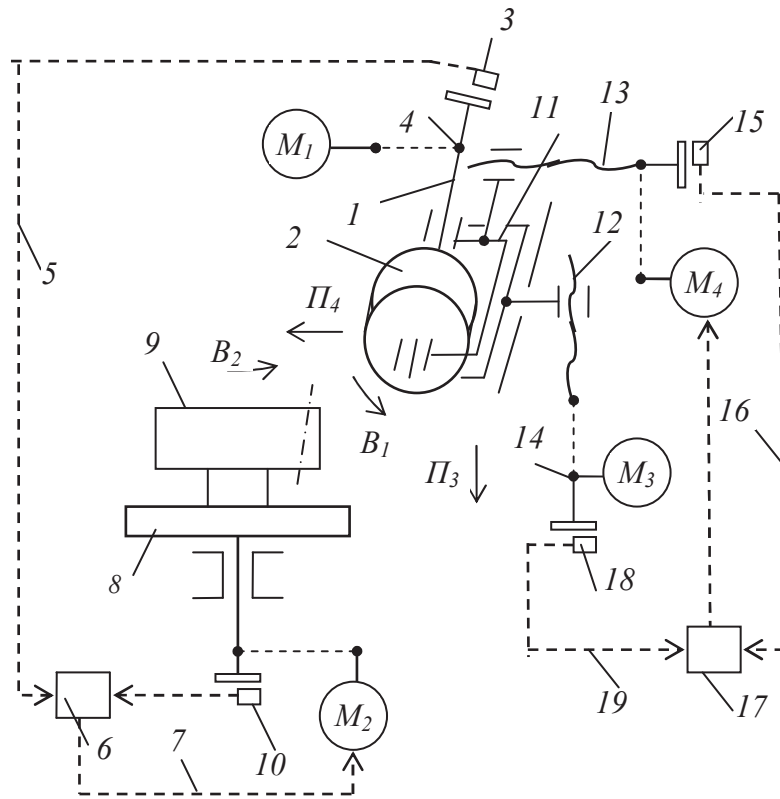
сованные движения  $B_1$  и  $B_2$  воспроизводят профиль зубчатого венца. Затем после включения муфт 9 и 11 движение от электродвигателя  $M$  по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 10 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге суппорт 7 фрезы получает два согласованных между собой движения: продольной подачи  $P_3$  и радиальной подачи  $P_4$ . В результате профиль каждого зуба будет воспроизводиться по линии зуба, представляющей собой результирующую траекторию движений  $P_3$  и  $P_4$ , наклоненной к оси заготовки на заданный при настройке угол, то есть по делительному конусу.

На станке можно обрабатывать также традиционные зубчатые колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого достаточно посредством муфты 9 отключить тяговый вал 8, обеспечивающий движение  $P_4$  радиальной подачи суппорта фрезы. В итоге сложная группа  $\Phi_s(P_3 P_4)$  преобразуется в простую группу продольной подачи  $\Phi_s(P_3)$ , осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

Кинематическая структура рассматриваемого станка может быть выполнена также по схеме с отдельными электродвигателями в формообразующих группах. Для этого достаточно орган настройки  $i_s$  отсоединить от кинематического звена 4, а его вход соединить с отдельным электродвигателем группы подач.

Такая модификация кинематической структуры обеспечивает возможность оснащения станка простейшей системой ЧПУ с использованием программируемого контроллера. В этом случае из схемы исключаются органы настройки на скорость резания  $i_y$  и подачу  $i_s$ , и в обеих группах устанавливаются регулируемые электродвигатели. При этом настройка на траекторию обоих формообразующих движений, как и в схеме с механическими связями, будет осуществляться органами настройки  $i_x$  и  $i_y$ . Такой вариант станка рационален в серийном производстве с установившейся номенклатурой зубчатых колес. При уменьшении серийности при одновременном увеличении номенклатуры обрабатываемых колес возрастают трудозатраты на переналадку органов настройки на траекторию, что ведет к снижению коэффициента мобильности станка. Поэтому для достижения высокого коэффициента мобильности в единичном и мелкосерийном производстве с неустановившейся номенклатурой необходима более сложная система ЧПУ, при которой механические органы настройки можно заменить электронными связями между исполнительными органами в обеих формообразующих группах. Обязательным условием при этом является использование в сложных формообразующих группах на каждом исполни-

тельном органе отдельного регулируемого электродвигателя. Этим условиям отвечает структурная схема станка, приведенная на рисунке 7.6.



**Рисунок 7.6. – Структура зубофрезерного станка с ЧПУ для обработки колес с наклонными зубьями**

Кинематическая структура станка включает не связанные между собой формообразующие группы  $\Phi_v(B_1B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3\Pi_4)$ . В обеих группах функциональная связь между исполнительными органами осуществляется системой отслеживающей синхронизации (показана пунктирными стрелками), выполненными по схеме ведущая координата – ведомая координата. Связь механики с системой синхронизации в группе  $\Phi_v$  обеспечивается посредством импульсных измерительных преобразователей 3 и 10, а в группе  $\Phi_s$  – посредством таких же преобразователей 15 и 18.

В группе скорости резания  $\Phi_v(B_1 B_2)$  ведущей координатой является шпиндель 1 фрезы 2. Внутренняя связь этой группы:

$B_1 \rightarrow$  шпиндель 1 фрезы 2  $\rightarrow$  4  $\rightarrow$  импульсный измерительный преобразователь 3  $\rightarrow$  электрическая цепь (электрический вал) 5  $\rightarrow$   $\rightarrow$  блок автоматического управления 6  $\rightarrow$  электрическая цепь 7  $\rightarrow$   $\rightarrow$   $M_2 \rightarrow$  делительный стол 8 с заготовкой 9  $\rightarrow$   $B_2$ .

Внешняя связь:

$M_1 \rightarrow$  звено соединения связей 4.

Таким образом, система синхронизации включает импульсный измерительный преобразователь 3, установленный на шпинделе и соединенный электрической цепью 5 с блоком автоматического управления 6 электродвигателя  $M_2$  делительного стола. В систему синхронизации входит также цепь адаптации, включающая импульсный измерительный преобразователь 10, электрически соединенный с блоком 6. Эта цепь обеспечивает повышение точности функционирования группы посредством устранения девиации механики ведомого исполнительного органа – делительного стола.

Группа настраивается на траекторию посредством делителя частоты системы синхронизации и на скорость (резания) – посредством делителя напряжения системы ЧПУ станка.

В группе подачи  $\Phi_s(P_3P_4)$  ведущей координатой является фрезерный суппорт 11 в движении  $P_3$ . Внутренняя связь этой группы:

$P_3 \rightarrow$  фрезерный суппорт 11  $\rightarrow$  тяговый вал 12  $\rightarrow$  14  $\rightarrow$  импульсный измерительный преобразователь 18  $\rightarrow$  электрическая цепь 19  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  блок автоматического управления 17  $\rightarrow$  электрическая цепь 16  $\rightarrow$   
 $\rightarrow M_4 \rightarrow$  тяговый вал 13  $\rightarrow$  фрезерный суппорт  $\rightarrow P_4$ .

Внешняя связь:

$M_3 \rightarrow$  звено соединения связей 14.

В систему синхронизации входит также цепь адаптации, включающая импульсный измерительный преобразователь 15, установленный на тяговом валу 13 и соединенный с блоком 17. Эта цепь обеспечивает повышение точности функционирования группы посредством устранения девиации механики ведомого исполнительного органа – фрезерного суппорта 11. Группа настраивается на траекторию посредством делителя частоты системы синхронизации, на скорость (подачи) – посредством делителя напряжения устройства ЧПУ станка, на путь и исходное положение – цикловым автоматом устройства ЧПУ. На станке можно обрабатывать также колеса с линией зуба на делительном цилиндре. Для этого необходимо отключить систему отслеживающей синхронизации группы  $\Phi_s(P_3P_4)$ . В итоге эта сложная группа преобразуется в простую группу продольной подачи  $\Phi_s(P_3)$ , осуществляющей перемещение фрезы по траектории, параллельной оси нарезаемого колеса.

Рассмотренные структурные схемы зубофрезерных станков могут быть использованы как при модернизации современных базовых моделей станков для расширения их универсальности, так и при проектировании новых универсальных станков с механическими и электронными связями.

## 7.4 Зубодолбежный станок с адаптивным управлением для многопроходной обработки зубчатых колес

При обсуждении особенностей процесса зубодолбления рассмотрен способ многопроходного долбления, зубчатых колес, содержащий подсистему стабилизации силового параметра (момента силы резания) на всех проходах кроме первого. Это обеспечивает выравнивание толщин срезаемой стружки по обеим боковым режущим кромкам зубьев долбяка и, как следствие, повышение периода его размерной стойкости.

Рассмотрим реализацию данного способа в кинематической структуре станка (рисунок 7.7) и системе его управления [61].

Кинематическая структура станка (см. рисунок 7.5) содержит следующие кинематические группы: скорости резания  $\Phi_v(\downarrow\Pi_1)$ ; обката (профилирования)  $\Phi_s(B_2B_3)$ ; врезания  $Vp(\Pi_4)$ ; «отскока» долбяка при холостом ходе  $Vc(\downarrow\Pi_5)$ .

Исполнительным органом группы  $\Phi_v(\downarrow\Pi_1)$  является шпиндель 1, несущий долбяк. Привод движения  $\Pi_1$  шпинделя осуществляется от электродвигателя 2, круговая частота которого преобразуется в поступательно-

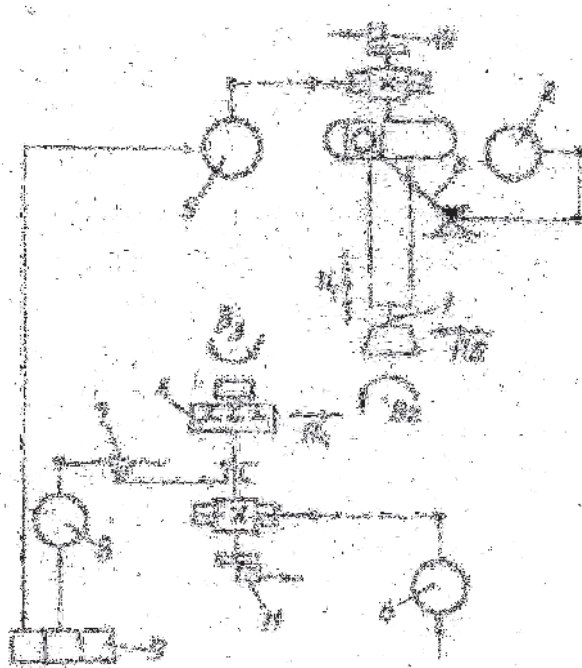


Рисунок 7.7. – Структурная схема станка

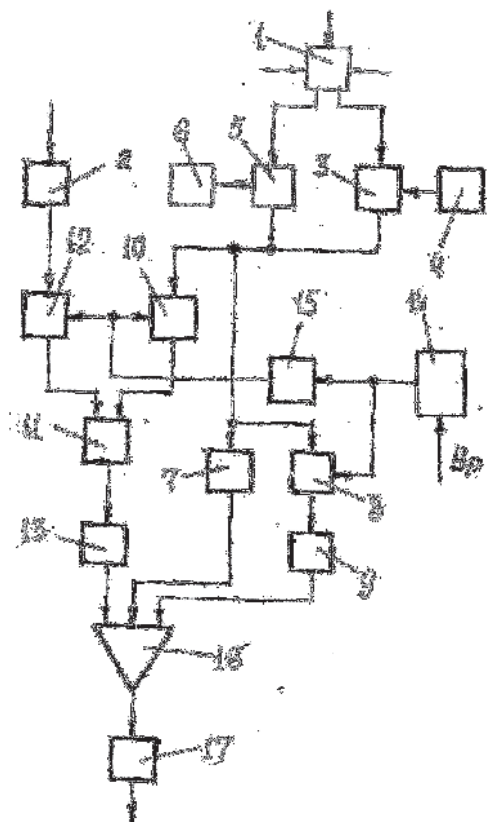
возвратное движение кулисным механизмом 3. Исполнительными органами группы обката  $\Phi_s(B_2B_3)$  являются шпиндель 1 и делительный стол 4. Функциональная связь (аналог цепи обката) между ними обеспечивается системой отслеживающей синхронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты. Задающей координатой является шпиндель. Привод его вращательного движения  $B_2$  осуществляется от электродвигателя 5. Круговая частота этого электродвигателя задает круговую подачу долбяка. Делительный стол служит ведомой координатой. Привод его вращательного движения  $B_3$  осуществляется от электродвигателя 6, являющегося конечным звеном отслеживающей синхронизации. Исполнительным органом группы врезания  $Vp(\Pi_4)$  является продольный стол 7. Привод его движения  $\Pi_4$  осуществляется от электродвигателя 8 через тяговый вал 7 (безлюфтовую передачу винт-гайка).

В качестве электродвигателей используются высокомоментные машины постоянного тока, позволяющие осуществлять бесступенчатое регулирование круговой частоты. Группа «отскока»  $Vc(\downarrow II_5)$  выполняется по традиционной для современных зубодолбежных станков схеме (не показана). В качестве источника энергии для электродвигателей используется силовая часть устройства управления 9.

Связь механических исполнительных органов – шпинделя 1 и делительного стола 4 со схемой синхронизации обеспечивается импульсными измерительными преобразователями 10 и 11, установленными соответственно на шпинделе и делительном столе.

Эти преобразователи соединены соответственно с входами ключа 1 и счетчика 2 схемы синхронизации (рисунок 7.8).

Ключ 1, например элемент 2И, имеет два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого ключа соединен с входом счетчика 3, к которому подключен блок 4 задания коэффициента деления, выполняющий функцию установки передаточного отношения станочного зацепления группы обката. Другой выход ключа 3 соединен с входом счетчика 5, к которому подключен блок 6 установки коэффициента умножения, выполняющий также функцию установки передаточного отношения. Выходы счетчиков 3 и 5 соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя 7, через ключ 8 – с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, через ключ 10 – с первым входом фазового дискриминатора 11.



**Рисунок 7.8. – Блок-схема функциональной связи группы обката**

Выход счетчика 2 соединен через ключ 12 со вторым входом фазового дискриминатора 11. Выход этого дискриминатора соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 13. Управляющий вход ключа 8 соединен с выходом формирователя 14 сигнала управления угловым смещением (дискретной круговой подачей) делительного стола на этапах врезания, а управляющие входы ключей 10 и 12 – с выходом этого формирователя через элемент НЕ 15. Выходы импульсно-аналоговых преобразователей 7, 9, 13 соединены с входами суммирующего усилителя 16. Выход

этого усилителя соединен через усилитель мощности 17 с электродвигателем ведомой координаты.

Счетчик 3 совместно с блоком 4 установки передаточного отношения выполняет функцию делителя частоты дискретного сигнала, а счетчик 5 совместно с блоком 6 установки коэффициента умножения выполняет функцию умножителя частоту дискретного сигнала. Выбор делителя или умножителя частоты зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где  $i_x$  – передаточное отношение станочного зацепления;  $c$  – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;  $z_d$  и  $z$  – числа зубьев соответственно долбяка и заготовки. В практике зубообработки  $z \geq cz_d \geq z$ . Поэтому при  $cz_d < z$  ключом 1 устанавливается связь импульсно-измерительного преобразователя 10 с делителем частоты, при  $cz_d > z$  – с умножителем частоты. При  $cz_d = z$  эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков.

