

А. И. Голембиевский

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

ПРОЦЕССА
ЗУБО-
ДОБЛЕНИЯ



А. И. Голембиевский

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗУБО• ДОЛБЛЕНИЯ

**Под редакцией кандидата технических наук
В. А. Петрова**

МИНСК
НАВУКА І ТЭХНІКА
1993

УДК 621.9.04:621.833.06

А. И. Голембиевский. Системный анализ процесса зубодолбления / Под ред. В. А. Петрова. – Мн.: Навука і тэхніка, 1993. – 152 с. – ISBN 5-343-01428-3.

На основе системного подхода проведен системно-структурный анализ известных способов обкатного зубодолбления. Способ зубодолбления рассматривается как целенаправленная техническая система, состоящая из кинематической, энергетической и базирующей подсистем. Находится понятие критерия сложности способа обработки как объединение критериев сложности составляющих его подсистем. Совокупность способов зубодолбления представляется как частное многообразие способов обработки, объединенных общей целевой функцией – возможностью получения цилиндрических зубчатых колес. Анализируется кинематическая структура зубодолбежных станков как с механическими, так и с электронными связями, реализующих большинство рассматриваемых способов зубодолбления.

Расчитана на научных и инженерно-технических работников машиностроительного профиля. Будет полезна аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Табл. 3. Ил. 42. Библиогр.: 44 назв.

Рецензенты:

д-р техн. наук Р. А. Тихомиров,
канд. техн. наук А. М. Долгих

2704040000—074

Г—БЗ—93

М 316(03)—93

ISBN 5-343-01428-3

© А. И. Голембиевский,
1993

ВВЕДЕНИЕ

В основу любого технологического класса металлорежущих станков положен вполне определенный способ или совокупность близких по своей сущности способов формообразующей обработки, объединенных общей целевой функцией. Разнообразии технологических классов и подклассов металлорежущих станков является следствием множества технологических задач, решаемых в машиностроении, размеров и форм обрабатываемых деталей. В индустриально развитых странах приблизительно десятая часть технологического процесса в машиностроении приходится на зубообработку. Наибольший удельный вес в зубообработке имеет зубофрезерование червячными фрезами. Вторую позицию занимает обкатное зубодолбление зуборезными долбяками.

Вместе с тем зубодолбление более универсально по сравнению с зубофрезерованием, так как позволяет обрабатывать меньшее колесо в блоке, зубчатые колеса с буртом, зубчатые секторы, внутренние зубчатые венцы.

Вместе с созданием в любой области науки и практики первообразного, т. е. пионерного, способа обработки с вполне определенной первообразной целевой функцией возникает проблема дальнейшего развития этого способа. В итоге постепенно складывается многообразие как частная развивающаяся система способов обработки, объединенных общей первообразной целевой функцией. При этом каждый конкретный способ обработки дополнительно решает ту или иную частную целевую функцию. Например, для частного развивающегося многообразия способов обкатного зубодолбления, первообразная целевая функция которого заключается в получении зубчатого колеса посредством зуборезного долбяка, в качестве частных целевых функций могут

быть повышение производительности обработки, улучшение качества получаемых колес, увеличение периода размерной стойкости инструмента и т. п.

К настоящему времени в технологии металлообработки сформировался значительный массив частных многообразий способов формообразующей обработки. Следовательно, можно утверждать, что выбор способа решения конкретной технологической задачи из известных способов формообразующей обработки выявил тенденцию к общему анализу внутренних связей и закономерностей различных процессов, методов и способов обработки и на этой основе к их систематизации. Таким образом, в развитии любой отрасли науки наступает такой момент, когда в качестве специального направления исследований выделяется построение различных обобщающих теорий, которые строятся на основе системных принципов [20, 25, 39], приближающихся по уровню обобщения к категориям диалектики. Подобные исследования как общие, так и частные могут служить в качестве [39] базы знаний для разработки новых целенаправленных объектов, т. е. новых технических систем; связующего звена между специалистами разного профиля; базы для систематических исследований в области истории техники.

В работе [20], посвященной системному анализу способов формообразующей обработки в машиностроении, сформулированы в наиболее общем виде принципы такого анализа и систематизации процессов, методов и способов обработки с единых системных позиций. В частности, показано, что любой способ формообразующей обработки как целостный искусственно созданный объект реальной действительности можно рассматривать в качестве технической системы. При этом любую совокупность известных и возможных новых способов формообразующей обработки, объединенных общей целевой функцией, можно анализировать как частную развивающуюся систему, свойства которой не сводятся к свойствам составляющих ее способов обработки. Вместе с тем такая частная развивающаяся система относительно выделена из общего многообразия процессов, методов и способов формообразующей обработки, которую можно рассматривать как большую развивающуюся систему.

Предлагаемая работа посвящена системному анализу процесса обкатного зубодолбления зуборезными долбьями,

т. е. частному развивающемся многообразии способов формообразующей обработки, первообразная целевая функция которого – обработка прямозубых цилиндрических колес внешнего зацепления. Поэтому общие вопросы системного анализа в данной работе будут затрагиваться только в объеме, необходимом для понимания излагаемого материала.

Глава 1 посвящена анализу первообразного, или пионерного, способа зубодолбления, различные модификации которого реализованы в зубодолбежных станках. Обсуждены особенности зубодолбления как процесса обработки, выявлен характер стружки, получаемой при зубодолблении, и ее влияние на износ долбяка, доказано, что такие особенности процесса зубодолбления, как неодинаковость толщины стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками зубьев долбяка, возрастание толщины среза от основания к вершине зуба долбяка и явление затирания при холостом ходе долбяка являются факторами, оказывающими отрицательное воздействие на размерную стойкость инструмента.

Показано, что первообразный способ зубодолбления есть целостный объект реальной действительности, так как он создан для решения конкретной технологической задачи: получение зубчатого колеса зуборезным долбяком. Вместе с тем решение конкретной технологической задачи для первообразного способа является его единственной целевой функцией, которую можно считать первообразной. Все последующие способы зубодолбления, производные от первообразного, обеспечивают достижение наряду с первообразной целевой функцией еще и достижение частной целевой функции. По существу в этом заключается сущность развития конкретного процесса, в данном случае обкатного зубодолбления.

Выявлено, что за прошедший период развития процесса зубодолбления, наряду с эволюцией первообразного способа зубодолбления на уровне изменения последовательности приемов, составляющих способ, и правил их выполнения, возможно появление способов, отличающихся на более высоком структурном уровне. Для этого уровня в пределах конкретного процесса формообразующей обработки характерны иная по сравнению с первообразным способом схема исходного расположения заготовки относительно инструмента и иная совокупность приемов воздействия инструмента на заготовку.

По существу в этом случае происходит качественный скачок в развитии частного многообразия способов обработки, объединенных общей целевой функцией. Итогом такого скачка является относительно новый способ, который можно рассматривать как пионерный, приближающийся по значимости к первообразному для конкретного процесса. Для такого способа характерно последующее эволюционное развитие.

Показано, что любой способ зубодолбления как целенаправленный объект вместе с тем является технической системой, которая представляет собой объединение относительно обособленных подсистем – кинематической, базирующей и энергетической, – каждая из которых наделена собственной структурой и функцией.

Глава 2 посвящена системному анализу известных способов зубодолбления. Причем этот анализ построен по принципу достижения частных целевых функций, названных выше. Показано, что одна и та же целевая функция может достигаться различными техническими эффектами. Так, повышение периода размерной стойкости долбяка достигается как изменением характера срезаемой стружки, так и устранением явления затирания.

На основе системного анализа установлено, что все многообразие известных и возможных новых способов зубодолбления как целенаправленных технических систем, объединенных общей первообразной целевой функцией, представляет собой частную развивающуюся систему или надсистему по отношению к составляющим ее способам. При этом для всех способов, представленных в многообразии, определены коэффициенты их сложности.

Выполнена классификация способов зубодолбления, в которой основным классификационным признаком выступает коэффициент сложности.

Глава 3 посвящена методологии системного анализа металлорежущих станков, в частности доказательству того, что металлорежущий станок является технической системой. При этом на первом, наиболее общем уровне его можно рассматривать как объединение трех относительно выделенных подсистем: кинематической структуры, схемы управления и компоновки. Каждая из названных подсистем характеризуется вполне определенной структурой и функцией.