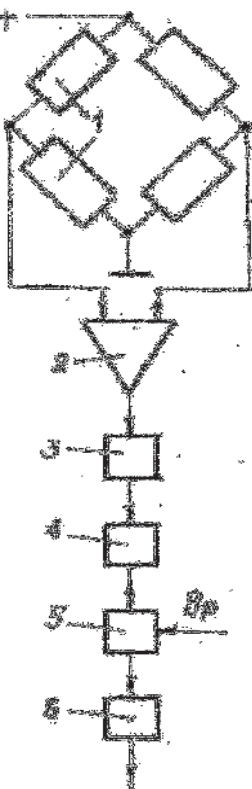


Рисунок 7.9. – Формирователь сигнала управления

Импульсно-аналоговый преобразователь 7 выполняет функцию датчика круговой подачи  $B_3$  делительного стола, а импульсно-аналоговый преобразователь 9 – функцию датчика дополнительного углового смещения на этапах врезания. На входе этого преобразователя используется дополнительный делитель частоты.

Формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола на этапах врезания содержит (рисунок 7.9) тензометрический мост 1, тензорезисторы которого закреплены или на приспособлении для базирования заготовок, или на оправке для закрепления долбяков. Выходы тензометрического моста соединены с входами дифференциального усилителя 2, соединенного своим выходом с входом цепи, содержащей последовательно соединенные интегратор 3, усилитель-ограничитель 4, аналоговый ключ 5, блок задержки 6.



При наладке станка подача врезания и количество этапов врезания устанавливаются программно посредством задания на программируемом контроллере.

Станок работает следующим образом. При включении электродвигателя 2 (см. рисунок 7.7) получает поступательно-возвратное движение  $П_1$  шпиндель 1 долбяка. Затем после ускоренного перемещения продольного стола 7 в исходную для обработки точку электродвигатель 8 переключается на подачу врезания в движении  $П_4$  на путь врезания на первом черновом проходе. Одновременно включается электродвигатель 5 задающей координаты, сообщающий шпинделю 1 вращательное движение  $B_2$  круговой подачи, и схема отслеживающей синхронизации.

Импульсный измерительный преобразователь 10 вырабатывает высокочастотный сигнал, пропорциональный круговой подаче долбяка. Этот сигнал через ключ 1 поступает (см. рисунок 7.8) или в счетчик 3 делителя частоты, или в счетчик 5 умножителя частоты, где происходит или деление сигнала в соответствии с коэффициентом деления, установленным на блоке 4, или его умножение в соответствии с коэффициентом, установленным на блоке 6. На выходе счетчика 3 или счетчика 5 образуется импульсный сигнал – аналог круговой подачи делительного стола в движении  $B_3$ . Этот сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 7 и после прохождения суммирующего усилителя 16 и усилителя мощности 17 приводит во вращение электродвигатель 6 ведомой координаты (делительный стол 4 с заготовкой обрабатываемого колеса).

В результате делительный стол будет отслеживать движение шпинделя. Причем отношение круговых частот вращения (круговых подач) шпинделя и делительного стола будет соответствовать отношению частот дискретного сигнала на входе ключа 1 и на выходе одного из счетчиков.

Одновременно с началом вращательного движения  $B_3$  импульсный измерительный преобразователь 11 вырабатывает высокочастотный сигнал – аналог действительной круговой подачи делительного стола. Этот сигнал через счетчик 2 и открытый по управляющему входу ключ 12 поступает на второй вход фазового дискриминатора 11, на первом входе которого действует задающий сигнал, поступающий через открытый по управляющему входу ключ 10 с выхода счетчика 3 или счетчика 5.

В фазовом дискриминаторе происходит сравнение задающего и действительного сигналов-аналогов круговой подачи делительного стола. В итоге на выходе фазового дискриминатора 11 образуется корректирующий сигнал, поступающий через импульсно-аналоговый преобразователь 13

в суммирующий усилитель 16, где происходит коррекция сигнала управления электродвигателем 6.

После врезания на заданную часть высоты зуба по программе движение врезания прекращается и в течение полного оборота делительного стола осуществляется первый черновой проход обработки. После его завершения при продолжающемся движении обката включается движение врезания  $П_4$  на вторую часть припуска. Одновременно включается формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола.

При рабочем ходе шпинделя в движении  $П_1$  тензометрический мост формирователя 14 регистрирует момент силы резания. Этот момент как физическое явление в зоне резания представляет собой сумму моментов резания обеими боковыми режущими кромками. Причем момент резания на входной режущей кромке имеет большее значение. Следовательно, знак суммарного момента постоянен. Сигнал-аналог момента резания после усиления в дифференциальном усилителе 2 поступает в интегратор 3, где происходит его преобразование в непрерывный сигнал. После преобразования в управляющий потенциал в усилителе-ограничителе 4 этот сигнал после подачи на управляющий вход аналогового ключа 5 потенциала, соответствующего этапу врезания, через блок задержки 6 поступает на управляющий вход ключа 8 (см. рисунок 7.8) и через элемент  $HE$  15 – на управляющие входы ключей 10 и 12. В результате цепь коррекции системы отслеживающей синхронизации на этапе врезания отключается. Одновременно через открытый по управляющему входу ключ 8 на вход суммирующего усилителя 16 поступает дополнительный сигнал от импульсно-аналогового преобразователя 9. В итоге при неизменной круговой подаче шпинделя долбяка круговая подача делительного стола увеличивается, то есть происходит его угловое смещение относительно исходного положения. Это равнозначно постепенному перераспределению толщины срезаемой стружки в сторону ее увеличения на выходных режущих кромках. При выравнивании толщин стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, момент силы резания равен нулю, и формирование сигнала управления угловым смещением стола прекращается. Формирователь 14 сигнала управления этим смещением отключается, ключ 8 закрывается, а ключи 10 и 12 открываются. Движение врезания прекращается.

Схема отслеживающей синхронизации перестраивается в исходное состояние, и в течение полного оборота делительного стола осуществляется черновой проход. После его выполнения повторяется цикл врезания для следующего прохода и т.д.

В станке в качестве основы функциональной связи между исполнительными органами группы обката (шпинделем долбяка и делительным столом) принята схема, используемая в зубообрабатывающих станках KS300E фирмы Kaskifuji. Эта схема обеспечивает одностороннюю относительно номинального значения коррекцию девиации механических передач привода делительного стола. Возможно также использование других схем, например, по схеме [62], обеспечивающей двухстороннюю коррекцию девиации.

Таким образом, в рассмотренном станке используется две схемы адаптивного управления. Одна схема обеспечивает повышение точности получаемых зубчатых колес за счет устранения девиации механики ведомой координаты группы обката. Другая – обеспечивает повышение периода размерной стойкости долбяков за счет создания одинаковых условий резания обеими боковыми режущими кромками.

### **7.5 Зубодолбежный станок со спиральным врезанием для многопроходной обработки зубчатых колес**

При обсуждении способов многопроходного зубодолбления с увеличенными круговыми подачами (см. комментарий к рисунку 6.5) показано, что уменьшить машинное время обработки при большом количестве проходов можно за счет врезания по спирали на предварительных (черновых и получистовых) проходах.

Рассмотрим реализацию цикла многопроходного зубодолбления со спиральным врезанием в кинематической структуре станка [63]. Кинематическая структура станка (рисунок 7.10) унифицирована со структурой выпускаемых зубодолбежных станков с механическими связями. Продольный стол 1, несущий делительный стол 2, оснащен гидроцилиндрами ускоренного перемещения 3 и врезания 4. Гидроцилиндр ускоренного перемещения 3 соединен с гидростанцией 5 посредством реверсивного золотника 6, управляемого электромагнитами 7 и 8, а гидроцилиндр врезания 4 – посредством регулятора 9, предназначенного для задания подачи врезания, и реверсивного золотника 10, управляемого электромагнитами 11 и 12. На делительной паре 13 делительного стола установлен счетчик 14 числа зубьев, служащий для отсчета одного оборота делительного стола.

На продольном столе установлены упоры 15 и 16, контактирующие с путевыми переключателями 17 и 18. Первый путевой переключатель соот-

ветствует исходному положению продольного стола, второй – началу движения врезания. Станочное зацепление делительный стол 2 – шпиндель 19 долбяка воспроизводится группой обката, содержащей во внутренней связи делительную пару 13, гитару сменных зубчатых колес  $i_x$  и делительную пару 20. Источником энергии в этой группе является регулируемый электродвигатель  $M_2$ . Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 19 осуществляется кулисным механизмом 21, кинематически связанным с электродвигателем  $M_1$ .

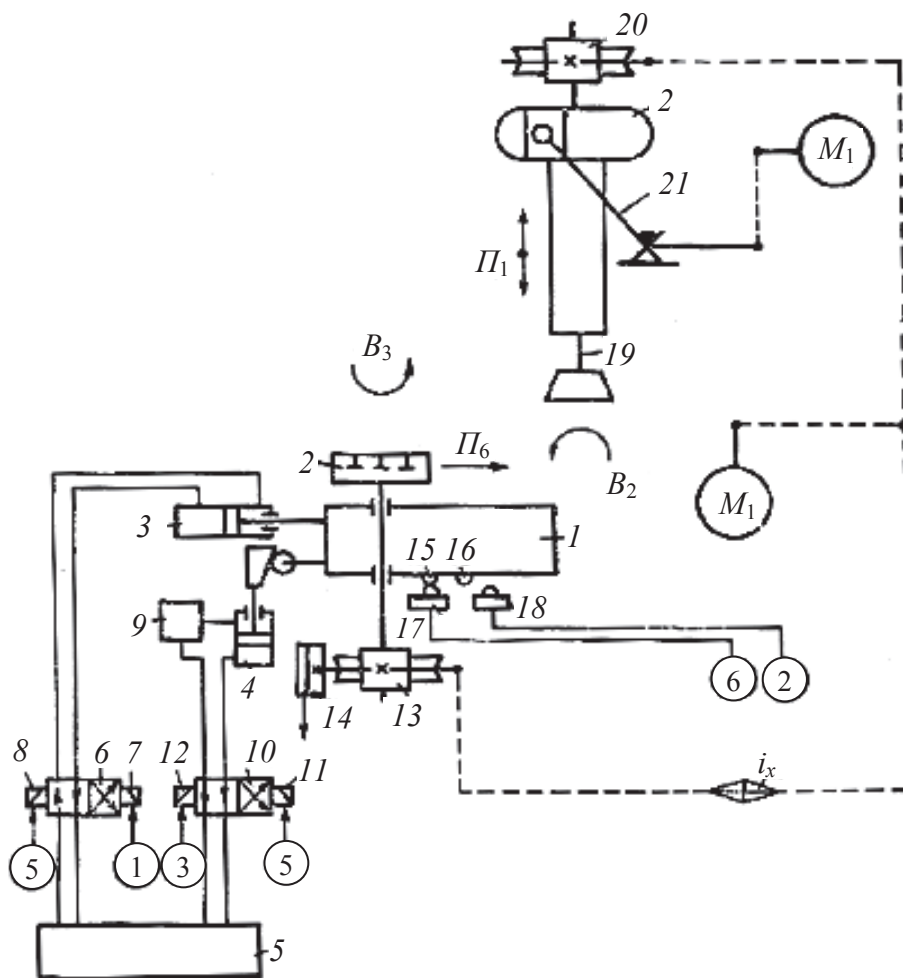
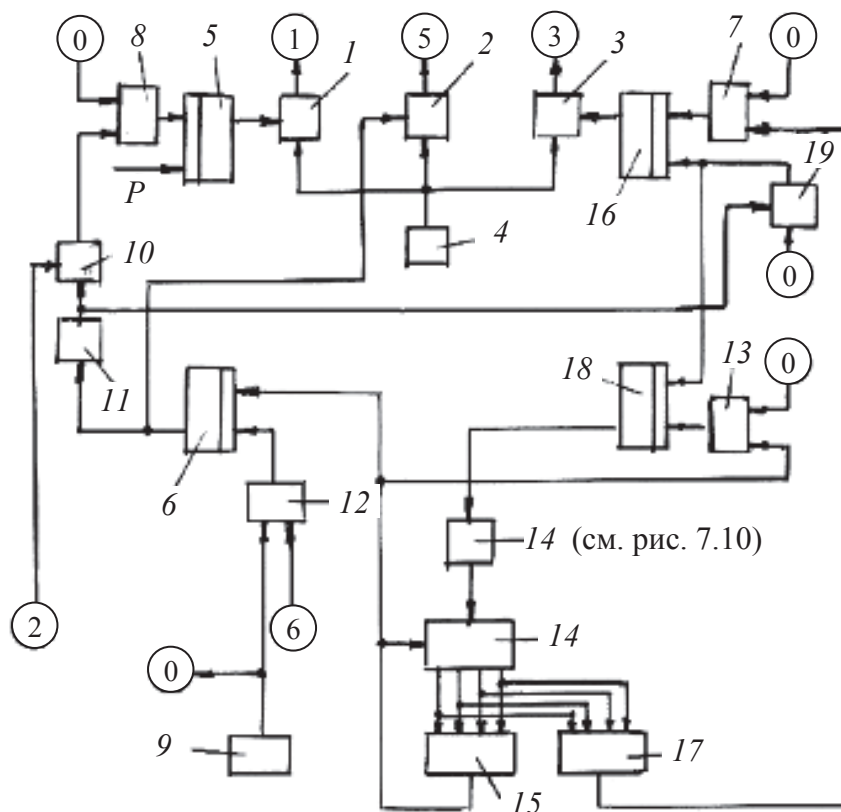


Рисунок 7.10. – Кинематическая структура станка

Электромагниты 7 и 8 реверсивного золотника 6 соединены с выходами ключей 1 и 2 (рисунок 7.11), а электромагниты 11 и 12 реверсивного золотника 10 – с выходами ключей 2 и 3.

Аналоговые входы ключей 1, 2, 3 объединены и соединены с источником питания 4, а управляющие входы – с выходами триггеров 5, 6, 16.

Первый вход триггера 5 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 8, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом элемента *И* 10, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй вход через элемент *НЕ* 11 – с выходом триггера 6.



**Рисунок 7.11. – Блок-схема системы управления циклом обработки**

Второй вход триггера 5 используется для включения рабочего цикла. Первый вход триггера 6 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 12, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с путевым переключателем 17. Второй вход триггера 6 объединен с первым входом элемента *ИЛИ* 13, с входом «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 14 и соединен с выходом блока задания общего количества проходов 15. Первый вход триггера 16 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 7, соединенного первым входом с блоком 9 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом блока задания количества черновых проходов 17. Вторые входы триггеров 16 и 18 объединены и соедине-

ны с выходом элемента И 19, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй вход – с выходом элемента НЕ 11. Первый вход триггера 18 соединен с выходом элемента ИЛИ 13, а выход этого триггера – с входом счетчика числа зубьев 14. Выход этого счетчика соединен с входом двоичного 4-разрядного счетчика, выходы которого соединены соответствующими входами блоков задания количества проходов 15 и 17. Блоки задания количества проходов 15 и 17 содержат диодно-резисторный 4-входовый конъюнктор на диодах 1, 2, 3, 4 (рисунок 7.12), выходы которых объединены и соединены через резистор 5 с источником питания. Входы конъюнктора через ключи 6, 7, 8, 9 соединены с соответствующими входами двоичного 4-разрядного счетчика 14. Управляющие входы ключей 6, 7, 8, 9 используются для набора кода количества проходов. К выходу 4-входового конъюнктора подключен вход одноустойчивого мультивибратора 10.

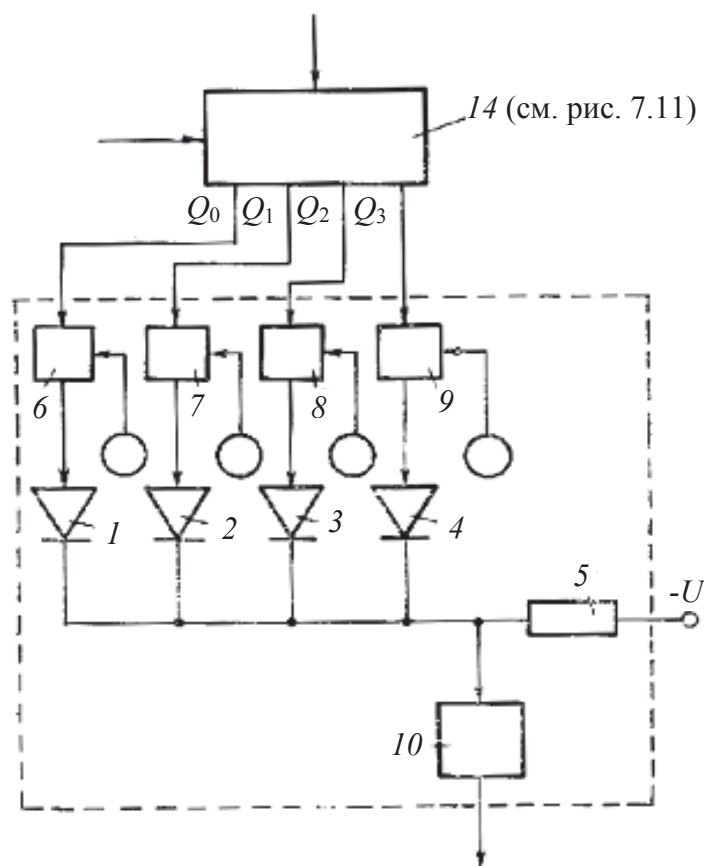


Рисунок 7.12. – Схема блока задания количества проходов

Выходы  $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$  двоичного 4-разрядного счетчика имеют веса  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ . Следовательно, на входах конъюнктора возможны состояния

счетчика от 0000 до 1111, то есть от 0 до 15. Первое состояние соответствует исходному положению схемы или отсутствию сигнала на входе счетчика, последнее – 15-му импульсу на входе. Таким образом, возможный максимальный цикл проходов равен 15. Каждый проход соответствует одному обороту делительного стола станка.

При наладке станка для получения на выходе 4-входового конъюнктора сигнала о конкретном числе проходов посредством ключей 6, 7, 8, 9 необходимо отключить от диодов 1, 2, 3, 4 те выходы двоичного 4-разрядного счетчика 14, состояние которых равно нулю в двоичной записи числа входных импульсов. В этом случае одноустойчивый мультивибратор 10 срабатывает и выдает на выходе импульс, соответствующий количеству выполненных проходов.

Цикл работы схемы осуществляется после подачи на второй вход триггера 5 управляющего сигнала  $P$ . На выходе триггера устанавливается сигнал, открывающий ключ 1, который посредством электромагнита 7 перемещает из нейтрального положения плунжер реверсивного золотника 6.

Поток масла, поступающий из гидростанции 5 через золотник 6 в полость цилиндра 3, обеспечивает ускоренное перемещение  $\Pi_4$  продольного стола 1 в точку, соответствующую началу цикла.

При набегании упора 16 на путевой переключатель 18, на выходе которого появляется сигнал, поступающий на первый вход элемента И 10, открытого по второму входу. На выходе этого элемента появляется сигнал, который, поступая на первый вход триггера 5, сбрасывает с его выхода сигнал, и ключ 1 отключает электромагнит реверсивного золотника, управляющего ускоренным перемещением  $\Pi_4$  продольного стола 1. Сигнал с путевого переключателя 18 включает также привод поступательно-возвратного движения  $\Pi_1$  шпинделя 19 долбяка и электродвигатель  $M_2$  группы обката, обеспечивающей согласованные движения  $B_2$  долбяка и  $B_3$  делительного стола с круговой подачей, соответствующей черновым проходам. Одновременно сигнал с путевого переключателя 18 через элемент И 19, открытый по второму входу, поступает на вторые входы триггеров 16 и 18. Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 16, открывает ключ 3, который посредством электромагнита 12 перемещает плунжер реверсивного золотника 10. Поток масла через золотник поступает в полость гидроцилиндра 4 врезания, сообщающего продольному столу 1 подачу врезания в движении  $\Pi_4$ . Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 18, включает счетчик 14 числа зубьев. В итоге указанного воздействия на схему сигнала с путевого переключателя 18 движениями  $\Pi_1$ ,  $\Pi_4$  и  $B_2B_3$  осуществляются черновые проходы.

После каждого чернового прохода, соответствующего одному обороту делительного стола 2, на выходе счетчика 14 (см. рисунок 7.10) числа зубьев появляется сигнал, поступающий на вход двоичного 4-разрядного счетчика 14. После выполнения заданного на блоке 17 количества черновых проходов на выходе последнего появляется сигнал, поступающий на первый вход триггера 16. Сигнал с выхода триггера сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 12 золотника 10 и движение врезания прекращается. Одновременно электродвигатель  $M_2$  переключается на другую круговую частоту, соответствующую круговой подаче чистового прохода.

После прекращения движения врезания в течение одного оборота делительного стола выполняется чистовой проход. Окончание его соответствует появлению на счетчике 14 очередного импульса, который поступает на вход двоичного 4-разрядного счетчика. В итоге на выходе блока 15 задания общего количества проходов появляется сигнал, который отключает приводы движений  $П_1$  и  $B_2B_3$  и одновременно поступает на вход «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 14, на первый вход триггера 18 и на второй вход триггера 6. На выходе триггера 18 сигнал сбрасывается, и счетчик 14 отключается. Одновременно на выходе триггера 6 устанавливается сигнал, включающий ключ 2. Электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10 срабатывают, и изменяется направление потока масла в гидроцилиндрах 3 и 4. Продольный стол 1 под воздействием гидроцилиндра 3 ускоренно перемещается в исходное положение. Одновременно ползунка гидроцилиндра 4 также перемещается в исходное положение. В исходном положении продольного стола упор 15 набегаем на путевой переключатель 17. Сигнал с его выхода поступает на первый вход триггера 6, сбрасывая сигнал с его выхода. Ключ 2 обесточивает электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10, и продольный стол 1 фиксируется в исходном положении. После смены заготовки цикл обработки повторяется.

Если необходимо разделить общее количество проходов на черновые, получистовые и чистовые, в схему системы управления циклом вводится дополнительный блок задания количества проходов, ключами которого устанавливается количество получистовых проходов. Дополнительный блок присоединяется входами к соответствующим выходам двоичного 4-разрядного счетчика параллельно входам блоков 15 и 17, задающих количество проходов. Сигнал с выхода дополнительного блока используется для переключения электродвигателя группы обката на получистовую круговую подачу и соответствующего изменения подачи радиального врезания.



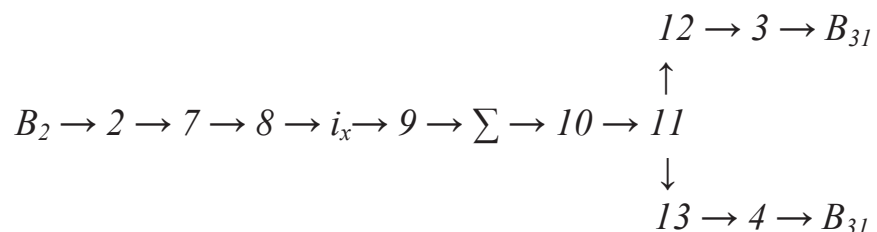
## 7.6 Двухстоловые станки-полуавтоматы для обработки зубчатых колес

Принципиальная особенность взаимной ориентации долбяка и заготовки при касательном движении врезания (см. комментарий к рисунку 6.8) позволяет создать компоновку зубодолбежного станка по типу компоновки вертикально-фрезерного станка, у которого продольный стол перемещается в плоскости, перпендикулярной оси симметрии станка. При такой компоновке на продольном столе можно разместить два делительных стола и, таким образом, создать условия для последовательной обработки заготовок. В этом случае вспомогательное время, необходимое для замены нарезанного колеса очередной заготовкой, будет перекрываться машинным временем нарезания колеса на другом столе.

Кинематико-компоновочная схема станка [58], реализующая названный способ, приведена на рисунке 7.13. Продольный стол 1 установлен с возможностью движения в плоскости врезания, перпендикулярной оси симметрии станка, проходящей через ось шпинделя 2. На продольном столе расположены делительные столы 3 и 4. Кинематическая связь продольного стола 1 с делительными столами 3 и 4 осуществляется через зубчатую рейку 5, закрепленную на продольном столе. Привод продольного стола осуществляется от симметричного гидроцилиндра двойного действия 6, установленного параллельно зубчатой рейки 5.

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания  $\Phi_{11}(\downarrow\Pi_1)$ , обката  $\Phi_5(B_2B_{31})$ , врезания  $B_p(\Pi_4B_{32})$ , «отскока»  $B_c(\downarrow\Pi_5)$ . Группы  $\Phi_{11}(\downarrow\Pi_1)$  и  $B_c(\downarrow\Pi_5)$  аналогичны таким же группам, используемым в выпускаемых станках с радиальным врезанием.

Делительные столы 3 и 4 являются исполнительными органами обеих сложных групп. Поэтому их движения  $B_3$  суммируются из движений  $B_{31}$  и  $B_{32}$ , которые им сообщаются в соответствующих группах. Группа обката  $\Phi_5(B_2B_{31})$  обеспечивает профилирование зубьев заготовок. Ее внутренняя связь представляет собой цепь обката, связывающую шпиндель 2 долбяка с обоими делительными столами 3 и 4:



## Внешняя связь

$$M \rightarrow i_s \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 8$$

сообщает энергию движения от электродвигателя  $M$  во внутреннюю связь через звено соединения связей  $8$ .

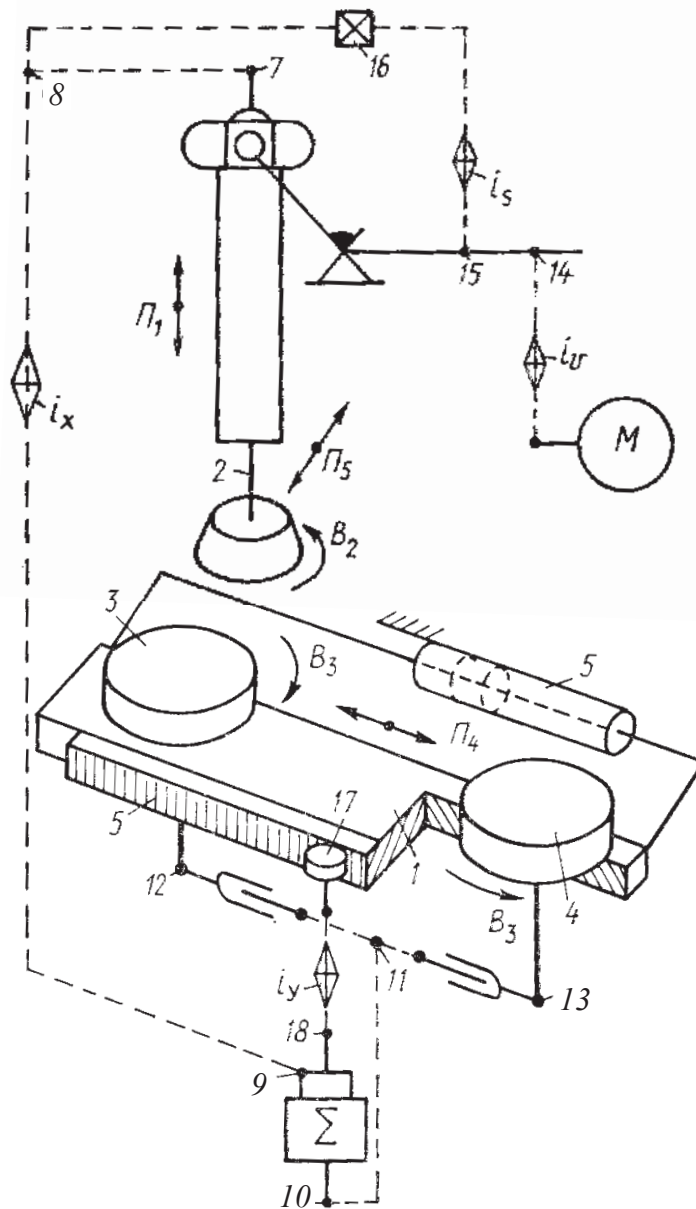
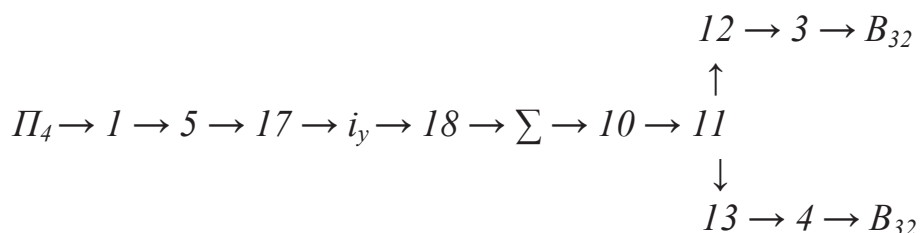


Рисунок 7.13. – Кинематико-компоновочная схема двухстолового станка для последовательной обработки зубчатых колес

Движение обката настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_x$ , на круговую подачу – гитарой сменных зубчатых колес  $i_s$ , на направление – реверсивным механизмом  $16$ , установленным во внешней связи. Наличие отдельного реверсивного механизма обязательно, так как

по условиям компоновки станка обработка заготовок на обоих делительных столах осуществляется при противоположных направления их вращательного движения.

Группа врезания  $Vp(\Pi_4 B_{32})$  воспроизводит зубчато-реечное зацепление. Ее внутренняя связь



обеспечивает согласование вращательного движения делительных столов с движением касательного врезания  $\Pi_4$  продольного стола 1. Внешняя связь сообщает энергию движения от гидроцилиндра 6 во внутреннюю связь.

Движение касательного врезания настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_y$ , на скорость – регулируемым дросселем гидропривода.

Группы врезания и обката имеют общий участок, разветвляющийся после кинематического звена 11: одна ветвь связывает это звено с делительным столом 3, а другая – с делительным столом 4.

Цикл обработки выполняется на обоих столах поочередно. При этом на каждом столе обеспечиваются одинаковые условия резания, а у долбяка попеременно от заготовки к заготовке меняются входные и выходные режущие кромки зубьев.

В соответствии с общей тенденцией в области станкостроения заменим в рассмотренном станке механические связи электронными на базе интегральных схем, а гидравлический привод продольного стола унифицируем с приводом одной из выпускаемых базовых моделей. Соответствующая структурная схема станка [63; 64] представлена на рисунке 7.14.

На продольном столе 1 в плоскости подачи врезания  $\Pi_4$  установлены делительные столы 2 и 3. Привод позиционирования продольного стола 1 осуществляется посредством симметричного гидроцилиндра двухстороннего действия 4, соединенного с гидростанцией 5 через реверсивный золотник 6, управляемый электромагнитами 7 и 8, а привод касательного врезания – гидроцилиндрами 9 и 10, расположенными с противоположных сторон продольного стола 1. Гидроцилиндры соединены с гидростанцией 5 через реверсивные золотники 11 и 12, управляемые электромагнитами со-

ответственно 13, 14 и 15, 16. В трубопроводах гидроцилиндров 9 и 10 установлены регуляторы (органы настройки) 17 и 18 подачи касательного врезания. Приводы круговых подач делительных столов 2 и 3 осуществляются от электродвигателей  $M_2$  и  $M_3$  через делительные передачи 20 и 21. Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 22, несущего долбяк, осуществляется электродвигателем  $M_1$  через кулисный механизм 23, а привод круговых подач шпинделя – через делительную передачу 24 от электродвигателя  $M_4$ .