Способы формообразующей обработки, в том числе спо-

собы зубодолбления, реализуются кинематической подсистемой, выражаемой в конкретных конструкциях кинематической схемой, которая на более общем уровне моделируется структурной схемой. Поэтому в соответствии с общей направленностью исследования анализируется только кинематическая подсистема. Методология системно-структурного анализа этой подсистемы иллюстрируется рассмотрением структурной схемы базового зубодолбежного станка с механическими связями, реализующего первообразный способ зубодолбления. Описание выполнено на языке теории кинематической структуры металлорежущих станков [37], наиболее полно раскрывающей физическую сущность функционирования станка. Как вариант базовой модели рассмотрена структурная схема, в которой механические связи заменены системой отслеживающей синхронизации, выполненной на типовых интегральных схемах.

На основе сравнения обеих структурных схем показана универсальность языка анализа кинематической структуры.

Глава 4 посвящена системно-структурному анализу кинематических подсистем зубодолбежных станков с радиальным врезанием, известным по патентным источникам, как с механическими, так и с электронными связями между исполнительными органами, реализующими большинство из рассмотренных в работе модификаций пионерного способа зубодолбления с радиальным врезанием. В частности, анализируется кинематическая структура зубодолбежных станков, изменяющая характер срезаемой стружки, и зубодолбежных станков, работающих без затирания. Частная целевая функция этих станков – повышение периода размерной стойкости инструмента и качества получаемых зубчатых колес.

Значительное внимание уделено анализу схем цикловой автоматики для управления многопроходной обработкой с увеличенными круговыми подачами, что является одним из ведущих направлений в области развития процесса зубодолбления.

Глава 5 посвящена системно-структурному анализу зубодолбежных станков с касательным врезанием. При этом основное внимание уделяется схемам многостоловых станков для последовательного и параллельного зубодолбления и для долбления по роторной схеме.

Таким образом, на основе системного подхода выполнен

анализ одного из известных частных процессов – развивающегося многообразия способов зубодолбления. Вместе с тем основные положения, используемые при анализе данного многообразия, могут применяться также при системном анализе иных частных процессов формообразующей обработки. По мнению автора, такой подход к конкретному многообразию способов обработки не только дает наиболее полное представление о развитии конкретной отрасли техники, но и создает необходимые условия для успешного поиска новых технических решений. Накопление подобных обобщающих исследований могло бы дать системный обзор специальной проблематики, благодаря чему существенно проще выявлять пробелы в конкретных частных областях техники формообразующей обработки. По существу такие исследования являются отражением современного развития техники в конкретных областях инженерной деятельности.

СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СПОСОБОВ ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ

1.1. Особенности процесса обкатного зубодолбления

В основу большинства зубодолбежных станков для обработки цилиндрических зубчатых колес положен классический способ, предложенный в начале XX в. Феллоу Гир-Шепером. По этому способу (рис. 1.1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости $A-A$, совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения прямозубого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Образующая зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится эле-

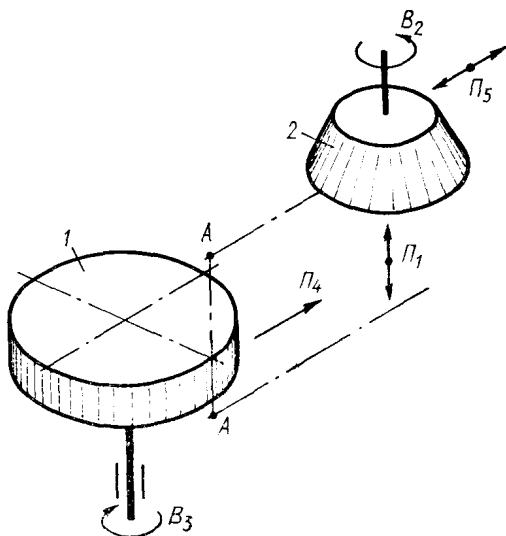


Рис. 1.1. Способ долбления прямозубых цилиндрических колес при радиальном врезании

ментарным формообразующим поступательно-возвратным движением Π_1 долбяка, а направляющая, имеющая форму профиля поперечного сечения нарезаемого колеса, – сложным движением обката $B_2 \equiv B_3$, состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения B_2 долбяка и вращения B_3 заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение Π_4 радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку (или заготовке) сообщается движение Π_5 «отскока», синхронизированное с движением Π_1 долбяка. Движение «отскока» предназначено для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе с целью устранения скольжения зубьев долбяка о профилируемые зубья колеса.

Рассмотренная схема используется также при обработке косозубых колес. Однако в этом случае для получения образующей зубчатого колеса – прямой, наклоненной к оси заготовки, – движение B_2 преобразуют из вращательного во вращательно-возвратное, которое функционально связывают с поступательно-возвратным движением Π_1 . Таким образом, при обработке косозубых колес линия зуба (образующая) воспроизводится сложным винтовым движением $\Pi_1 \equiv B_2$. Правила выполнения остальных движений ($B_2 \equiv B_3$, Π_4 , Π_5) остаются неизменными.

При долблении колес внутреннего зацепления как прямозубых, так и косозубых также применяется данная схема. При этом долбяк и заготовка в движении обката $B_2 \equiv B_3$ вращаются в одну и ту же сторону.

При описании схемы предполагалось, что процесс зубодолбления осуществляется за один проход заготовки после прекращения движения врезания (однопроходная обработка). В соответствии с общеизвестными нормативными рекомендациями эта же схема используется при зубодолблении за два или три прохода (многопроходная обработка). Каждому проходу предшествует врезание на часть припуска. При этом наибольшая часть припуска срезается на первом проходе.

Главной особенностью процесса зубодолбления является прерывистый (дискретный) характер резания, так как срезание стружки производится только при рабочем ходе долбяка в движении Π_1 . Количество резов обратно пропорционально

скорости обката, определяемой круговой подачей долбяка.

В работе [29] показано, что при зубодолблении основная масса припуска срезается вершинными и входными боковыми режущими кромками зубьев долбяка. Причем толщина стружек, срезанных 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 зубьев долбяка. 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 следующие этапы процесса срезания стружки [27, 43].

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 схеме наиболее распространен тип *U*-образного схода стружки (рис. 1.2, *a*), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более толстые стружки, чем выходная режущая кромка 3 [27]. Вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности и затрудняет ее сход. Стружка, срезанная вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвергается высокой растягивающей нагрузке, что приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками

зуба долбяка, после которого 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

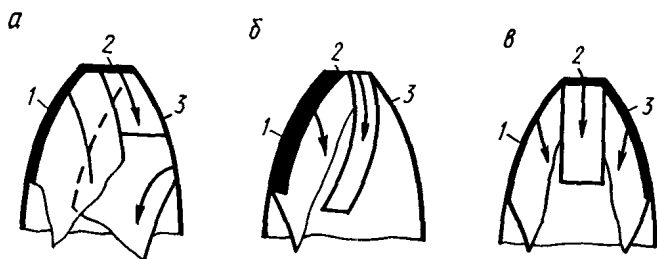


Рис. 1.2. Схема схода стружек при зубодолблении

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. Например, при круговой подаче, равной $0,63 \text{ мм/двойной ход долбяка}$, это расстояние составляет $0,4 \text{ мм}$. При увеличении круговой подачи оно возрастает.

При зубодолблении износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Причем его интенсивность нарастает от основания к вершинной режущей кромке по обеим боковым режущим кромкам пропорционально соответствующему увеличению толщин стружек вдоль этих кромок от основания к вершинной режущей кромке. Однако лимитирует размерную стойкость долбяков лунка локального износа по передней поверхности на выходной режущей кромке. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки.

Таким образом, неодинаковость толщин стружек, срезаемых входной и выходной режущими кромками, и возрастание толщин стружек от основания к вершинной режущей

кромке зуба долбяка оказывают отрицательное влияние на размерную стойкость долбяков. При этом можно предположить, что первый фактор является решающим при износе долбяков. Заметим, что 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 еще два возможных пути существенного замедления развития лунки локального износа. Первый 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 рис. 1.2, б. Выходная режущая кромка 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 (рис. 1.2, 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 замедляется в 2 раза, что соответственно увеличивает период размерной стойкости долбяков.