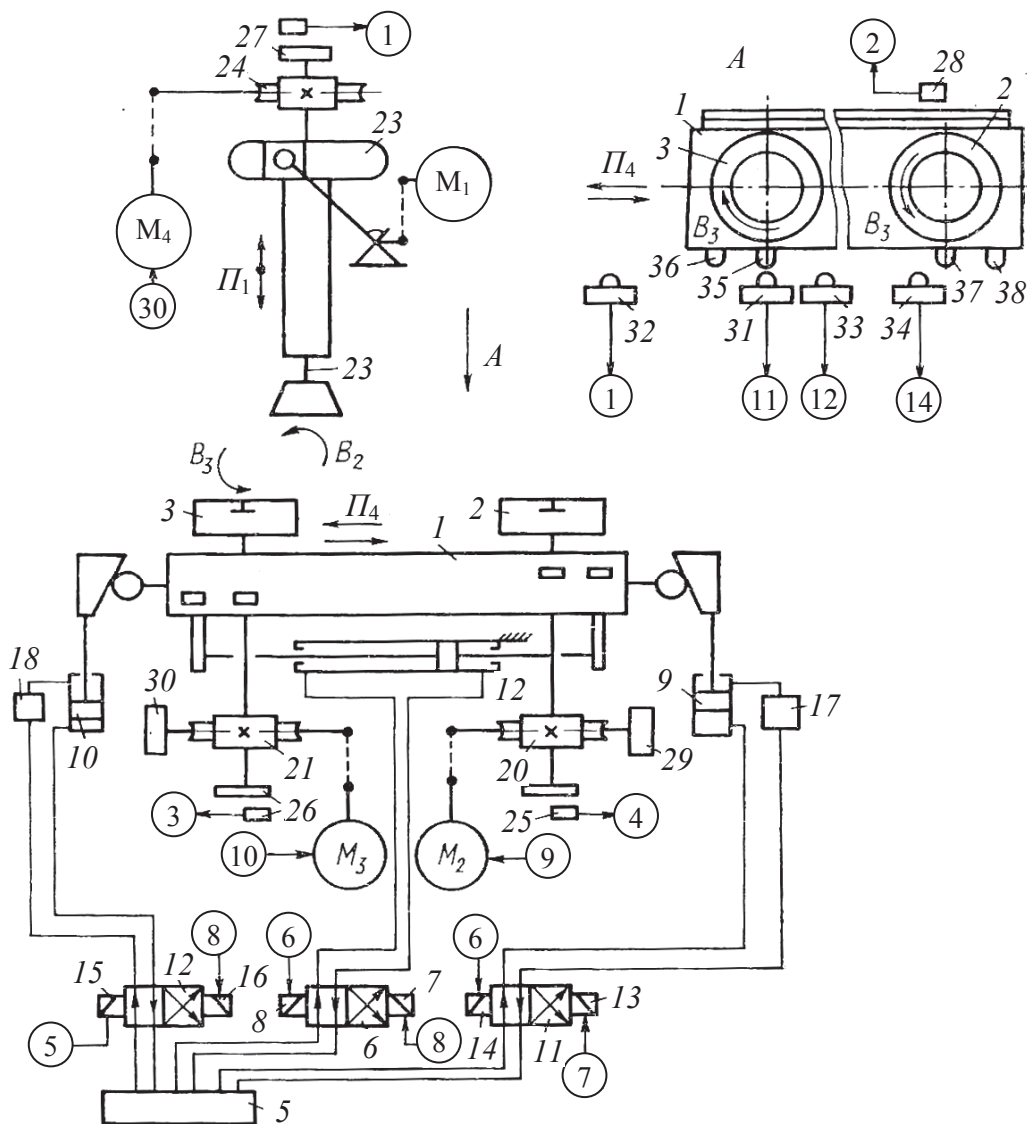


Рисунок 7.14. – Структурно-компоновочная схема станка

На делительных передачах исполнительных органов – шпинделе, продольном и круговых столах – установлены импульсные измерительные

преобразователи 25, 26, 27, 28, предназначенные для преобразования прямолинейного перемещения продольного стола и круговых частот вращения шпинделя и делительных столов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему функциональных связей приводов исполнительных органов.

Для связи со схемой цикловой автоматики станок оснащен счетчиками числа зубьев 29 и 30, расположенными на делительных передачах 20 и 21, и конечными выключателями 31–34, которым соответствуют упоры 35–38, установленные на продольном столе 1.

Система управления состоит из устройства функциональных связей исполнительных органов и устройства цикловой автоматики. Коммутация связей осуществляется через центральный командоаппарат.

Устройство функциональных связей обеспечивает согласование движений исполнительных органов в сложных кинематических группах

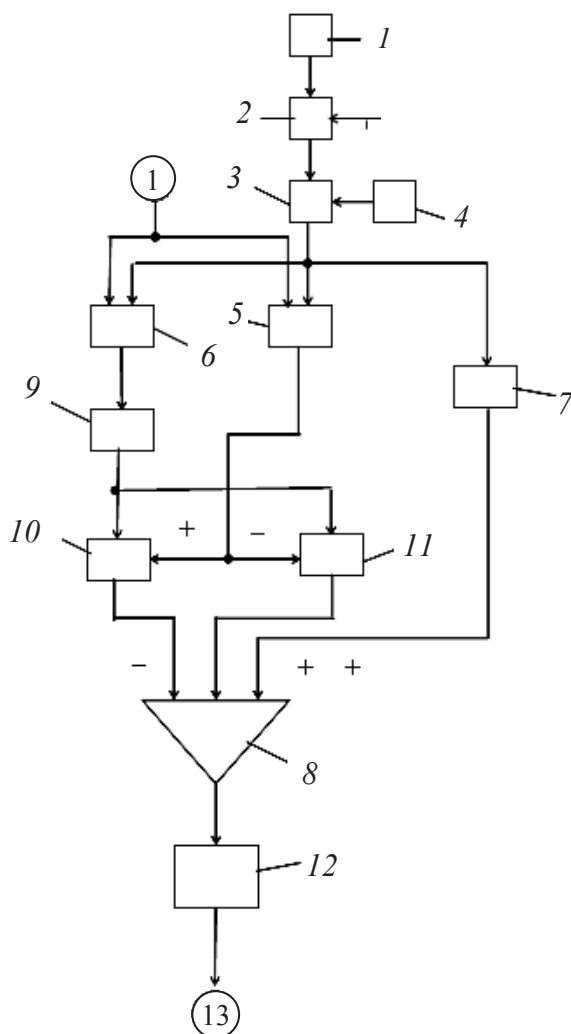


Рисунок 7.15. – Формирователь задающего сигнала шпинделя долбяка

$\Phi_s(B_2B_3)$  и  $Vp(\Pi_4 B_3^1)$ , воспроизводящих зацепление двух зубчатых колес и рейки с колесом. Ведущими координатами в указанных группах являются шпиндель и продольный стол, а ведомыми координатами – делительные столы.

Сигнал управления продольным столом воспроизводится гидросхемой, обеспечивающей движение позиционирования с постоянной скоростью и настраиваемое движение подачи касательного врезания.

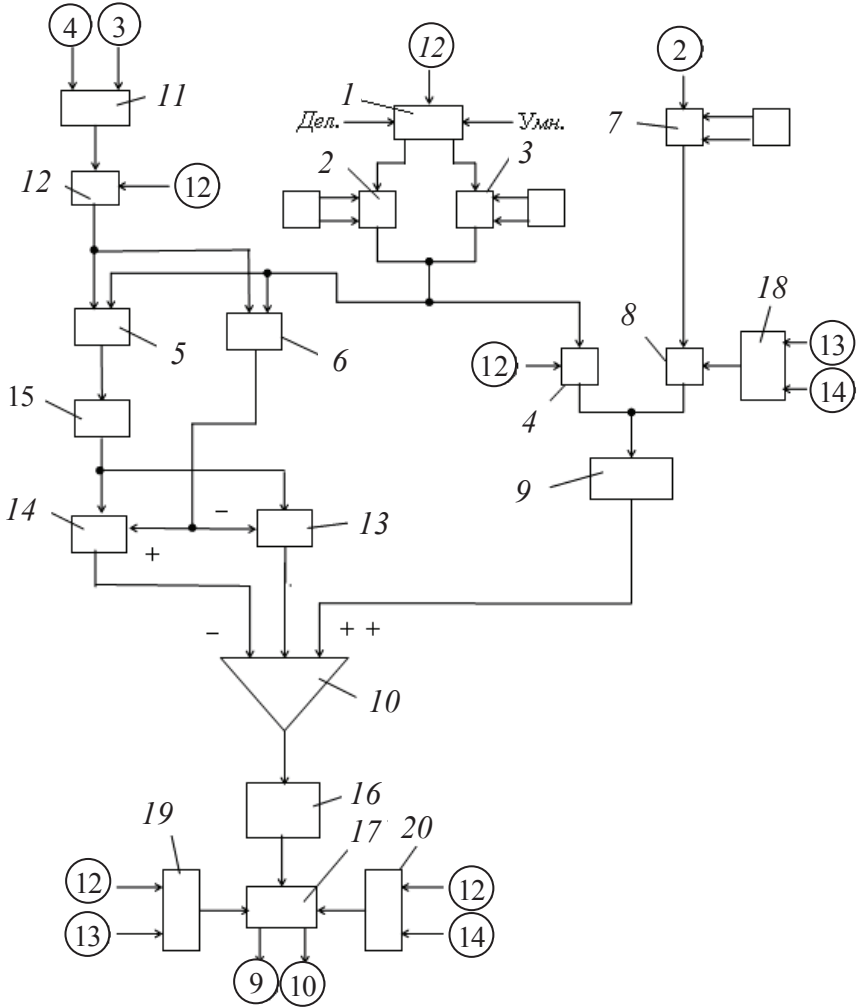
Сигнал управления шпинделем воспроизводится электронным формирователем на базе типовых интегральных элементов (рисунок 7.15), выполненным по схеме равнозначных координат [60]) с автоматической двухсторонней коррекцией погрешности его привода.

Эталонный генератор 1 соединен посредством элемента II 2, управ-

ляемого потенциальным сигналом с входом делителя частоты, состоящего из счетчика импульсов 3 и блока установки коэффициента деления 4, выполняющего функцию органа настройки круговой подачи шпинделя. Выход счетчика 3 соединен с первыми входами знакового 5 и фазового 6 дискриминаторов, а через импульсно-аналоговый преобразователь 7 – с первым положительным входом параллельного сумматора 8. Вторые входы дискриминаторов 5 и 6 соединены с импульсным измерительным преобразователем, установленным на шпинделе. Выход фазового дискриминатора 6 соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 9 с аналоговыми входами элементов И 10 и И 11, управляемых соответственно положительным и отрицательным потенциалами, а выход знакового дискриминатора 5 – с потенциальными входами этих элементов. Выходы элементов И 10 и И 11 соединены соответственно с отрицательным и положительным входами параллельного сумматора 8, выход которого через усилитель мощности 12 соединен с электродвигателем привода круговой подачи шпинделя. При подаче потенциала на управляющий вход элемента И 2 импульсный сигнал с эталонного генератора 1 поступает на вход счетчика 3 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 4 коэффициентом деления. Сигнал с выхода счетчика 3 после преобразования его в импульсно-аналоговом преобразователе 7 в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, поступает через параллельный сумматор 8 и усилитель мощности 12 на электродвигатель привода круговой подачи шпинделя. Одновременно для устранения девиации механики этого привода осуществляется коррекция управляющего сигнала. На первые входы дискриминаторов 5 и 6 непрерывно поступает задающий сигнал со счетчика 3, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на шпинделе, соответствующий мгновенному значению круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 6 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 9 поступает на аналоговые входы элементов И 10 и И 11. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 5 непрерывно образуются отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный потенциал при опережении, который поступает на потенциальные входы элементов И 10 и И 11 и открывает один из них. При открывании элемента И 11, управляе-

мого отрицательным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 8, а при открывании элемента И 10, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения, или двухстороннее адаптивное управление.

Формирователь сигнала управления ведомых координат – делительных столов (рисунок 7.16) – выполнен по схеме, отслеживающей синхронизации [63].



**Рисунок 7.16. – Формирователь сигнала управления ведомых координат**

Задатчиками для делительных столов являются импульсные измерительные преобразователи 27 и 28, установленные соответственно на делительных передачах шпинделя и продольного стола. Импульсный измерительный преобразователь 27 соединен с входом элемента 2И 1, имеющим два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого элемента соединен с входом делителя частоты 2, а другой – с входом умножителя частоты 3. Выходы делителя частоты 2 и умножителя частоты 3 объединены и соединены с входом элемента И 4, управляемого аналоговым сигналом, и с первыми входами фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов. Импульсный измерительный преобразователь 28 соединен с входом делителя частоты 7, у которого выход соединен с входом элемента И 8, управляемого аналоговым сигналом. Выходы элементов И 4 и 8 объединены и соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя 9, соединенного своим выходом с первым положительным входом параллельного сумматора 10. Импульсные измерительные преобразователи, установленные на делительных передачах ведомых координат (делительных столов), соединены через элемент ИЛИ 11 с входом элемента И 12, выход которого соединен со вторыми входами фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов. Выход знакового дискриминатора 6 соединен с потенциальными входами элементов И 13 и 14, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента И 13 соединен со вторым положительным входом параллельного сумматора 10, а выход элемента И 14 – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора 5 через импульсно-аналоговый преобразователь 15 соединен с аналоговыми входами элементов И 13, 14. Выход параллельного сумматора 10 через усилитель мощности 16 и ключ 17, имеющий два управляющих входа и два выхода, соединен с электродвигателями ведомых координат (делительных столов).

Формирователь сигнала управления ведомых координат соединен с устройством цикловой автоматики посредством элементов ИЛИ 18, 19 и 20, через которые на управляющие входы элементов И 4, 8 и ключ 17 подаются по циклу обработки управляющие потенциалы на этапах врезания и профилирования.

Делители частоты 2 и 7 аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления привода круговых подач шпинделя. Умножитель частоты 3 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения.



Выбор делителя частоты 2 или множителя частоты 3 зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где  $i_x$  – передаточное отношение станочного зацепления;  $c$  – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач;  $z_d$  и  $z$  – числа зубьев соответственно долбяка и нарезаемого колеса.

В практике зубодолбления  $z \geq cz_d \geq z$ . Поэтому при  $cz_d < z$  ключом 5 устанавливаем связь импульсного измерительного преобразователя 20 с делителем частоты 6, при  $cz_d > z$  – с множителем частоты 7. При  $cz_d = z$  эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков при условии установки коэффициента деления или умножения равным единице.

Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 2 или в множителе частоты 3 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительных столов станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты шпинделя – органа настройки на траекторию этого зацепления. Блок установки коэффициента деления делителя 7 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительных столов на этапе врезания.

Устройство цикловой автоматики (рисунок 7.17) состоит [64] из ключей 1–4, аналоговые входы которых объединены и соединены с источником питания 5. Выход ключа 1 соединен с электромагнитами 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12, выход ключа 2 – с электромагнитами 8 и 14 реверсивных золотников 6 и 11, выход ключа 3 – с электромагнитом 13 реверсивного золотника 11, выход ключа 4 – с электромагнитом 15 реверсивного золотника 12. Потенциальные (управляющие) входы ключей 1–4 соединены с выходами триггеров соответственно 6–9. Первый вход триггера 6 соединен с выходом элемента ИЛИ 10, у которого второй вход соединен с конечным выключателем 32 (см. рисунок 7.14). Вторым входом триггера 6 соединен с выходом элемента ИЛИ 11, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 31, а второй вход – с выходом элемента ИЛИ 12. Первый вход триггера 7 соединен с выходом элемента ИЛИ 13, соединенного вторым входом с конечным выключателем 34. Вторым входом триггера 7 соединен с выходом элемента ИЛИ 14, у которого первый вход соединен с конечным выключателем 33, а вторым входом – с выходом элемента ИЛИ 12. Первый вход элемента ИЛИ 12 соединен с кнопкой «Пуск» пульта управления станка (ПУ), а вторым – с выходом реле времени 15. Первый

вход триггера 8 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 16, у которого второй вход соединен с *ВК* 33. Второй вход триггера 8 соединен с выходом элемента *И* 17, соединенного первым входом с *ВК* 32, а вторым входом через элемент *НЕ* – с выходом триггера 7.