Рассмотренные пути замедления развития лунки локального износа и, следовательно, соответствующего повышения

периода размерной стойкости зуборезных долбяков требуют существенного изменения классической схемы зубодолбления. Это обстоятельство в настоящее время определяет одно из основных направлений поиска в области обкатного зубодолбления.

Теоретически [30] и экспериментально [18] установлено, что при зубодолблении в зоне резания возникает явление затирания, проявляющееся в виде трения скольжения боковых режущих зубьев долбяка о профилируемые зубья заготовки при холостом ходе долбяка. Причина его возникновения объясняется особенностями процесса зубодолбления [20]. При описании процесса зубодолбления было отмечено, что срезание стружки с заготовки происходит дискретно, т. е. только при рабочем ходе долбяка в движении $П_1$. Вместе с тем движение обката в течение всего цикла обработки осуществляется непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения $П_1$ и $B_2 \equiv B_3$ функционируют в качественно различном ритме. Это неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу приводит к возникновению явления затирания.

При обкате долбяка и заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. На первом рабочем ходе долбяка в движении $П_1$ 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 какого-то 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, определяемого как геометрическая сумма векторов скорости резания и круговой подачи. При холостом ходе в движении $П_1$ долбяк контактирует боковыми задними поверхностями каждого зуба с материалом заготовки на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, т. е. возникает явление затирания. Оно повторяется на каждом зубе долбяка, вступающего в обработку. Наиболее неблагоприятные условия работы каждого зуба соответствуют начальному этапу, где преобла-

дает копирование и, следовательно, возникают наибольшие по величине натяги при затирании. Этому этапу на боковых режущих кромках соответствуют участки у вершинной режущей кромки.

Явление затирания – одна из причин износа зубьев долбяков по боковым задним поверхностям. Поиск решений для его устранения определяет одно из направлений поиска в области зубодолбления.

В металлообработке для любого процесса постоянная проблема – поиск путей повышения производительности. При этом прослеживаются два основных направления. Первое определяется возможностями увеличения режимов обработки при сохранении неизменной исходной схемы, второе связано с постепенной эволюцией исходной схемы или с ее существенной модернизацией. Это относится и к процессу зубодолбления.

Повысить производительность обкатного зубодолбления при использовании рассмотренной схемы можно 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 надежность и технологическую долговечность станка или увеличивает его стоимость. Это направление, очевидно, исчерпало себя достигнутой к настоящему времени быстротходностью зубодолбежных станков.

С увеличением круговой подачи возрастает воздействие на размерную стойкость зуборезных долбяков рассмотренных факторов: явления затирания, возрастания толщины стружки от основания к вершинной режущей кромке зубьев долбяка, неодинаковость толщин стружек, срезаемых входной и выходной режущими кромками зубьев долбяка. С увеличением частоты двойных ходов долбяка отрицательное воздействие этих факторов возрастает.

В настоящее время в области зубодолбления из двух рассматриваемых направлений повышения производительности доминирующим является второе.

1.2. Способ зубодолбления как целостный объект реальной действительности

В работе [20] на основе конкретных примеров из различных областей формообразующей обработки дано следующее определение способа обработки. Способ обработки – это целенаправленная совокупность приемов воздействия посредством инструмента на заготовку, выполняемых в заданной последовательности с соблюдением определенных правил. В широком смысле функцию инструмента может выполнять резец, зуборезный долбяк, штамп, струя жидкости, луч лазера, электромагнитное поле и другие физические эффекты. В общем многообразии способов обработки правила выполнения отдельных приемов могут характеризоваться некоторым отрезком времени, определенным соотношением воздействий конкретных приемов, заданной температурой, состоянием среды, в которой происходит процесс, и т. д. Главной особенностью правил выполнения отдельных приемов является отсутствие причинной связи между ними и технологическими режимами выполнения конкретных операций. Правила выполнения отдельных приемов объединены с совокупностью приемов и их последовательностью лишь общей решаемой задачей. В этом заключается принципиальная сущность отличия способов обработки от технологических операций.

Рассмотренный в параграфе 1.1 способ зубодолбления характеризуется целенаправленной совокупностью приемов (установка заготовки и движения долбяка и заготовки P_1 $V_2 \equiv V_3$, P_4 , P_5), последовательностью выполнения приемов (сначала этап врезания на высоту зуба, затем этап профилирования), правилами выполнения приемов (установка заготовки в плоскости осей ее и долбяка, существенно меньше скорость врезания и круговая подача по сравнению со скоростью резания, согласованность элементарных вращательных движений V_2 и V_3 между собой, синхронизация движения P_5 с движением P_1). Таким образом, данный способ зубодолбления представляет собой законченный искусственно созданный целостный объект реальной действительности, целенаправленность, или целевая функция которого – получение из заготовки (твердого тела) прямозубого цилиндрического колеса.

Обсуждаемый способ зубодолбления является первообразным, или пионерным, так как его изобретение положило начало одному из направлений в области обработки зубчатых колес. Целевая функция пионерных способов в формообразующей обработке определяется однозначно как необходимость получения на твердом теле поверхности конкретного вида. В частном рассматриваемом случае эта функция – получение на цилиндрической заготовке зубчатого венца. Вместе с тем практическое использование пионерного способа открывает частное направление в инженерном и научном поиске, где в каждом конкретном случае целевая функция определяется конкретной задачей, решение которой обеспечивает улучшение конечного результата, например повышение производительности обработки, увеличение периода размерной стойкости инструмента, повышение геометрической точности получаемой поверхности и т. п. В обкатном зубодолблении частные целевые функции, как показывает анализ литературных и патентных источников, непосредственно связаны с устранением или минимизацией влияния на конечный результат факторов, выявленных при обсуждении первообразного способа зубодолбления. При этом достижение частных целевых функций возможно за счет изменения совокупности приемов, последовательности их выполнения и изменения правил выполнения отдельных приемов. В итоге образуется многообразие способов, объединенных общей основной целевой функцией пионерного способа. При этом возможны как несущественные изменения пионерного способа, так и изменения, в результате которых возможно появление новых способов, по своему уровню приближающихся к пионерным.

На рис. 1.3 приведена схема способа зубодолбления при касательном врезании [31]. Заготовка 1 устанавливается на расстоянии h от плоскости движения врезания $A-A$, равном половине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку сообщают поступательно-возвратное движение Π_1 скорости резания и процесс долбления выполняется в два этапа. На первом этапе заготовке 1 сообщают движение врезания Π_4 , согласованное с ее вращением B_6 , а долбяку 2 и заготовке 1 – движение обката (профилирования зубьев), состоящее из согласованных вращений B_2 и B_3 соответственно. Этот этап (врезание на высоту зуба) продолжается до тех пор,

пока ось долбяка не переместится на линию $A-A$, соответствующую окончанию врезания. В таком положении движение врезания Π_4 и согласованное с ним движение B_6 прекращаются, и на втором этапе в течение полного оборота заготовки профилируется нарезаемое колесо движением обката $B_2 \equiv B_3$. В течение всего цикла обработки заготовке сообщается движение Π_5 синхронно с движением Π_1 долбяка.

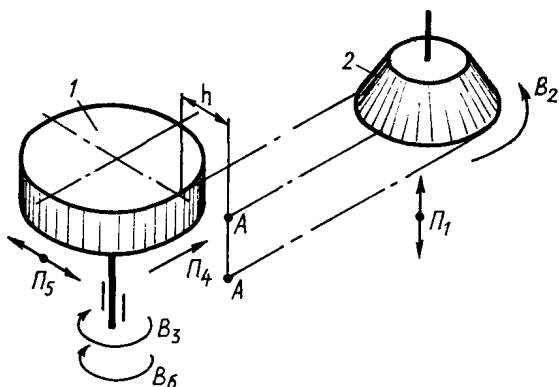


Рис. 1.3. Способ зубодолбления при касательном врезании

Данный способ (производный от пионерного) отличается от последнего дополнительным приемом (дополнительное вращение B_6 заготовки), иными правилами выполнения некоторых приемов (установка заготовки на вполне определенном расстоянии от плоскости движения врезания, согласование движения врезания Π_4 с дополнительным вращением заготовки B_6).

Описанный способ зубодолбления как законченный целостный объем реальной действительности сложнее первообразного. Однако, по утверждению автора этого способа, такое усложнение обеспечивает одинаковые условия резания на режущих кромках зубьев долбяка, что позволяет повысить его размерную стойкость.

По мнению автора данной работы, иное расположение долбяка и заготовки при зубодолблении с касательным врезанием создает условия для компоновки зубодолбежных станков для обработки одним стандартным долбяком двух колес на двух делительных столах. Соответствующие модификации данного способа будут рассмотрены ниже. По-видимому, по

своему уровню описанный способ зубодолбления при касательном врезании приближается к пионерному. Вместе с тем он является первообразным для группы последующих способов зубодолбления. В частности, такой способ обеспечил возможность создания способа зубодолбления по роторной схеме [7], совмещающей обработку с транспортированием.

Обработка заготовки 1 долбяком 2 по роторной схеме (рис. 1.4) осуществляется при их перемещении по концентрическим окружностям с общим центром O . В течение цикла обработки долбяк 2, совершающий движение Π_1 скорости резания и движение «отскока» Π_6 , синхронизированное с движением Π_1 (на рис. движение Π_1 и Π_6 не показаны), перемещается относительно центра O с постоянной угловой скоростью B_7 и вращается вокруг собственного центра с уг-

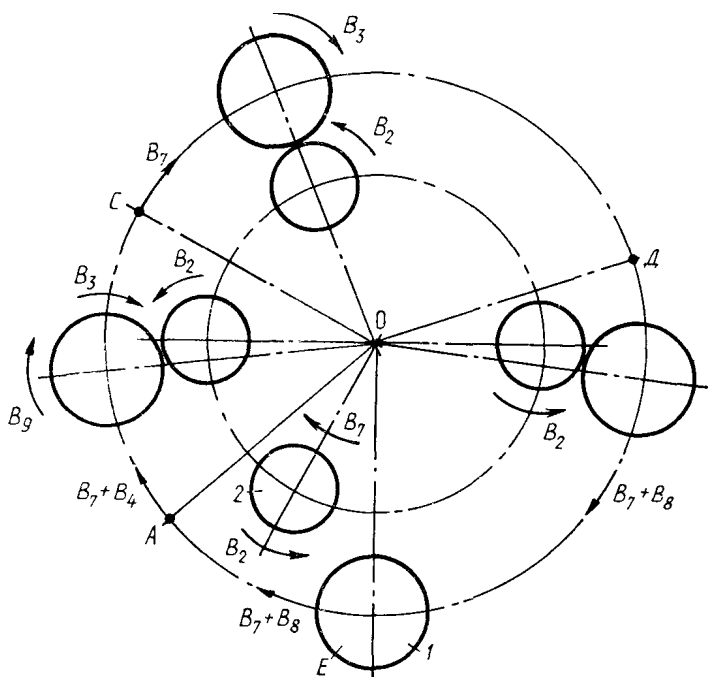


Рис. 1.4. Способ зубодолбления при непрерывном транспортировании пары долбяк – заготовка

ловой скоростью B_2 , определяемой круговой подачей. Угловая скорость заготовки I относительно центра O имеет различные значения. В начальный момент цикла после установки заготовки I в положение E ей сообщается движение позиционирования B_7+B_8 , превышающее угловую скорость B_7 долбяка на величину угловой скорости B_8 позиционирования. В результате на участке позиционирования EA заготовка догоняет долбяк с угловой скоростью позиционирования B_8 . На участке касательного врезания AC заготовке сообщается движение B_3 , согласованное с движением B_2 долбяка (согласованные движением B_2 долбяка и B_3 заготовки образуют движение обката $B_2 \equiv B_3$), движение касательного врезания B_7+B_4 , превышающее угловую скорость B_7 вращения долбяка на угловую скорость подачи касательного времени B_4 (движение B_4 является аналогом подачи врезания Π_4 на рис. 1.3) и согласованное с движением B_4 дополнительное движение B_9 . Врезание на высоту зуба заканчивается в позиции C , где движения Π_4 и B_9 прекращаются. На участке CD заготовка и долбяк относительно центра O перемещаются с одинаковыми угловыми скоростями B_7 . На этом участке осуществляется профилирование заготовки движением обката $B_2 \equiv B_3$, которое продолжается в течение одного поворота заготовки вокруг собственного центра. Профилирование заканчивается в позиции D . Здесь долбяк выводится в крайнее верхнее положение в движении Π_1 , движение B_3 заготовки прекращается и одновременно ей сообщается движение B_7+B_8 , превышающее угловую скорость B_7 долбяка относительно центра O на угловую скорость позиционирования B_8 . В итоге на участке DE заготовка уходит от долбяка и при достижении позиции загрузки – выгрузки останавливается, где производится замена обработанного колеса новой заготовкой. За время смены заготовки долбяк в движении B_7 проходит позицию E и обгоняет заготовку. Затем цикл обработки повторяется.

Описанный 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 рис. 1.4 схема является мгновенным положением четырех пар долбяк – заготовка. Тогда можно 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 отличается от предшествующего дополнительными приемами (ориентация пар долбяк – заготовка относительно центра совместного транспортирования, сообщение этой паре вращения B_7 , сообщение заготовке вращения B_8 позиционирования). Как целостный объект реальной действительности он сложнее предшествующего, являющегося в данном частном случае первообразным. Однако, как показывают патентные источники, этот способ положен в основу нового класса зубодолбежных станков, называемых роторными.

Заметим, что современной тенденцией в области развития технологических машин, включая металлорежущие станки, является переход к роторным и роторно-конвейерным схемам. Реализация таких схем в массовом производстве дает существенный эффект. Ниже рассмотрим кинематико-компоновочные схемы роторных зубодолбежных станков как с механическими, так и с электронными связями, реализующие способ зубодолбления по роторной схеме с касательным врезанием.

1.3. Геометрическая интерпретация воспроизведения зубчатого венца

Образование реальной поверхности в металлообработке представляет собой, по существу, процесс образования, соответствующий геометрической поверхности, под которой понимают след, оставляемый одной производящей линией, называемой образующей, при ее движении по другой производящей линии, называемой направляющей. 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.

Производящие линии реальных поверхностей создаются

при помощи вспомогательных элементов, материализованных на рабочей части инструмента. Вспомогательным элементом могут быть материальная точка, линия или некоторая поверхность. Вспомогательный элемент – режущая кромка зуборезного долбяка представляет собой замкнутую линию из последовательно чередующихся дуг окружностей, левой и правой эвольвент. Замкнутую линию можно рассматривать как z_{0i} расположенных последовательно однотипных вспомогательных элементов, а вспомогательный элемент – как множество материальных точек M_3 . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – вполне определенный класс P множеств M_3 :

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

Назовем класс P характеристическим образом инструмента, так как именно он определяет поведение производящих линий в процессе формообразования реальных поверхностей.

Из определения понятия характеристического образа инструмента следует, что этот образ зуборезного долбяка есть z_{0i} -элементный класс равномоощных множеств M_3 , т. е. $P_{0i} = \{M_3\}_{z_{0i}}$, где z_{0i} – число последовательно расположенных однотипных вспомогательных элементов, являющихся аналогами зубьев долбяка.

Будем рассматривать 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 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 инструмента P . Следовательно, чтобы изучить конкретные виды образования реальных поверхностей во времени, достаточно проследить, как во времени об-

разуются одномерные множества: образующая и направляющая линии.

Рассмотрим отображение характеристического образа в множестве M точек отрезка L плоской кривой, отсчитываемое от некоторой фиксированной точки 0 на этой кривой как однопараметрическое семейство точек, зависящих от времени.