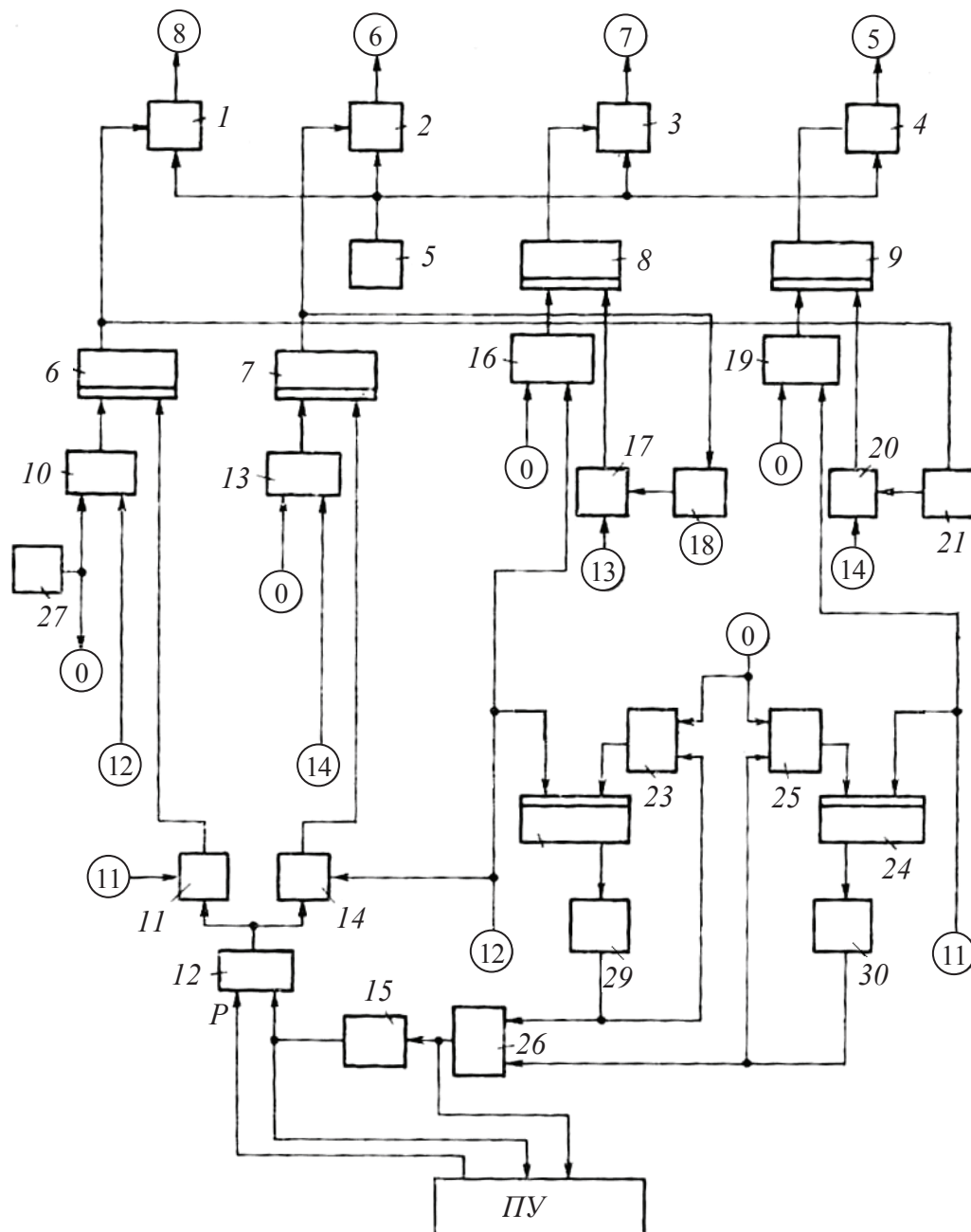


Рисунок 7.17. – Блок-схема циклового автомата

Первый вход триггера 9 соединен с выходом элемента *ИЛИ* 19, соединенного вторым входом с конечным выключателем 31. Второй вход триггера 9 соединен с выходом элемента *И* 20, у которого первый вход со-

единен с *BK 34*, а второй вход через элемент *HE 21* – с выходом триггера *б*. Первый вход триггера *22* соединен с выходом элемента *ИЛИ 23*, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев *29*. Вторым входом триггера *22* соединен с конечным выключателем *33*. Выход триггера *22* соединен со счетчиком зубьев *29*. Первый вход триггера *24* соединен с выходом элемента *ИЛИ 25*, соединенного вторым входом с выходом счетчика зубьев *30*. Вторым входом триггера *24* соединен с конечным выключателем *31*. Выход триггера *24* соединен с входом счетчика зубьев *30*. Выходы счетчиков зубьев *29* и *30* соединены также с входами элемента *ИЛИ 26*, выход которого соединен с реле времени *15* и *ПУ*. Первые входы элементов *ИЛИ 10, 13, 16, 19, 23, 25* соединены с блоком *27* начальной установки триггеров. Схема управления (см. рисунок 7.17) работает следующим образом.

После включения схемы триггеры *б–9, 22, 24* устанавливаются в исходное состояние сигналом с блока *27* начальной установки через соответствующие элементы *ИЛИ*. При нажатии кнопки «Пуск» на первый вход элемента *ИЛИ 22* поступает управляющий сигнал «*P*», который после прохождения через открытый по первому входу сигнал от конечного выключателя *31* элемент *И 11* поступает на второй вход триггера *б*. На его выходе устанавливается сигнал, открывающий ключ *1*, который соединяет с блоком питания *5* электромагниты *7* и *16* реверсивных золотников *б* и *12*. Электромагниты перемещают плунжеры золотников, и поток масла из гидростанции *5* поступает в гидроцилиндры *4* и *10*. Гидроцилиндр *4* сообщает движение *П<sub>4</sub>* (на рисунке 7.14 – влево) позиционирования продольному столу *1*, а гидроцилиндр *10* выводит свою ползушку в исходное положение. При набегании упора *3б* на конечный выключатель *32* на последнем появляется сигнал, который поступает через элемент *ИЛИ 10* на первый вход триггера *б* и на первый вход элемента *И 17*. Сигнал на выходе триггера *б* сбрасывается и ключ *1* отключает электромагниты *7* и *16*. Одновременно сигнал, поступивший на первый вход элемента *И 17*, открытого по второму входу сигналом с выхода элемента *HE 18*, поступает на второй вход триггера *8*, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ *3*. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагнит *13* реверсивного золотника *11*, который обеспечивает поток масла из гидростанции *5* в рабочую полость гидроцилиндра *9* подачи врезания. В итоге продольный стол *1* в движении *П<sub>4</sub>* переключается с позиционирования на врезание. Одновременно сигнал с конечного выключателя *32* через *ПУ* включает электродвигатель *M<sub>1</sub>* привода поступательно-возвратного движения *П<sub>1</sub>* шпинде-

ля долбяка и открывает через элемент *ИЛИ* 18 элемент *И* 8, а через элемент *ИЛИ* 19 – ключ 17 (см. рисунок 7.16). В результате задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 28 поступает на вход делителя частоты 7, где происходит его деление в соответствии с заданным значением. С выхода этого делителя сигнал через открытый по управляющему входу элемент *И* 8 поступает в импульсно-аналоговый преобразователь 9, где происходит его преобразование в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода этого преобразователя аналоговый сигнал через первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по одному из управляющих входов ключ 17 сообщается электродвигателю  $M_2$  привода делительного стола 2. В итоге на этапе врезания этот стол получает вращательное движение  $B_3$ , согласованное с движением  $П_4$  продольного стола 1.

Этап врезания продолжается до набегания упора 37 на конечный выключатель 33. Сигнал, появившийся на этом выключателе, поступает на первый вход элемента *И* 14 и через элемент *ИЛИ* 16 на первый вход триггера 8. На выходе этого триггера сигнал сбрасывается, ключ 3 отключает электромагнит 13 реверсивного золотника 11 и продольный стол останавливается. Одновременно снимается сигнал с управляющего входа элемента *И* 8 ведомой координаты. Сигнал с конечного выключателя 33 открывает элемент *И* 2 ведущей координаты (см. рисунок 7.15), элементы *И* 4 и через элемент *ИЛИ* 19 ключ 17 ведомой координаты. Одновременно этот сигнал поступает на второй вход триггера 22, устанавливая на его выходе сигнал, который включает счетчик зубьев 39. В результате перекоммутации схемы начинается этап профилирования колеса. Задающий сигнал с импульсного измерительного преобразователя 27, установленного на шпинделе, поступает через элемент 2 *И* на делитель или умножитель частоты формирователя сигнала управления ведомой координаты, где происходит его деление или умножение в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления шпиндель – заготовка. Результирующий сигнал через открытый по управляющему входу элемент *И* 4 поступает на вход импульсно-аналогового преобразователя 9. Аналоговый сигнал, пропорциональный частоте входного сигнала, с выхода этого преобразователя через первый вход-выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 и открытый по управляющему входу ключ 17 поступает на вход электродвигателя  $M_2$  делительного стола 2. Одновременно следующим образом происходит устранение девиации механики привода делительного стола по-

средством двухсторонней коррекции сигнала на выходе параллельного сумматора 10. На первые входы фазового 5 и знакового 6 дискриминаторов непрерывно поступает задающий сигнал с выхода делителя или умножителя частоты, а на вторые входы этих дискриминаторов через элементы ИЛИ 11 и И 12 поступает сигнал-аналог мгновенного значения действительной круговой подачи делительного стола. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора 5 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе 15 поступает на аналоговые входы элементов И 13 и 14. Одновременно на выходе знакового дискриминатора 6 непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании делительного стола от заданного значения и положительный потенциал при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы элементов И 13 и 14 и открывает один из них. При открывании элемента И 13 сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 10, а при открывании элемента И 14 сигнал с его выхода поступает на вход вычитания этого сумматора. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая адаптация относительно заданного номинального значения.

Этап профилирования продолжается в течение одного оборота делительного стола 2 после прекращения врезания. За время выполнения этапа устанавливается очередная заготовка на делительном столе 3. По выполнении делительным столом одного оборота, что соответствует окончанию профилирования, на выходе счетчика зубьев 29 появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 26 поступает в ПУ, обеспечивающий прекращение движения  $P_1$  шпинделя и вывод его в крайнее верхнее положение, включает реле времени 15 и через элемент ИЛИ 23 поступает на первый вход триггера 22. На его выходе сигнал сбрасывается, и счетчик зубьев 29 отключается.

Реле времени 15 задерживает начало повторения цикла обработки на другом делительном столе из исходного положения, соответствующего наличию сигнала на конечном выключателе 33, на время, необходимое для вывода шпинделя в верхнее положение.

По окончании паузы на выходе реле времени появляется сигнал, который поступает через элементы ИЛИ 12 и И 14 на второй вход триггера 7,

устанавливая на его выходе сигнал, открывающий ключ 2. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагниты 8 и 14 реверсивных золотников. Плунжеры этих золотников перемещаются, и поток масла поступает в гидроцилиндры 4 и 9. Гидроцилиндр 4 сообщает движение позиционирования  $P_4$  (на рисунке 7.14 – вправо) продольному столу 1, а гидроцилиндр 9 выводит ползушку в исходное для врезания положение. При набегании упора 38 на конечный выключатель 34 на нем появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 13 поступает на первый вход триггера 7 и на первый вход элемента И 20, открытого по второму входу сигналом с элемента НЕ 21. На выходе триггера 7 сигнал сбрасывается, ключ 2 отключает электромагниты 8 и 14, и поток масла в гидроцилиндры 4 и 9 перекрывается. С выхода элемента И 20 сигнал поступает на второй вход триггера 9, устанавливая на его выходе сигнал, включающий посредством ключа 4 реверсивный золотник 12, открывающий поток масла в гидроцилиндр 10 подачи врезания. В итоге продольный стол 1 переключается с позиционирования на подачу врезания. Одновременно сигнал с конечного выключателя 34 перестраивает структуру схемы управления, по командам которой через ПУ включаются привод движения  $P_1$  шпинделя, электродвигатель  $M_3$  движения  $B_3$  делительного стола 3 и реверсируется электродвигатель  $M_4$  круговой подачи шпинделя долбяка.

Последующая работа станка на этапах врезания и профилирования заготовки на делительном столе 3 осуществляется так же, как при обработке заготовки на делительном столе 2. Однако продолжительность этапа врезания будет ограничиваться набеганием упора 35 на конечный выключатель 31, а один оборот делительного стола 3 будет отсчитываться счетчиком зубьев 30, включаемым сигналом с конечного выключателя 31 через триггер 24. После обработки заготовки на делительном столе 3 сигнал с выхода реле времени 15 перестраивает схему управления для обработки очередной заготовки на столе 2 и т.д.

Таким образом, последовательная обработка двух заготовок обеспечивает сокращение времени обработки за счет совмещения установки на рабочей позиции каждой последующей заготовки с обработкой предшествующей. По условиям взаимодействия долбяка и заготовок автоматически изменяется направление круговой подачи при обработке каждой последующей заготовки, что обеспечивает повышение периода размерной стойкости инструмента посредством обеспечения равномерного износа его входной и выходной режущих кромок.

На рисунке 7.18 приведена структурная схема двухстолового зубодолбежного станка [14], реализующего способ одновременной обработки двух зубчатых колес одним долбяком по рисунку 7.6.