Пусть характеристический образ $P_u = \{M_\alpha\}_{z_u}$ непрерывно

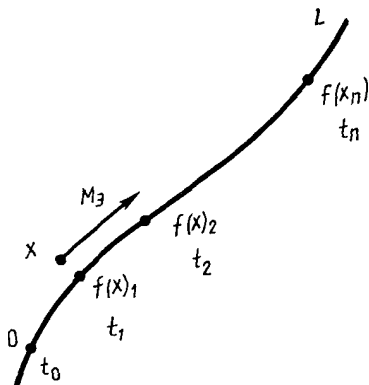


Рис. 1.5. Класс образования производящей линии вида H^c

скользит вдоль кривой L . Тогда отображаться в M будет единственный элемент $x \in M_\alpha$. При этом ему в множестве M будет непрерывно и однозначно соответствовать образ $f(x)$, фиксируясь на отрезке $0L$ (рис. 1.5) как возрастающая во времени последовательность

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

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при скольжении (H^c).

Пусть тот же характеристический образ обкатывается по кривой L так, что каждому $x_j \in M_\alpha$ при отображении в M взаимно однозначно соответствует образ $f(x)_{ij}$. Тогда на отрезке $0L$ (рис. 1.6) будет фиксироваться непрерывно возрастающая во времени последовательность

$$A_2 \{ \{f(x)_{22}, f(x)_{23}, \dots, f(x)_{2n}\} \{f(x)_{32}, f(x)_{33}, \dots, \\ \dots, f(x)_{3n}\} \dots \{f(x)_{k2}, f(x)_{k3}, \dots, f(x)_{kn}\} \}.$$

Назовем такой вид образования производящей линии непрерывным при качении (H^k).

При сравнении схем H^c и H^k видно, что они имеют принципиально различную физическую природу, так как движение характеристического образа для них принципиально различно. По первой схеме характеристический образ скользит вдоль воспроизведенной линии, по второй – катится без скольжения. Первая схема соответствует точению, строга-

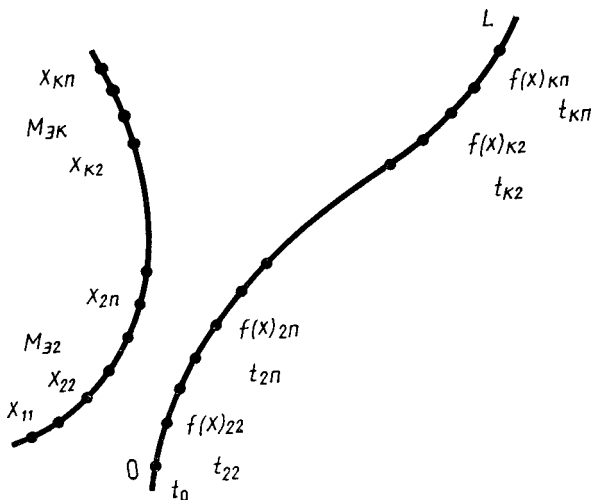


Рис. 1.6. Класс образования производящей линии вида $H^{k_{ij}}$

нию, долблению, вторая – обкату. При обсуждении первообразного способа зубодолбления было показано, что линия зуба (образующая) воспроизводится долблением, а направляющая (профиль зуба) – обкатом. Следовательно, образование зубчатого венца при зубодолблении осуществляется посредством сочетания полученных классов воспроизведения производящих линий.

Таким образом, для всего многообразия способов зубодолбления характеристический образ инструмента есть $\{M_s\}_{z_u}$, а класс образования поверхности зубчатого венца H^c-H^k .

При обработке резанием профиль получаемой поверхности имеет регулярно повторяющиеся выступы и впадины, с

той или иной точностью копирующие характеристический образ инструмента. Высота и форма этих неровностей зависят от многих факторов.

Микрогеометрия поверхности может рассматриваться в двух ее сечениях. Одно принимается в направлении воспроизведения образующей, т. е. в направлении скорости резания. Другое – в направлении воспроизведения направляющей, т. е. в направлении подачи. Как правило, микронеровности в направлении подачи для всех видов резания больше. Поэтому по ним и характеризуется микрогеометрия получаемой поверхности.

Для зуборезных долбяков, у которых боковые вспомогательные элементы выполнены в виде отрезков эвольвенты, несовпадающей по форме и протяженности с воспроизводимой линией, высота микрогребешков ориентировочно может быть определена по уравнению

$$R_z = \frac{(z_1 + z_u) \sin \alpha s_k^2 \sqrt{(z_1 + 2)^2 - z_1^2 \cos^2 \alpha}}{4mz_1^2 [(z_1 + z_u) \sin \alpha - \sqrt{(z_1 + 2)^2 - z_1^2 \cos^2 \alpha}]},$$

где R_z – высота микрогребешков, мм; z_1 и z_u – соответственно число зубьев нарезаемого колеса и долбяка; m – модуль, мм; α – угол профиля исходного контура, град.

Из приведенного выражения следует, что высота микрогребешков при прочих равных условиях пропорциональна квадрату круговой подачи. Отсюда для способов зубодолбления, частная целевая функция которых достигается изменением круговой подачи в цикле прохождения зоны обработки каждым зубом долбяка, характерно также соответствующее квадратичное изменение высоты микрогребешков в направлении круговой подачи, т. е. по профилю зубчатого венца. Такое изменение микрогеометрии при чистовой обработке нежелательно, а при предварительной обработке под последующее шлифование может оказать отрицательное воздействие на технологическую наследственность.

1.4. Способ зубодолбления как целенаправленная техническая система

В работе [20] для системного исследования технических объектов введено следующее определение понятия системы.

Под системой понимается 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. Причем под структурой понимается схема связей и отношений между элементами системы, а под функцией – 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.

Возвращаясь к любому из ранее описанных способов зубодолбления, отметим, что каждый из них обеспечивает качественное изменение объекта производства – твердого тела. В этом заключаются целостность способов и их функция. Структура каждого из способов включает следующие целесообразно организованные элементы: приемы (установка заготовки, сообщение ей и долбяку соответствующих движений); последовательности выполнения приемов (вначале установка заготовки, а затем сообщение движений); правила выполнения отдельных приемов (определенность базирования или установки заготовки относительно долбяка или окружающей среды, характеризуемой системой координат, существенно меньшей круговой подачей по сравнению со скоростью резания и т.п.). Два последних элемента в практике зубообработки подразумеваются как сами собой разумеющиеся. Поэтому при описании способов обработки в технической и патентной литературе они опускаются.

Таким образом, рассмотренные ранее способы зубодолбления подпадают под определение понятия системы. Принимая во внимание, что они взяты произвольно из общего многообразия способов зубодолбления, можно утверждать, что любой из известных и возможных новых способов зубодолбления одновременно является системой. Следовательно, можно целенаправленно изменять структуру и функцию исходных способов и тем самым создавать качественно иные способы зубодолбления с иной структурой и функцией, обеспечивающие достижение частной целевой функции. Есте-

ственно структурные изменения могут охватывать не только отдельные структурные элементы, но и значительно преобразовывать структуру и функцию исходного способа, что влечет за собой появление новых способов. Однако любой новый способ зубодолбления, полученный таким образом, будет характеризоваться со стороны целостности как относительно обособленный объект из совокупности всех известных и возможных новых способов, объединенных общей целевой функцией; со стороны функции – как процесс качественного изменения твердого тела; со стороны структуры – как множество целесообразно связанных элементов (приемов, их последовательности и правил выполнения). Способы, обладающие совокупностью названных свойств, являются результатом творчества и создаются для решения конкретных технических задач. Таким образом, их можно отнести к категории технических систем, обозначаемых в дальнейшем как s -системы.

Возвращаясь к рассмотренным ранее способам зубодолбления, отметим, что они различаются по уровню сложности. Следовательно, необходимы какие-то конкретные критерии, с помощью которых можно сравнивать по уровню сложности различные способы, составляющие совокупность известных и возможных новых способов, объединенных общей первообразной целевой функцией. Такие критерии получают на основе методики системного описания способов формообразующей обработки [20].

В наиболее общем виде любой способ формообразующей обработки, определенный как s -система, можно представить в виде объединения трех подсистем

$$s_s = {}^k M \cup {}^6 M \cup {}^3 M,$$

где ${}^k M$, ${}^6 M$, ${}^3 M$ – соответственно кинематическая, базирующая и энергетическая подсистемы.

Каждая подсистема относительно обособлена и наделена собственной структурой и функцией. При этом структура и функция s -системы не сводятся непосредственно к структуре и функции отдельных составляющих ее подсистем.