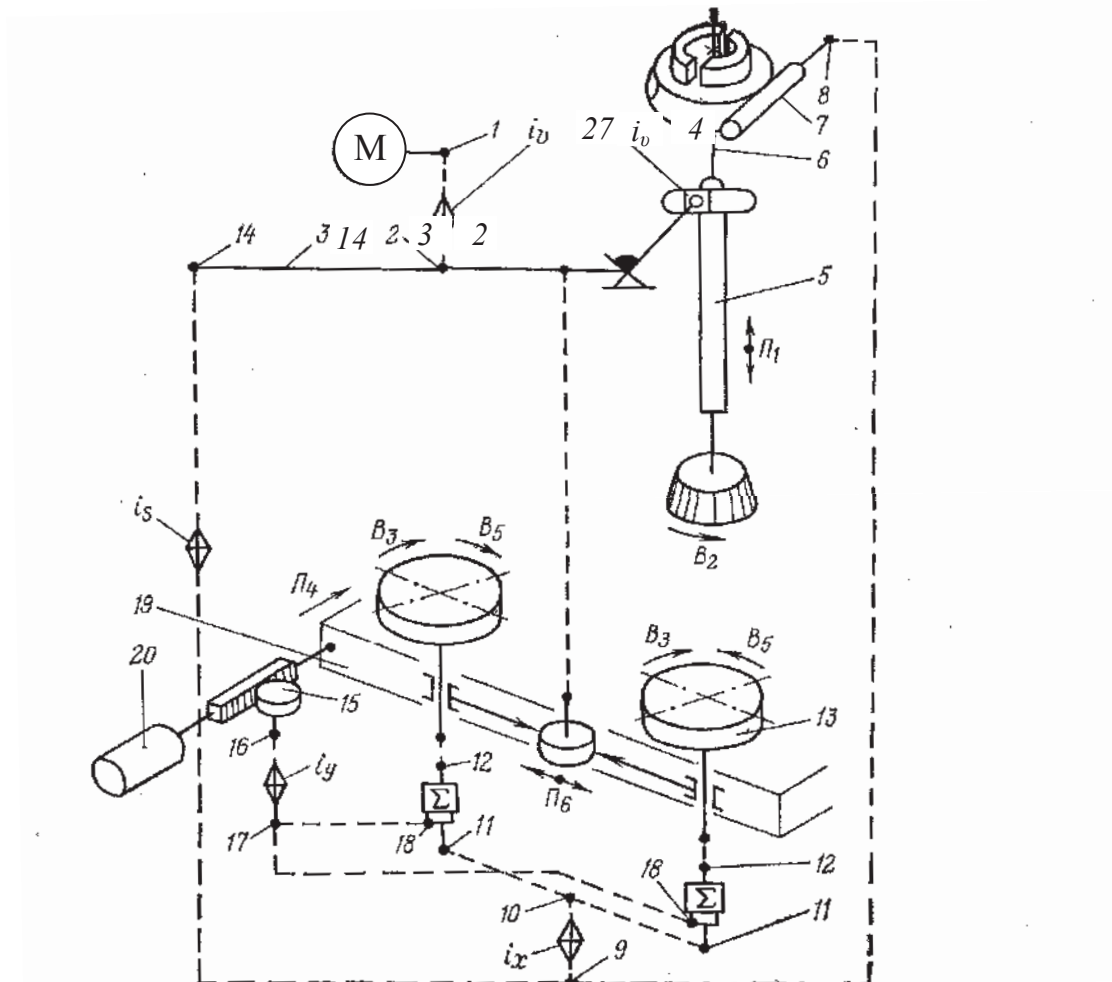


Рисунок 7.18. – Структурная схема станка для одновременной обработки двух зубчатых колес одним долбяком

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания  $\Phi_{\Gamma}(\downarrow\Pi_1)$ , обката  $\Phi_S(B_2B_3)$ , врезания  $Vp(\Pi_4B_5)$ , «отскока»  $Vc(\downarrow\Pi_6)$ . Группа  $\Phi_{\Gamma}(\downarrow\Pi_1)$  традиционна для зубодолбежных станков. Ее внутренняя связь – элементарная поступательная пара, образованная гильзой 5 шпинделя 6 долбяка и корпусом станка. Внешняя связь представляет собой кинематическую цепь, передающую энергию движения от электродвигателя через орган настройки на скорость резания  $i_v$  и кулисный механизм 4 к гильзе 5, несущей шпиндель долбяка:

$$M \rightarrow 1 \rightarrow i_v \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow \Pi_1.$$

Группа обката  $\Phi_5(B_2B_3)$  обеспечивает одновременное профилирование зубьев обеих заготовок. Ее внутренняя связь представляет собой цепь обката, связывающую шпиндель 6 долбяка с обоими делительными столами 13. Причем после кинематической передачи 10 внутренняя связь (цепь обката) разветвляется на две конструктивно одинаковые ветви:

$$\begin{array}{c}
 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3, \\
 \uparrow \\
 B_2 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow 10 \\
 \downarrow \\
 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3,
 \end{array}$$

Внешняя связь группы представляет собой кинематическую цепь

$$M \rightarrow 1 \rightarrow i_v \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 9,$$

передающую энергию движения от электродвигателя во внутреннюю связь через звено соединения связей 9.

Группа врезания  $Vp(\Pi_4B_5)$ , как и в предыдущем примере, воспроизводит зубчато-реечное зацепление. Ее внутренняя связь

$$\begin{array}{c}
 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5 \\
 \uparrow \\
 \Pi_4 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow i_y \rightarrow 17 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \\
 \downarrow \\
 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_5
 \end{array}$$

обеспечивает согласование вращательного движения  $B_5$  делительных столов 13 с движением касательного врезания  $\Pi_4$  продольного стола 19.

Внешняя связь сообщает энергию движения от гидроцилиндра 20 во внутреннюю связь через зубчато-реечную передачу 15, являющуюся звеном соединения связей.

Движение касательного врезания настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес  $i_y$ , на скорость – регулируемым дросселем, расположенным на гидропанели гидропривода врезания.

Вывод формулы настройки гитары сменных зубчатых колес  $i_y$  осуществляется на основе следующих РП:

$$\begin{array}{l}
 S \text{ мм перемещения продольного стола } 19 \text{ в движении } \Pi_4 \rightarrow \\
 \rightarrow S/\pi m z \text{ поворота делительных столов } 13 \text{ в движении } B_5.
 \end{array}$$



Делительные столы  $13$  на этапе врезания одновременно участвуют в двух движениях. Поэтому внутренние связи групп обката и касательного врезания после их разветвления соединены между собой планетарными суммирующими механизмами.

Группа «отскока»  $Vc(\downarrow\Pi_6)$  традиционна для зубодолбежных станков. Однако это движение в рассматриваемом станке сообщается делительным столам, а его направление перпендикулярно направлению врезания.

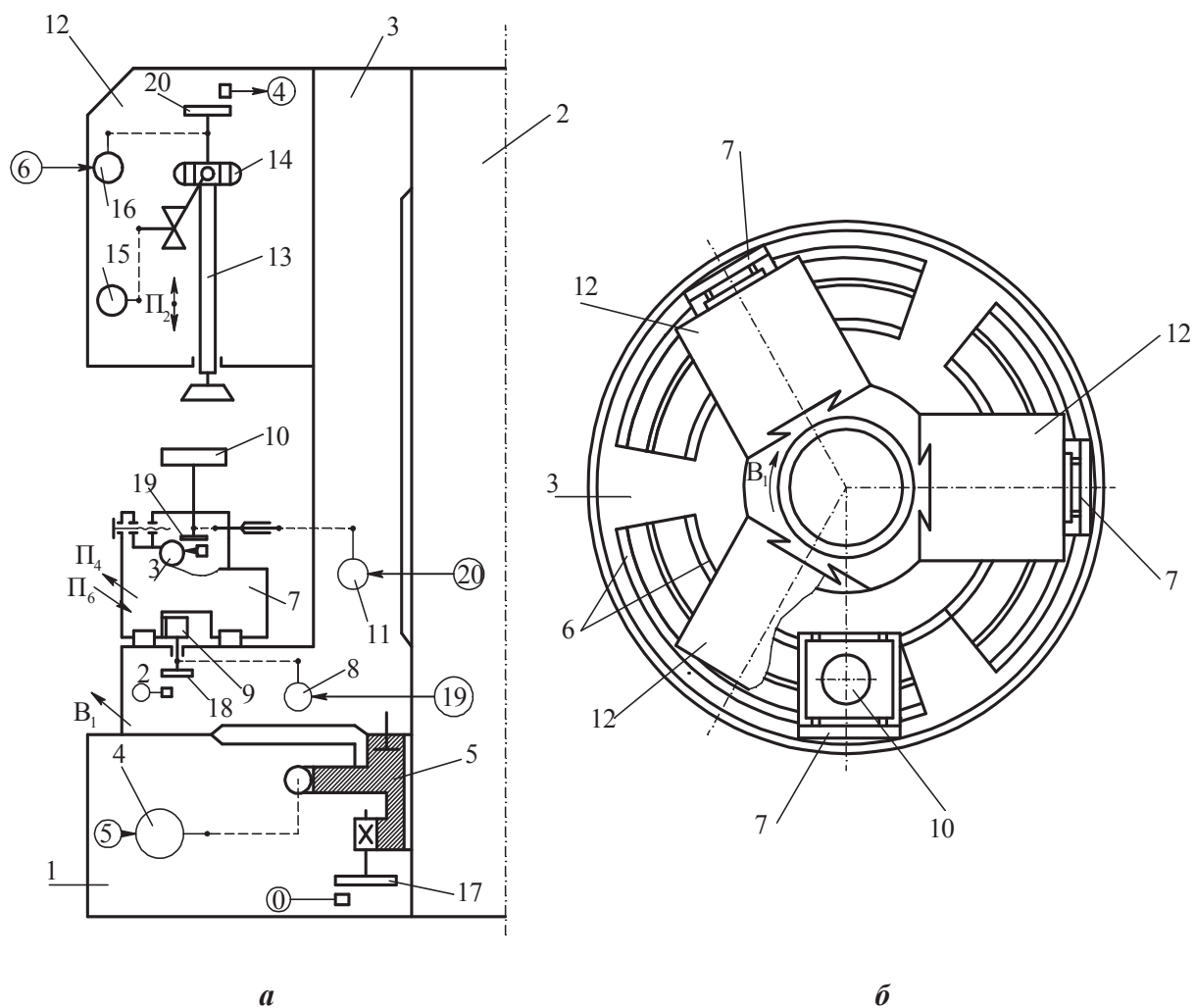
## 7.7 Роторный зубодолбежный станок

По существу роторный станок можно рассматривать как совокупность нескольких одинаковых зубодолбежных станков с касательным врезанием по дуге, объединенных общим ротором. В станках такого типа не рационально использовать развитые кинематические цепи между исполнительными органами, так как это ведет к существенному усложнению его механики, увеличению металлоемкости и трудоемкости изготовления, снижению ремонтпригодности. Поэтому в соответствии с современной тенденцией в области станкостроения в станках роторного типа представляется целесообразной замена кинематических связей между исполнительными органами электронными связями между электродвигателями их приводов и использование программируемых контроллеров для управления.

На рисунке 7.19 представлена кинематико-компоновочная схема одного из  $n$ -го количества одинаковых зубодолбежных станков с касательным врезанием, составляющих роторный зубодолбежный станок, у которого каждый исполнительный орган оснащен отдельным электродвигателем [65; 66].

На станине  $1$  установлен с возможностью вращения относительно колонны  $2$  ротор  $3$ . Привод вращения ротора осуществляется электродвигателем  $4$  через червячную передачу  $5$ . В приводе ротора можно использовать как нерегулируемый (например, асинхронный), так и регулируемый электродвигатели. На основании ротора  $3$  равномерно по окружности с возможностью движения по направляющим  $6$  размещены круговые столы  $7$ . Привод каждого кругового стола  $7$  осуществляется от отдельного регулируемого, высокомоментного электродвигателя  $8$  через зубчато-реечную передачу  $9$ . На каждом круговом столе  $7$  смонтирован делительный стол  $10$ , получающий круговую подачу от кинематически связанного с ним регулируемого высокомоментного электродвигателя  $11$ . В верхней части ротора  $3$

установлены инструментальные суппорты 12 в количестве, равном количеству делительных столов. В каждом суппорте 12 смонтирован шпindelь 13, несущий стандартный долбяк. Привод поступательно-возвратного движения шпинделя осуществляется кулисным механизмом 14, кинематически связанным с электродвигателем 1. Приводы круговых подач шпинделей осуществляются от регулируемых высокомоментных электродвигателей 16. На делительных передачах исполнительных органов – роторе, круговых и делительных столах и шпинделях установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно 17, 18, 19, 20, предназначенные для преобразования круговых частот вращения исполнительных органов в последовательности импульсов, сообщаемых в электронную систему отслеживающей синхронизации их приводов.



*a* – кинематическая структура; *б* – вид в плане при  $n = 3$

Рисунок 7.19. – Роторный зубодолбежный станок

Система отслеживающей синхронизации выполнена по схеме ведущая – ведомая координаты. Ведущими координатами являются шпиндели 13 и круговые столы 7.

На рисунке 7.20 представлен один канал блок-схемы формирования сигналов управления круговыми подачами ротора и ведущих координат (круговых столов и шпинделей). Причем формирование сигнала управления круговой подачи шпинделя осуществляется по схеме с автоматической двухсторонней коррекцией погрешностей его привода по сигналу эталонного генератора [62].

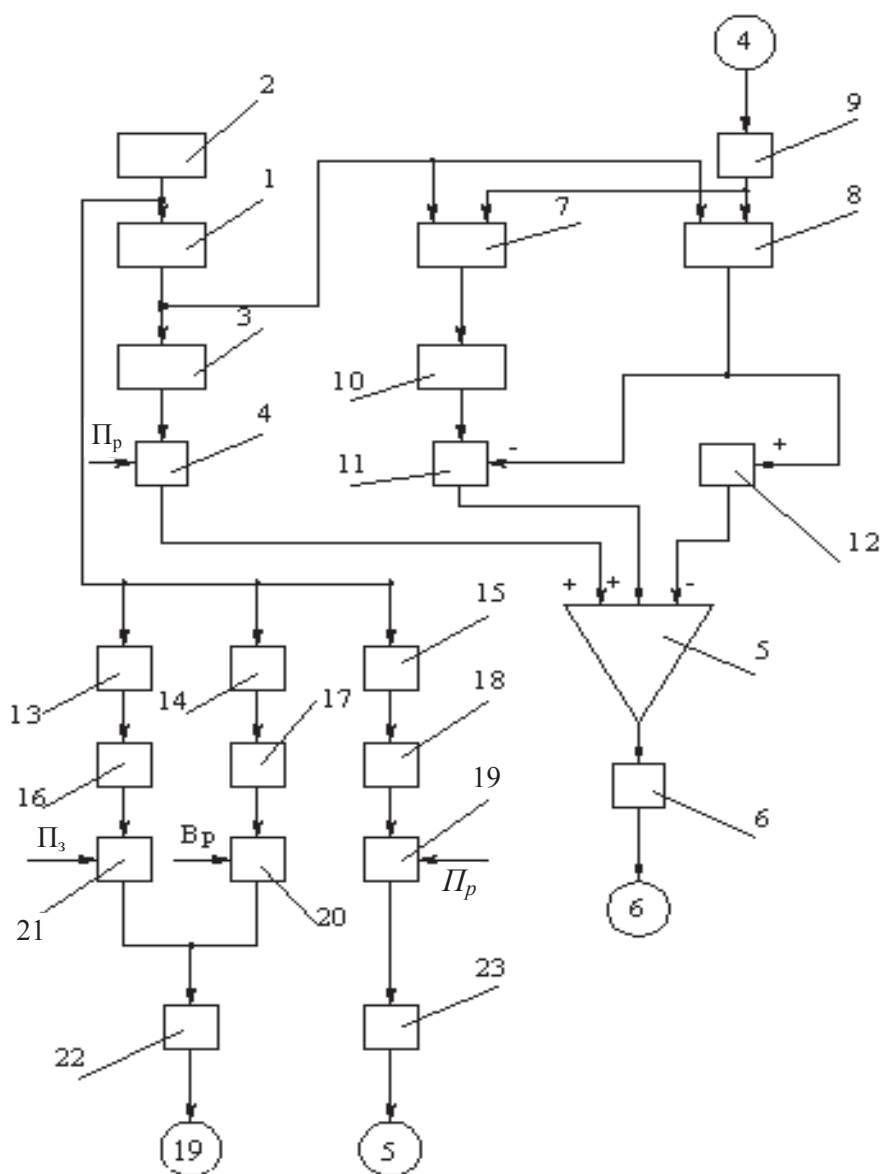


Рисунок 7.20. – Блок-схема формирователя сигналов управления ротора, круговых столов и шпинделей

Задатчиком для электродвигателя привода круговой подачи шпинделя является делитель частоты *1*, соединенный своим входом с эталонным генератором *2*, а выходом через импульсно-аналоговый преобразователь *3*, элемент *И* *4*, первый положительный вход-выход параллельного сумматора *5*, усилитель мощности *6* – с электродвигателем *16* привода вращения шпинделя *13* (см. рисунок 7.19) и с первыми входами фазового *7* и знакового *8* дискриминаторов. Вторые входы дискриминаторов соединены с выходом счетчика импульсов *9*, вход которого соединен с импульсным измерительным преобразователем *20*, установленным на шпинделе.

Выход фазового дискриминатора *7* через импульсно-аналоговый преобразователь *10* соединен с аналоговыми входами ключей *11* и *12*, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход знакового дискриминатора *8* соединен с потенциальными входами ключей *11* и *12*, а выходы этих ключей соединены соответственно со вторым положительным и отрицательным входами параллельного сумматора *5*.

Делитель частоты *1* состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента деления. Импульсный сигнал с выхода этого делителя преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе *3* в постоянное напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Это напряжение после усиления по мощности в усилителе мощности *6* запускает электродвигатель привода круговой подачи (вращения шпинделя). Одновременно следующим образом устраняется девиация механики этого привода. На первые входы дискриминаторов *7* и *8* непрерывно поступает задающий сигнал с делителя частоты *3*, а на вторые входы этих дискриминаторов – импульсный сигнал с импульсного измерительного преобразователя *20*, соответствующий мгновенному значению действительной круговой подачи. В дискриминаторах непрерывно происходит сравнение обоих сигналов. В результате на выходе фазового дискриминатора *7* образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в импульсно-аналоговом преобразователе *10* поступает на аналоговые входы ключей *11* и *12*.

Одновременно на выходе знакового дискриминатора *8* непрерывно образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя от заданного значения и положительный при опережении. Этот потенциал поступает на потенциальные входы ключей *11* и *12* и открывает один из них. При открывании ключа *11*, управляемого отрицательным потенциалом,

сигнал с его выхода поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 5, а при открывании ключа 12, управляемого положительным потенциалом, сигнал с его выхода поступает на вход вычитания параллельного сумматора 5. В итоге в зависимости от знака погрешности в параллельном сумматоре 5 происходит увеличение или уменьшение задающего сигнала, действующего на его первом входе, то есть происходит его двухсторонняя автоматическая коррекция относительно номинального значения.

Формирование сигналов управления приводами круговых подач остальных  $n - 1$  шпинделей происходит аналогично. При этом общим задатчиком для схем формирования служит делитель частоты 1.

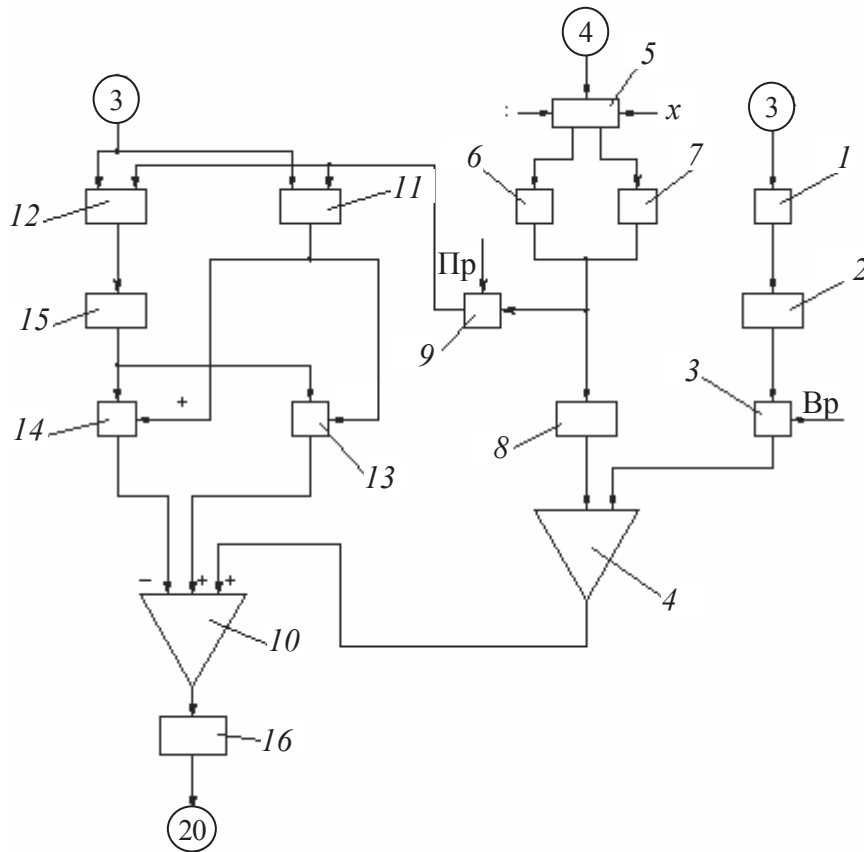
Задатчиками для приводов подач позиционирования и врезания круговых столов, а также для привода подачи ротора являются делители частоты соответственно 13, 14, 15, имеющие такую же структуру, что и делитель частоты 1. Входы этих делителей частоты объединены и соединены с выходом эталонного генератора 2, а их выходы соединены с импульсно-аналоговыми преобразователями 16, 17, 18 соответственно. Выходы этих преобразователей соединены с входами аналоговых элементов И 19, 20, 21 соответственно. Выходы элементов И 20, 21 объединены и соединены с усилителем мощности 22, у которого выход соединен с электродвигателями круговых столов. Выход элемента И 19 связан с усилителем мощности 23, соединенного своим выходом с электродвигателем ротора. Таким образом, на входах элементов И 19, 20, 21 при включенном эталонном генераторе 2 постоянно действуют сигналы управления приводами соответствующих круговых столов и ротора.

Девияция приводов механики ротора и круговых столов при необходимости ее устранения осуществляется на основе сравнения задающих сигналов, постоянно функционирующих на выходах импульсно-аналоговых преобразователей 16, 17, 18 с сигналами-аналогами действительных подач, действующими на соответствующих импульсных измерительных преобразователях 17 и 18 (см. рисунок 7.19).

Схема сравнения и двухсторонней коррекции управляющих сигналов аналогична рассмотренной при описании решения такой же задачи при коррекции сигнала управления приводом круговой подачи шпинделя.

С точки зрения кинематической структуры блоки установки коэффициента деления в делителях частоты выполняют функцию органов настройки соответствующих подач.

Система формирования сигнала управления делительного стола на этапе врезания и на этапе профилирования нарезаемого колеса выполнена по схеме (рисунок 7.21), где делительный стол является ведомой координатой.



**Рисунок 7.21. – Блок-схема формирователя сигнала управления ведомой координаты (делительного стола)**

На этапе врезания шпиндель и круговой стол одновременно являются задающими координатами, а при профилировании задающей координатой служит шпиндель. При этом на этапе профилирования осуществляется двухсторонняя коррекция сигнала управления привода делительного стола (на схеме представлен один канал) по сигналу задающей координаты.

Задатчиками для электродвигателя привода ведомой координаты (делительного стола) на этапе врезания являются импульсные измерительные преобразователи 18 и 20, установленные на делительных передачах соответственно кругового стола 7 и шпинделя 13 (см. рисунок 7.19). Импульсный измерительный преобразователь 18 через соединенные последовательно делитель частоты 1, импульсно-аналоговый преобразователь 2 и элемент И 3, управляемый аналоговым сигналом, соединен с первым вхо-

дом сумматора 4. А импульсный измерительный преобразователь 20 соединен с входом ключа 5 (например, элемент И 2), имеющего два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один выход этого ключа соединен с входом делителя частоты 6, а другой выход – с входом умножителя частоты 7. Выходы делителя частоты 6 и умножителя частоты 7 объединены и соединены с входом элемента И 9, управляемого аналоговым сигналом, и с входом импульсно-аналогового преобразователя 8, соединенного своим выходом со вторым входом сумматора 4. Выход этого сумматора соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 10. Выход элемента И 9 соединен с первыми входами знакового 11 и фазового 12 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 19, установленным на делительной передаче ведомой координаты. Выход знакового дискриминатора 11 соединен с потенциальными входами элементов И 13, 14, управляемых соответственно отрицательным и положительным потенциалами. Выход элемента И 13 соединен со вторым положительным входом параллельного сумматора 10, а выход элемента И 14 – с отрицательным входом этого сумматора. Выход фазового дискриминатора 12 через импульсно-аналоговый преобразователь 15 соединен с аналоговыми входами элементов И 13, 14. Выход параллельного сумматора 10 через усилитель мощности 16 соединен с электродвигателем 11 делительного стола (ведомая координата).

Делители частоты 1 и 6 аналогичны делителю частоты, используемому в схеме формирования сигнала управления приводами круговых подач шпинделя. Умножитель частоты 7 состоит из счетчика импульсов и блока установки коэффициента умножения. Выбор делителя частоты 6 или умножителя частоты 7 зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка. Таким образом, блоки установки коэффициента деления или умножения соответственно в делителе частоты 6 или в умножителе частоты 7 выполняют функцию органа настройки на круговую подачу делительного стола станочного зацепления долбяк – заготовка, а совместно с делителем частоты 1 ведущей координаты (см. рисунок 7.20) – органа настройки на траекторию этого зацепления. Блок установки коэффициента деления делителя частоты 1 выполняет функцию органа настройки на дополнительный поворот делительного стола на этапе врезания, а совместно с блоком установки коэффициента деления делителя частоты 14 (см. рисунок 7.20) ведущей координаты на этапе врезания – органа настройки на траекторию станочного зацепления заготовка (касательное движение) – заготовка (дополнительный поворот).

Схемы формирователей сигналов управления приводами подач остальных  $n - 1$  ведомых координат (делительных столов) аналогичны.

Связь системы синхронизации с центральным командоаппаратом или программируемым контроллером осуществляется посредством бесконтактных конечных переключателей, установленных на станине и роторе станка в точках, соответствующих позициям  $E, A, C, D$  (см. комментарий к способу зубодолбления по роторной схеме, приведенной на рисунке 4.5).

Циклы обработки зубчатых колес на каждом из делительных столов одинаковы, но смещены во времени на величину, равную времени поворота ротора в движении  $B_1$  на угол  $2\pi/n$ , где  $n$  – количество однотипных зубодолбежных станков, составляющих структуру роторного станка.

На рисунке 7.19 показано исходное для обработки положение, при котором круговой стол 7 находится в положении относительно инструментального суппорта 12 на позиции загрузки-выгрузки. В следующем по направлению вращения ротора положении исполнительных органов 7 и 12 происходит профилирование зубчатого колеса. В третьем положении профилирование закончено, осуществляется вывод долбяка из зоны зацепления и начинается этап позиционирования кругового стола в зону загрузки-выгрузки. Рассмотрим взаимодействие исполнительных органов станка по циклу обработки одного зубчатого колеса.

При включении эталонного генератора 2 импульсный сигнал с его выхода (см. рисунок 7.20) преобразуется в импульсно-измерительных преобразователях 3, 16, 17, 18 в постоянное напряжение. Затем по программе на элементы И 19 и 21 подается управляющий потенциал (символы  $P_3$  и  $P$ ). Напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя 18 сообщается через элемент И 21 и усилитель мощности 23 электродвигателю ротора, а напряжение с выхода импульсно-аналогового преобразователя – через элемент И 19 и усилитель мощности 22 электродвигателю продольного стола. В результате ротору сообщается движение подачи  $B_1$ , а круговому столу –  $B_3$ . На участке позиционирования  $EA$  (см. рисунок 4.5) круговой стол догоняет инструментальный суппорт. В конечной точке  $A$  участка позиционирования срабатывает конечный переключатель системы управления циклом, с элемента И 19 снимается управляющий потенциал  $P_3$ , а элементу И 20 сообщается управляющий потенциал (символ  $B_p$ ). В результате круговому столу сообщается подача врезания  $B_5$ . Одновременно включается привод поступательно-возвратного движения шпинделя долбяка.

На этапе врезания делительному столу сообщается движение  $B_6$ , согласованное с движением  $B_5$ . Осуществляется это следующим образом.



Сигнал – аналог подачи  $B_5$  кругового стола – поступает с импульсного измерительного преобразователя 18 на делитель частоты 1 канала отслеживающей синхронизации (см. рисунок 7.21), где происходит его деление в соответствии с коэффициентом деления, определяющим передаточное отношение станочного зацепления сложного движения врезания. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 2 через последовательно включенные элемент И 3, открытый по управляющему входу потенциалом  $V_p$ , сумматор 4, параллельный сумматор 10 и усилитель мощности 16, сообщается электродвигателю 11 привода делительного стола.

Этап врезания прекращается в конечной точке  $C$  участка врезания  $AC$  по команде конечного переключателя системы управления циклом. Управляющий потенциал  $V_p$  снимается с соответствующих элементов И. В результате сложное движение врезания  $B_5B_6$  прекращается. Одновременно на входы элементов И 4 и И 9 (см. рисунок 7.20) поступает управляющий потенциал на профилирование колеса (символ  $Pr$ ). Управляющий потенциал, действующий на управляющем входе элемента И 4, включает привод круговой подачи шпинделя, являющегося ведущей координатой движения обката (профилирования)  $B_2B_4$  (работа схемы формирования сигнала управления этим приводом описана выше). Функциональная связь движений  $B_2$  и  $B_4$  осуществляется схемой отслеживающей синхронизации (см. рисунок 7.21).

Сигнал – аналог круговой подачи шпинделя – поступает с импульсного измерительного преобразователя 20, установленного на шпинделе, на вход элемента И 22, один из управляющих входов которого при наладке открыт для прохождения задающего сигнала на вход делителя частоты 6 или умножителя частоты 7 (символы : или  $\times$ ) в соответствии с передаточным отношением станочного зацепления долбяк – заготовка.

После умножения или деления задающий сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 8 через сумматор 4, первый вход – выход параллельного сумматора 10, усилитель мощности 16 сообщается электродвигателю кругового стола. Одновременно устраняется девиация привода кругового стола. Сигнал с выхода делителя или умножителя частоты через открытый по управляющему входу потенциалом  $Pr$  элемент И 9 поступает на первые входы знакового 11 и фазового 12 дискриминаторов, на вторых входах которых одновременно поступает сигнал с импульсного измерительного преобразователя, установленного на делительной передаче делительного стола. При непрерывном мгновенном сравнении сигналов на выходе фазового дискриминатора образуется сиг-

нал абсолютной погрешности, а на выходе знакового дискриминатора – ее погрешности по знаку. Сигнал с выхода знакового дискриминатора *И 11* открывает по управляющему входу элемент *И 13*, управляемый отрицательным потенциалом, или элемент *И 14*, управляемый положительным потенциалом. С выхода фазового дискриминатора сигнал абсолютной погрешности преобразуется в аналоговую форму и поступает на входы элементов *И 13* и *И 14*. Этот сигнал в зависимости от его знака поступает через один из элементов *И* на второй положительный или на отрицательный входы параллельного сумматора *И 10*, происходит двухсторонняя коррекция задающего сигнала ведомой координаты (делительного стола).

Профилирование прекращается по сигналу конечного переключателя после переноса ротором исполнительных органов (обоих столов и инструментального шпинделя) в конечное положение участка профилирования *СД*. В этом положении управляющий потенциал *Пр* снимается с соответствующих ключей, приводы шпинделя и делительного стола отключаются. Прекращается также поступательно-возвратное движение шпинделя, и он выводится в крайнее верхнее положение. Одновременно на элемент *И 19* подается управляющий потенциал, и круговой стол на подаче врезания уходит из зоны профилирования по направляющим ротора по ходу его вращения. В положении загрузки-выгрузки конечным переключателем системы управления циклом электродвигатель кругового стола реверсируется и одновременно включается реле времени. Круговой стол, перемещаясь в направлении, противоположном направлению движения ротора, остается неподвижным в зоне загрузки-выгрузки в течение времени, определяемом циклом обработки. За это время снимается нарезанное колесо, устанавливается новая заготовка, а инструментальный суппорт перемещается на участок позиционирования. По окончании времени выдержки реле времени выключается, на управляющий вход соответствующего элемента *И* поступает потенциал *Пз* и цикл обработки повторяется.