Кинематическая подсистема обеспечивает определенность траекторий формообразующих и вспомогательных движений в процессе воздействия инструмента на твердое

тело (в данном случае долбяка на заготовку) и таким образом характеризует закономерности относительных движений заготовки и инструмента без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил и активных сред.

Кинематическая подсистема – это объединение механик отдельных движений-приемов способа обработки

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

где ${}^k M$ – кинематическая подсистема; ${}^k M_i$ – механика отдельного движения; n – количество отдельных движений.

Функцию кинематической подсистемы можно представить как множество параметров

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

где P и Θ – 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 движений требует определенной энергии. Причем эта энергия не используется для воздействия на твердое тело, а предназначена только для переноса кинематической информации. Следовательно, механику отдельного движения можно рассматривать как объединение информационного и энергетического комплексов

$${}^k M_i = J_i \cup E_i$$

(J_i, E_i – соответственно информационный и энергетический комплексы).

Тогда функция механики отдельного движения есть множество

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

где Θ_L – подкласс образования воспроизводящей линии; Φ – формообразующее или вспомогательное движение; g – отношение между элементарными движениями, составляющими формообразующее или вспомогательное движение.

Заметим, что энергия, предназначенная для переноса ки-

нематической информации, в станковедении, т. е. в науке о металлорежущих станках, называется энергией (мощностью) холостого хода.

Таким образом, определенность траектории конкретного движения обеспечивается информационным комплексом, а энергетический комплекс служит для обеспечения информационного энергией. Форма траектории взаимно однозначно соответствует конкретной воспроизводимой линии и может выполняться различными движениями. При зубодолблении, как это видно из рассмотренных ранее примеров, процесс осуществляется элементарными вращательными и поступательными движениями и сложным движением, состоящим из двух строго согласованных между собой элементарных движений.

Информация о траектории конкретного исполнительного элементарного движения заложена в соответствующей вращательной или поступательной паре, к подвижному звену которой подводится энергия от какого-либо источника. В металлорежущих станках связь между подвижными звеньями кинематических пар и источником энергии производится кинематическими цепями различной протяженности. В s -системах источники энергии выражаются в описаниях и иллюстрирующих их схемах посредством соответствующих движений. Будем считать 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 заложена или в сложной кинематической паре, например винтовой, или 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.

При теоретико-множественном описании механики кинематической подсистемы отдельные элементарные движения, образующие сложное движение, будем соединять знаком эквиваленции \equiv . Поступательно-возвратное элементарное движение будем отмечать знаком $-$, переменное элемен-

тарное движение – знаком \sim и периодическое элементарное движение – знаком \wedge , указывая их над соответствующим информационным комплексом. Вспомогательные движения, выполняемые одновременно с формообразующими, будем отмечать знаком \parallel , выполняемые последовательно – \perp и выполняемые синхронно – \parallel .

Составим для рассмотренных ранее способов зубодолбления структурные формулы (математические модели) их кинематических подсистем. Для способа, представленного на рис. 1.1, кинематическая механика, воспроизводящая образующую, записывается формулой:

$${}^k M_0 = (\bar{J} \cup E)_{H^c},$$

а механика, воспроизводящая направляющую, – структурной формулой

$${}^k M_H = (J \equiv J \cup E)_{H^k}.$$

Функция механик формообразующих движений есть множество

$${}^k F_{0-H} = \{ \{M_3\}_{z_u}, H^c - H^k, \Phi_v(\bar{P}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3) \},$$

где $\{M_3\}_{z_u}$ – характеристический образ зуборезного долбяка; $H^c - H^k$ – класс образования зубчатого венца колеса.

Механика, воспроизводящая вспомогательные движения врезания и «отскока», записывается соответственно формулами

$${}^k M_{Bp} = J \cup E, \quad {}^k M_{Bc} = \bar{J} \cup E.$$

Функция вспомогательных механик есть множества

$${}^k F_{Bp} = Bp(P_4), \quad {}^k F_{Bc} = Bc(P_5).$$

Следовательно, полная механика кинематической подсистемы описывается формулой

$${}^k M = (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \cup E)_{Bp} \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc}.$$

Функция данной кинематической подсистемы есть множество

$${}^k F = \{ \{M_3\}_{z_u}, H^c - H^k, \{ \Phi_v(\bar{P}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3), \\ \parallel Bp(P_4), \parallel Bc(\bar{P}_5) \} \}.$$

При многопроходном зубодолблении движение $\text{Вр}(П_4)$ повторяется перед каждым очередным проходом, т. е. в функции кинематической подсистемы оно записывается в виде

$$\parallel \text{Вр}(П_4) \perp m.$$

Для способов зубодолбления (см. рис. 1.3 и 1.4) кинематическая механика, воспроизводящая формообразующие движения, и ее функция имеют такую же структурную формулу, что и аналогичная механика способа по рис. 1.1. Это обстоятельство однозначно следует также из общей целевой функции многообразия способов зубодолбления.

Механика, воспроизводящая вспомогательные движения для способа по рис. 1.3, записывается в виде

$${}^k M_{\text{Вр}} = J \equiv J \cup E, \quad {}^k M_{\text{Вс}} = \bar{J} \cup E.$$

Функция этой механики есть множество

$${}^k F_{\text{Вр}} = \text{Вр}(П_4 \equiv B_6), \quad {}^k F_{\text{Вс}} = \text{Вс}(\bar{П}_5).$$

Следовательно, кинематическая подсистема для способа по рис. 1.3 описывается формулой

$${}^k M = (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \equiv J \cup E)_{\text{Вр}} \cup (\bar{J} \cup E)_{\text{Вс}}.$$

Функция этой подсистемы есть множество

$${}^k F = \{ \{ M_{\vartheta} \}_{z_u}, H^c - H^k, \{ \Phi_v(\bar{П}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3), \\ \parallel \text{Вр}(П_4 \equiv B_6), \parallel \text{Вс}(\bar{П}_5) \} \}.$$

Механика, воспроизводящая вспомогательные движения для способа по рис. 1.4, имеет вид

$${}^k M_{\text{Вр}} = J \equiv J \cup E, \quad {}^k M_{\text{Вс}} = J \cup E, \\ {}^k M_{\text{Тр}} = J \cup E, \quad {}^k M_{\text{Пз}} = J \cup E.$$

Функция этих механик есть множества

$${}^k F_{\text{Вр}} = \text{Вр}(П_4 \equiv B_6), \quad {}^k F_{\text{Вс}} = \text{Вс}(\bar{П}_5), \\ {}^k F_{\text{Тр}} = \text{Тр}(B_7), \quad {}^k F_{\text{Пз}} = \text{Пз}(B_8).$$

Тогда полная механика кинематической подсистемы описывается структурной формулой

$${}^k M = \{(\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \equiv J \cup E)_{P_n} \cup \\ \cup (\bar{J} \cup E)_{B_c} \cup (J \cup E)_{T_p} \cup (J \cup E)_{P_3}\}_n.$$

Функция этой подсистемы

$${}^k F = \{\{M_3\}_{z_2}, H^c - H^k, \{\Phi_v(\bar{J}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3), \\ \parallel B_p(P_4 \equiv B_6), \parallel T_p(B_7), \perp P_3(B_8), \parallel B_c(\bar{P}_5)\}\}_n.$$

Таким образом, кинематическая подсистема данного способа зубодолбления есть n -элементный класс равномошных множеств

$${}^k M = \{{}^k M_1\}_n.$$

В математических моделях символы B_p , B_c , P_3 , T_p обозначают функциональные движения – соответственно врезание, «отскок», позиционирование, транспортирование.

Для оценки сложности кинематической подсистемы будем пользоваться критерием сложности, определяемым 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 , C_J , C_E – критерии сложности соответственно кинематической подсистемы, информационного и энергетического комплексов.

Для рассмотренных способов зубодолбления сложность кинематических подсистем равна соответственно

$$C_k = 5 + 4 = 9, \quad C_k = 6 + 4 = 10, \quad C_k = \{8 + 6\}_n = 14n.$$

Оценивая различные кинематические подсистемы критерием сложности, можно наметить пути упрощения кинематической подсистемы: переходом к s -системам, образующим обе или одну из воспроизводящих линий по классу E (единовременно), что равнозначно переносу функций некоторых информационных комплексов на характеристический образ инструмента и переносом функции некоторых энергетических комплексов в зону контакта заготовки и инструмента. Первый путь объясняет развитие таких процессов, как непрерывное литье, литье по выплавляемым моделям,

различные виды штамповки, формирование изделий в управляемом электромагнитном поле, второй путь – появление процессов обработки поверхностным пластическим деформированием и резание самовращающимися резцами. Однако ни первый, ни второй пути не приемлемы в анализируемом в данной работе процессе.

Базирующая подсистема обеспечивает определенную исходную ориентацию заготовки относительно инструмента. На рис. 1.7 приведены две наиболее распространенные схемы базирования цилиндрического зубчатого колеса при качественно различной высоте его ступицы. Комплект баз при базировании зубчатого колеса с высокой ступицей (рис. 1.7, а) состоит из двойной направляющей скрытой базы I, отнимающей четыре степени свободы (точки 1, 2, 3, 4), опорной явкой базы II, отнимающей одну степень свободы (точка 5), и опорной скрытой базы III, отнимающей также одну степень свободы (точка 6). При обработке зубчатого колеса с низкой ступицей качественный характер баз изменяется. В этом случае комплект баз включает (рис. 1.7, 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).

Аналогично можно рассматривать комплекты баз, обеспечивающих определенность установки иных заготовок. При разработке технологического процесса изготовления

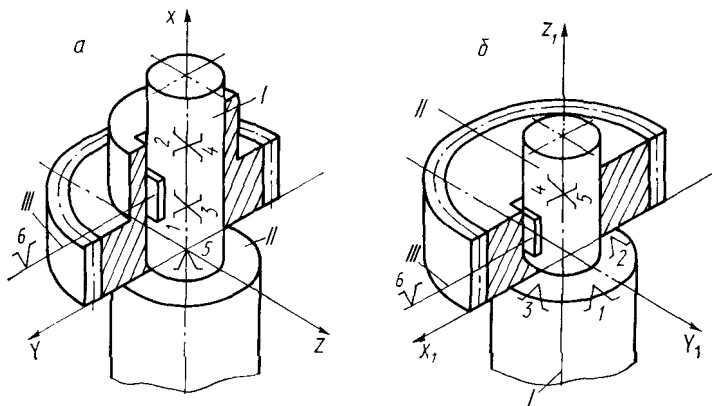


Рис. 1.7. Схемы базирования зубчатого колеса

конкретной детали выбор оптимального комплекта баз 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 инструмента. Это позволяет, абстрагируясь от конкретных конструкций приспособлений и их элементов, рассматривать базирующую подсистему как счетное множество баз (подсистем второго уровня), обеспечивающих определенность исходной ориентации заготовки относительно инструмента:

$${}^6M = \bigcup_{i=1}^3 {}^6M_i,$$

где 6M – базирующая подсистема; 6M_i – отдельная база.

Базы характеризуются числом отнимаемых степеней свободы. Положим этот параметр в основу формализации баз. Тогда в математических моделях различных баз (табл. 1.1) достаточно указать отнимаемые степени свободы.

В технологии формообразующей обработки известны s -системы, в которых полностью или частично функцию базирующей подсистемы выполняет инструмент или, точнее, характеристический образ инструмента. Например, при объемной штамповке, некоторых видах полноконтактной обкатки сферических и конических деталей, формообразовании изделия из расплава с помощью электромагнитного поля функцию отдельных баз или базирующей подсистемы выполняет

Таблица 1.1. Математические модели стандартных баз

Название базы	Модель базы
Двойная направляющая	${}^6M^{1-4}$
Установочная	${}^6M^{1-3}$
Направляющая	${}^6M^{4-5}$
Опорная	${}^6M^6$
Двойная опорная	${}^6M^{4-5}$

характеристический образ.

Таким образом, независимо от конструктивных особенностей базы, составляющие базирующую подсистему, можно разделить на две группы. В первую входят базы, не имеющие структурных связей с характеристическим образом, во вторую – базы, функция которых передана характеристическому образу инструмента. На основании этого функцию базирующей подсистемы можно рассматривать как множество параметров

$${}^6F = \{\{W_i\}, \{Q_i\}\},$$

где 6F – функция базирующей подсистемы; $\{W_i\}$ – конечное множество вариантов базирования заготовки для конкретной s -системы; $\{Q_i\}$ – конечное множество отношений между базами и характеристическим образом инструмента.

Для оценки сложности базирующей подсистемы введем критерий сложности, с помощью которого можно определять общее количество баз, подлежащих материализации в виде конкретных установочных приспособлений или элементов:

$$C_6 = \Sigma {}^6M_q,$$

где C_6 – критерий сложности базирующей подсистемы; 6M_q – база, материализуемая установочным приспособлением.

Базирующая подсистема, являясь аналогом технологического комплекта баз, всегда содержит три явные или скрытые базы в любом сочетании. Следовательно, максимальный критерий сложности базирующей подсистемы равен 3, а минимальный – 0. Из определения понятия критерия сложности вытекает единственный путь упрощения базирующей подсистемы, заключающийся в передаче функций одной или нескольких баз характеристическому образу инструмента.

В табл. 1.2 приведены математические модели базирующих подсистем по рис. 1.7.

Из таблицы видно, что обе основные схемы базирования заготовки при зубодолблении имеют одинаковый критерий сложности. Поэтому при анализе различных способов зубодолбления выбор конкретной схемы базирования не имеет

Таблица 1.2. Математические модели базирующей подсистемы

Номер рисунка	Структура и функция базирующей подсистемы	Критерий сложности
1.7, а	${}^6M = {}^6M^{1-4} \cup {}^6M^5 \cup {}^6M^6,$ ${}^6F = \{1, 0\}$	3
1,7, б	${}^6M = {}^6M^{1-3} \cup {}^6M^{4-5} \cup {}^6M^6,$ ${}^6F = \{1, 0\}$	3

значения, так как не оказывает влияния на сложность базирующей подсистемы и s -системы в целом.

Процесс воздействия на заготовку с целью получения на ней заданной поверхности осуществляется энергией, подводимой в зону обработки. Способы зубодолбления основаны на использовании механической энергии для механических целей. Вместе с тем в области обработки металлов резанием известны способы, в которых для технологических целей применяются дополнительные виды энергии, например точение с наложением на зону обработки электростатического поля, точение с воздействием на зону резания ультразвуком, точение с опережающим пластическим деформированием, алмазноэлектролитическое сверление и т. п. Для обкатного зубодолбления дополнительные воздействия на процесс обработки не характерны. Однако для сохранения единообразия при описании различных подсистем, образующих s -системы – способы зубодолбления, будем рассматривать энергетическую подсистему с единых для всех видов обработки позиций.

Назовем природу энергетического воздействия на твердое тело для технологических целей (первичное воздействие), в необходимом единстве с которой функционируют кинематическая и базирующая подсистемы, внутренней средой s -системы. Она, как следует из приведенных примеров, может быть простой однокомпонентной и сложной, состоящей из двух и более простых компонент. Естественно предположить, что каждая компонента внутренней среды воспроизводится определенной механикой, что позволяет рассматривать энергетическую подсистему в виде объединения отдельных механик (подсистем второго уровня), каждая из ко-

торых воспроизводит одну компоненту данной среды

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

где 3M – энергетическая подсистема; 3M_i – механика отдельной энергетической компоненты.

Все структурные составляющие энергетической подсистемы можно разделить на две группы. Первая содержит составляющие, функции механики которых переданы отдельным механикам кинематической подсистемы. Как правило, составляющие кинематической подсистемы являются также составляющей энергетической подсистемы, осуществляющей механическое воздействие (обработка резанием, давлением) на материал заготовки. Такое совмещение упрощает способ обработки – s -систему в целом. Вторая группа включает энергетические составляющие, функции которых не переданы составляющим других подсистем. 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 будет определять как общее количество составляющих энергетической подсистемы, функции которых не переданы другим подсистемам

$$C_3 = \sum_v {}^3M_v,$$

где C_3 – критерий сложности энергетической подсистемы; 3M_v – составляющая энергетической подсистемы, функция которой не передана другой подсистеме.