Замена механических связей между исполнительными органами роторного зубодолбежного станка электронной системой синхронизации на основе типовых интегральных схем между их управляемыми электродвигателями создает предпосылки для снижения металлоемкости станка, снижения уровня шума при работе и для оптимизации режимов резания. Рациональная область использования такого станка – крупносерийное и массовое производство зубчатых колес.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ обработки как техническую охраноспособную виртуальную идею можно рассматривать в качестве первообразной качественной модели будущей технологической операции и соответствующей технологической машины. Повышается быстроходность технологических машин, совершенствуются системы управления и, как следствие, возрастает производительность обработки. Вместе с тем, как показывает практический опыт, способ обработки часто остается неизменным. Например, в станкостроении в ряде поколений токарных станков оставались неизменными пионерные способы токарной обработки (продольное точение, торцевое точение, нарезание резьбы), использующиеся на промышленной основе с 1800 года. В частности, это можно объяснить исключительной простотой токарного резца, простотой пионерных способов токарной обработки и, как следствие, относительной простотой, универсальностью и мобильностью токарного станка. Последующее развитие токарной обработки связано главным образом с токарным резцом с круглой режущей кромкой и фрезой. Использование такого токарного резца привело к изобретению первообразных способов обработки круглыми принудительно вращающимися и самовращающимися резцами, а использование фрезы – к изобретению первообразного способа фрезоточения по физической сущности являющегося промежуточным методом обработки между точением и фрезерованием. В полной мере это относится также к другим многообразиям способов формообразующей обработки. Например, к обкатному зубодолблению цилиндрических колес, обработке сложных поверхностей и др. В частности, эволюция обкатного зубодолбления относительно подробно рассмотрена в данной монографии.

Высшая школа практически не имеет обобщающих дисциплин, которые дают относительно полное представление о типологии способов обработки в конкретной отрасли техники, соответствующей инженерной специальности. Этот пробел устраняется в рамках данной монографии, посвященной системологии способов формообразующей обработки. В монографии с позиций синергетики на основе общей теории систем сведены в единый комплекс понятия, определения и положения, основанные на сущности и закономерностях структуры, функции, создания и использования искусственно создаваемых технических решений (вирту-

альных идей) – способов формообразующей обработки, выделенных автором в класс  $S$ -систем.

На основе анализа многочисленных примеров, преимущественно из патентных источников, дается однозначное определение способа формообразующей обработки, показывается его системный характер. Таким образом, доказывается, что любой способ формообразующей обработки – вполне определенный объект, структура и функция которого не сводятся к структуре и функции составляющих его элементов. Всеобщей характеристикой  $S$ -систем является цель, рассматриваемая как критерий целесообразности развития многообразия этих систем. В монографии наиболее динамично этот критерий проявляется на примере системного анализа обкатного зубодолбления. На базе морфологического (структурного) описания  $S$ -систем сформулировано понятие о критерии сложности способа формообразующей обработки. Показан его всеобщий характер. Еще одним общим критерием является понятие об относительной производительности по основному и штучному времени функционирования способов обработки. Этот критерий устанавливает преемственную качественную связь способа формообразующей обработки с технологической операцией. Названные критерии позволяют сравнивать различные  $S$ -системы при их относительной оценке.

В монографии рассматривается методика создания новых способов формообразующей обработки, базирующаяся на следствии, вытекающем из понятия способа формообразующей обработки, и на ряде общих принципов, сложившихся в научно-технической экспертизе изобретений.

В качестве приложения рассматривается также реализация ряда способов зубообработки в частных кинематических структурах зубодолбежных и зубофрезерных станков, преимущественно с электронными связями между их исполнительными органами. При этом существенное внимание уделено анализу схем цикловой автоматики для управления многопроходной обработкой с увеличенными круговыми подачами, что является одним из ведущих направлений в области развития процесса обкатного зубодолбления. Примеры для этого раздела также заимствованы из патентных источников.

Для описания кинематико-компоновочных схем металлорежущих станков использована достаточно подробно рассмотренная современная научная парадигма их познания. Эта парадигма включает две логически связанные части – основы теории формообразования реальных поверхно-

стей и понятие о кинематической структуре, настройке и функции металлорежущего станка.

Основы теории формообразования реальных поверхностей базируются на идеальных геометрических представлениях проективной геометрии и понятии характеристического образа режущего инструмента.

Понятие о кинематической структуре, настройке и функции металлорежущего станка базируется на положениях теоретической механики: законе разветвления энергии в кинематических цепях и принципе возможных перемещений, известном как принцип Даламбера.

Специальная проблематика системологии способов формообразующей обработки (виртуальных технических решений) излагается с относительно высокой степенью абстракции и обобщения и в то же время достаточной для понимания и возможного переноса ее на другие развивающиеся множества технических объектов, объединенных общей пионерной целью.

Основы теории формообразования реальных поверхностей базируются на идеальных геометрических представлениях проективной геометрии и понятии характеристического образа режущего инструмента.

Понятие о кинематической структуре, настройке и функции металлорежущего станка базируется на положениях теоретической механики: законе разветвления энергии в кинематических цепях и принципе возможных перемещений, известном как принцип Даламбера.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИФИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

*Парадигма* – комплекс научных данных или аксиом, принимаемых за истину, на основе которых развивается научная теория или модель методов исследования, доминирующих в течение определенного периода в научном сообществе.

*Эволюция познания* – смена парадигм.

*Общая теория систем* – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще (по Л. Берталанфи).

*Система* есть совокупность целесообразно организованных функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающая по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией.

*Структура системы* – схема связей и отношений между ее элементами.

*Функция системы* – способность целесообразной деятельности (функционирование) в рамках более сложной системы, в которую она входит.

*Системология* – анализ, синтез и систематизация объектов реальной действительности, объединенных общей пионерной (первообразной) целью.

*Способ формообразующей обработки* – целенаправленное множество приемов воздействия посредством инструмента или объекта, выполняющего его функцию, на твердое тело, осуществляемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил (например, в течение некоторого времени, при определенном соотношении воздействий приемов, определенной температуре, определенном состоянии среды, в которой происходит процесс).

*Вспомогательный элемент* – точка, линия или поверхность на инструменте, перемещаемая по виртуальной воспроизводимой линии при формообразующей обработке.

*Характеристический образ инструмента* – объединение вспомогательных элементов, отображаемое в виде множества точек на (в) воспроизводимую линию или поверхность.

*Мощность характеристического образа* – совокупность вспомогательных элементов инструмента, выраженная в виде вполне определенного класса множеств.

*Поверхность* – след, оставляемый одной воспроизводящей линией, называемой образующей, при ее перемещении по другой воспроизводящей линии, называемой направляющей (по Г. Монжу).

*Класс образования воспроизводящей линии* – отображение характеристического образа инструмента на виртуальную (воображаемую) линию.

*Компоненты* – независимые составные части системы, будучи взятые в наименьшем числе, достаточны для построения всей системы.

*Кинематическая структура металлорежущего станка* – целесообразно организованное объединение кинематических групп, выполняющих формообразующие и вспомогательные движения (по А. Федотёнку).

*Кинематическая группа* – компонента кинематической структуры металлорежущего станка, выполняющая вполне определенное настраиваемое или ненастраиваемое движение.

*Синергетика* – наука о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы (по Г. Хакену).

*Синергизм* – явление, характеризующееся тем, что суммарный эффект воздействия каких-либо факторов на объект или систему больше суммы эффектов воздействия каждого взятого из них в отдельности.

*Бифуркация* – поле ветвящихся виртуальных путей эволюции.

*Аттрактор* – траектория или некоторый коридор траекторий эволюции способов формообразующей обработки на основе вполне определенного первообразного способа обработки, образующийся в точке бифуркации.

*Тезаурус* – определенным образом организованная информация.

*Кумулятивность* – включение какой-либо гипотезы (теории) в другую гипотезу (теорию) без изменений в качестве ее составной части.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy, L. Ogólna teoria systemów / L. Bertalanffy. – Warszawa : Polskie wydawnictwo narodowe, 1984.
2. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980.
3. Колесников, А.А. Шанс для рывка / А.А. Колесников // Поиск : еженедел. газ. науч. сообщества. – 2002. – № 42 (700). – С. 8.
4. Лоскутов, А.Ю. Введение в синергетику / А.Ю. Лоскутов. – М. : Наука, 1990.
5. Дульнев, Г.Н. Введение в синергетику / Г.Н. Дульнев. – СПб. : Проспект, 1998.
6. Новые технологии получения и свойства металлических материалов // Тез. докл. 2-го Всесоюз. симпоз. по перспективным металлическим материалам : в 2-х ч. – М. : ИМЕТ АН СССР, 1991.
7. Дружинин, В.В. Проблемы системологии / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М. : Советское радио, 1976.
8. О патентах на изобретения и полезные модели : Закон Респ. Беларусь // Промышленная собственность (нормативно-методические материалы) : сборник. – Минск, 1998. – Вып. 4. – С. 7.
9. Большая энциклопедия : в 62-х т. – М. : Терра, 2006. – Т. 29. – С. 236–237.
10. Беларуская Энцыклапедыя : у 18-ці т. – Мінск : Энцыкл., 2000. – Т. 10. – С. 302.
11. Инструкция по государственной научно-технической экспертизе изобретений ЕЗ 2-74 // Вопросы изобретательства. – 1974. – № 8. – С. 29–65.
12. Гир-Шепер, Ф. Зубодолбежный станок / Ф. Гир-Шепер. – М., 1914.
13. Тихомиров, Р.А. Механическая обработка пластмасс / Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев. – Л. : Машиностроение, 1975.
14. Голембиевский, А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Минск : Наука и техника, 1986.
15. О патентах на изобретения, полезные модели, промышленные образцы : Закон Респ. Беларусь от 16 дек. 2002 г. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2003. – № 1. – 2/909.
16. Панченко, К.П. Определение и классификация схем резания / К.П. Панченко // Изв. вузов. Машиностроение. – М., 1964. – № 12. – С. 132–138.
17. Федотёнок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотёнок. – М. : Машиностроение, 1970.



18. Hubka, V. Theorie Technischer Systeme / V. Hubka. – Berlin : Springer Verlag, 1987.
19. Способ нарезания цилиндрических колес : пат. SU 475761 / М. Тиксье. – Оpubл. 1975.
20. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск : Наука и техника, 1961.
21. Заманский, М.А. Введение в современную алгебру и анализ / М.А. Заманский. – М. : Наука, 1974.
22. Резников, А.Н. Развитие науки о резании металлов / А.Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1976.
23. Бушуев, В.В. Тяжелые зубообрабатывающие станки / В.В. Бушуев, С.П. Налетов. – М. : Машиностроение, 1976.
24. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием : а. с. SU 358089 / Н.А. Ярославцева, В.М. Ярославцев, В.Н. Подураев. – Оpubл. 1972.
25. Способ обработки металлов резанием : а. с. SU 465274 / Ю.М. Ерамаков, Б.А. Фролов. – Оpubл. 1975.
26. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. ВУ 6134 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.
27. Ящерицын, П.И. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей / П.И. Ящерицын, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1996.
28. Хейфец, М.Л. Формирование покрытий ферропорошками в электромагнитном поле / М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов, П.И. Ящерицын // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 2–10.
29. Хейфец, М.Л. Совмещение процессов электромагнитного упрочнения и наплавки проволокой изношенных поверхностей деталей машин / М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов, П.И. Ящерицын // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2006. – № 6. – С. 36–41.
30. Способ прерывистого точения : а. с. SU 228463 / Ю.А. Новоселов. – Оpubл. 1969.
31. Способ обработки резанием : а. с. SU 854593 / В.А. Данилов. – Оpubл. 1981.
32. Способ ротационного точения : а. с. SU 1127690 / В.А. Данилов, Н.Н. Попок. – Оpubл. 1984.
33. Станок для нарезания зубчатых колес : а. с. SU 971596 / В.А. Данилов. – Оpubл. 1982.
34. Кошкин, Л.Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л.Н. Кошкин. – М. : Машгиз, 1957.

35. Способ нарезания зубчатых изделий : а. с. SU 1291311 / В.А. Терентьев, А.И. Трофимов. – Оpubл. 1987.
36. Способ соединения двух керамических материалов : а. с. SU 827255 / Б. Валтр. – Оpubл. 1981.
37. Способ электроэрозионной обработки : а. с. SU 848235 / М.В. Коренблюм. – Оpubл. 1981.
38. Способ электронно-лучевой обработки : а. с. SU 844184 / Б.А. Снедков. – Оpubл. 1981.
39. Способ электрохимического шлифования : а. с. SU 833413 / М.Я. Чмир. – Оpubл. 1981.
40. Голембиевский, А.И. Повышение производительности зубодолбления / А.И. Голембиевский, В.А. Терентьев, А.И. Трофимов // Машиностроитель. – 1979. – № 11. – С. 23.
41. Способ долбления зубчатых колес и станок для его осуществления : пат. ВУ 3343 / А.И. Голембиевский, Ю.Я. Сидоренков [и др.]. – Оpubл. 20.12.1999.
42. Способ чистовой обработки наружных шаровых поверхностей : а. с. SU 222184 / Е.Г. Коновалов, А.И. Фломенбит. – Оpubл. 1968.
43. Способ чистовой обработки наружных шаровых поверхностей : а. с. SU 384662 / Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1973.
44. Устройство для чистовой и упрочняющей обработки : а. с. SU 340521 / Е.Г. Коновалов, А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1972.
45. Кениг, Г. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении / Г. Кениг, К. Бузакис // Экспресс-информация, режущие инструменты. – М. : ВИНТИ, 1989.
46. Vaida, A. Studium formej aschiilor la mortezarea rotilor dintate cu cu-roata, in vederea determinarii fortelor de achiere / A. Vaida, G. Bejnaru // Buletinul universitatii din Brasov. – 1979. – A 21. – S. 41–48.
47. Verschleißuntersuchungen beim Walzstosstn von Geradverzahnungen / H. Opitz [u. a.] // Bericht des Landes Nordrhein-Westfallen. – 1974. – № 2401. – S. 64.
48. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес : а. с. SU 698732 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1979.
49. Способ нарезания зубчатых колес долбяком и устройство для его осуществления : а. с. SU 1034857 / В.В. Блохин, Ю.М. Ермаков. – Оpubл. – 1983.

50. Способ нарезания зубчатых колес долбяком : а. с. SU 1135574 / В.В. Блохин, Н.Н. Анишина. – Оpubл. 1985.
51. Способ нарезания зубчатых колес : а. с. 1380881 / И.Г. Ткаченко. – Оpubл. 1988.
52. Способ долбления зубчатых колес: а. с. SU 1641534 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1991.
53. Способ обработки зубчатых колес : а. с. SU 1763112 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1992.
54. Каталог зубодолбежных станков фирмы «Lorenz». – Ettlingen, 1988.
55. Walzstossen in Eteppen // Maschine. – 1991. – Vol. 45, № 6. – S. 75–78.
56. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес : а. с. SU 697265 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1979.
57. Способ одновременного долбления двух зубчатых колес : а. с. SU 1265017 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1986.
58. Зубодолбежный станок : а. с. SU 1641533 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1991.
59. Головин, Г.М. Кинематика станков / Г.М. Головин. – М. : МВТУ им. Баумана, 1946.
60. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 2–11.
61. Голембиевский А.И. Управление процессом многопроходного зубодолбления / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2006. – № 6. – С. 111–115.
62. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка : пат. ВУ 8621 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 2006.
63. Устройство управления приводом продольного стола зубодолбежного станка : а. с. SU 1835335 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1993.
64. Голембиевский, А.И. Управление процессом последовательного зубодолбления при касательном движении врезания / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 34–41.
65. Голембиевский, А.И. Синхронизация приводов функционально связанных исполнительных органов зубодолбежного станка роторного типа / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 93–99.
66. Голембиевский, А.И. Системный анализ процесса зубодолбления / А.И. Голембиевский. – Минск : Наука и техника, 1993.

*Научное издание*

ГОЛЕМБИЕВСКИЙ Анатолий Иосифович

СИСТЕМОЛОГИЯ СПОСОБОВ  
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор *Р.Н. Авласенок*

Дизайн обложки *М.С. Мухоморовой*

Подписано в печать 28.12.2017. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 13,69. Уч.-изд. л. 13,46. Тираж 100 экз. Заказ 1638.

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.