Функцию энергетической подсистемы в наиболее общем виде, охватывающем все возможные варианты воздействия на твердое тело, можно представить множеством

$${}^3F = \{\{T_i\}, \{\Gamma_q\}, \{\eta\}, \{C_j\}\}.$$

Здесь 3F – функция энергетической подсистемы; $\{T_i\}$ – конечное множество составляющих энергетической подсистемы; $\{\Gamma_q\}$ – обобщенный параметр состояний каждой компоненты внутренней среды; $\{\eta\}$ – конечное множество уров-

ней состояния каждой компоненты; $\{C_j\}$ – конечное множество отношений между составляющими энергетической подсистемы и другими подсистемами s -системы.

Обобщенный характер состояний одной компоненты внутренней среды есть вектор

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

составляющие которого – мощность, интенсивность, форма, длительность воздействия на твердое тело и другие частные параметры, задаваемые формулой способа обработки.

Приведенные ранее три способа зубодолбления основаны на механическом резании. Воздействие от источника передается по кинематической подсистеме, т. е. энергетическая подсистема способов совмещена с кинематической. Поэтому сложность энергетической подсистемы для этих способов равна нулю. Базирующая подсистема относительно выделена, материализация ее составляющих не зависит от характеристического образа инструмента. Таким образом, на первом уровне разбиения структура рассмотренных способов есть множество

$${}_1S_s = \{ {}^k M \cap {}^s M, {}^6 M \}.$$

Обобщенный критерий сложности, представляющий собой сумму критериев сложности отдельных подсистем, различается только за счет критерия сложности кинематической подсистемы, что позволяет при системном анализе способов зубодолбления сравнивать их сложность только по сложности кинематической подсистемы. Данное обстоятельство распространяется на все известные способы зубодолбления.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ СПОСОБОВ ОБКАТНОГО ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ

2.1. Способы, изменяющие характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками

При обсуждении процесса зубодолбления были рассмотрены три способа: зубодолбление при радиальном врезании, при касательном врезании и зубодолбление по роторной схеме.

Различаясь на уровне кинематических подсистем, эти три способа приводят к скачкообразному изменению компоновки зубодолбежных станков. Дальнейшее развитие процесса зубодолбления, как показывают источники информации, идет в направлении введения дополнительных приемов и совершенствования в первую очередь правил выполнения отдельных приемов рассмотренных способов. При этом в качестве целевой функции выступает, как правило, или повышение периода размерной стойкости долбяков, или увеличение производительности процесса. Первая целевая функция достигается в основном за счет минимизации или полного устранения влияния на размерную стойкость долбяков факторов, специфических для зубодолбления, а вторая – за счет возможности обработки одним долбяком двух зубчатых колес на двух делительных позициях или увеличением взаимодействующих пар долбяк–заготовка. Поэтому анализировать известные способы зубодолбления наиболее рационально по конкретным факторам, устранение или учет которых обеспечивает достижение названных целевых функций.

При анализе особенностей процесса зубодолбления было показано, что минимизировать влияние неодинаковости толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка, на период размерной стойкости зуборезных долбяков можно посредством создания условий для срезаания L-образной стружки. В [11] описан единственный способ, обеспечивающий указанные условия стружкообразования при однопроходном зубодолблении. По этому способу

(рис. 2.1) обработка заготовки 1 производится долбяком 2 с зауженными зубьями по делительной окружности, и при каждом рабочем ходе долбяка долбление осуществляется попеременно вершинными и входными, затем вершинными и выходными режущими кромками. Для этого в начале каждого рабочего хода долбяку сообщается дискретная круговая подача B_6 попеременно в направлении основной круговой

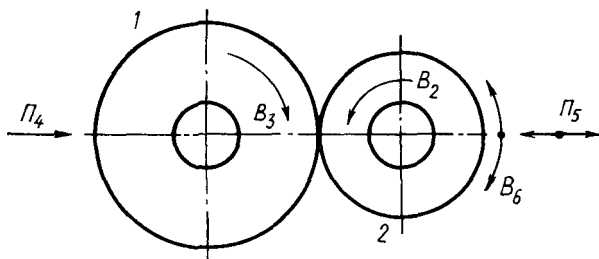


Рис. 2.1. Схема взаимодействия долбяка и заготовки в плане

подачи B_2 , затем против нее. Для обеспечения такого правила выполнения дискретной круговой подачи B_6 ее величина задается выражением

$$\Delta s = s_k \frac{z_1 + z_u}{z_1} \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{4z_1}{(z_1 + z_u)(z_u + 2)} \right) \right],$$

где Δs – дискретная круговая подача, мм / (дв·ход) долбяка; s_k – основная круговая подача, мм / (дв·ход); z_u и z_1 – число зубьев долбяка и заготовки соответственно.

Данный способ отличается от первообразного (см. рис. 1.1) дополнительной дискретной круговой подачей, синхронизированной с поступательно-возвратным движением долбяка. Эта подача функционально не связана с движением B_3 заготовки и, следовательно, является вспомогательным движением, периодически изменяющим ориентацию движения обката $B_2 \equiv B_3$.

Механика кинематической подсистемы способа описывается выражением

$${}^k M = (\bar{J} \cup E)_{Hc} \cup (J \equiv J \cup E)_{Hk} \cup (J \cup E)_{Bp} \cup \\ \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc1} \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc2}.$$

Функция данной подсистемы есть множество

$${}^kF = \{ \{M_a\}_{z_u}, H^c - H^k, \{ \Phi_v(\bar{P}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3), \\ \parallel \text{Вр}(P_4), \parallel \text{Вс1}(\bar{P}_5), \parallel \text{Вс2}(\bar{B}_6)_{\Delta_s} \} \}.$$

В выражении для функции кинематической подсистемы дискретная круговая подача Δ_s обозначает специфическое правило выполнения дополнительного приема – движения B_6 . Критерий сложности кинематической подсистемы равен 11.

Таким образом, рассмотренный способ сложнее первообразного на механику одного элементарного вспомогательного движения.

Современная тенденция в практике обкатного зубодолбления ведущих западных фирм – переход к многопроходному зубодолблению при 5–7 черновых проходах при одновременном увеличении круговой подачи на порядок, т. е. до 3,5...4,0 мм / (дв·ход) [38]. Такой режим при сохранении производительности традиционного одно- и трехпроходного зубодолбления обеспечивает повышение размерной стойкости долбяков. В [38] это объясняется следующим обстоятельством. При зубодолблении толщина стружки возрастает с увеличением круговой подачи. Одновременно при увеличении количества проходов уменьшается ее длина. Таким образом, происходит перераспределение параметров сечения стружки. При этом количество срезаемых стружек уменьшается на порядок. Поэтому каждый зуб долбяка при большой круговой подаче срезает существенно меньшее количество стружек и, как следствие, меньше нагревается. В результате возрастает термоциклическая стойкость режущих кромок зубьев долбяка.

При многопроходной обработке нет необходимости использовать долбяки с заууженными зубьями по делительной окружности при срезании L-образной стружки. Кроме того, дополнительную дискретную круговую подачу долбяку более рационально сообщать не перед каждым рабочим ходом, а при очередном врезании перед каждым последующим проходом. В итоге долбление на проходах, кроме первого, будет выполняться либо вдоль входной, либо вдоль выходной режущей кромки.

Другой путь минимизации влияния неодинаковости толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками,

на период размерной стойкости долбяков связан с созданием условий для срезания U-образной стружки. Однако такой режим обработки осуществим только при многопроходном зубодолбления на всех проходах кроме первого. Рассмотрим два известных решения данной задачи.

Согласно первому решению, пользуясь известными зависимостями [29], можно найти толщину стружки, срезаемой входной и выходной боковыми режущими кромками зубьев долбяка. Тогда разность толщин стружки будет определять значение углового смещения (дискретную круговую подачу Δs), которое необходимо сообщать долбяку противоположенно его круговой подаче одновременно с очередным врезанием на часть припуска [24]. В результате на последующем проходе выходная и входная режущие кромки каждого зуба долбяка будут срезать одинаковую по толщине стружку. В [24] период углового смещения задается во времени посредством использования в системе управления станка реле времени.

Второе решение основано на активном контроле за моментом силы резания [15]. При врезании перед очередным проходом долбяку сообщается угловое смещение, противоположенное его круговой подаче, и одновременно измеряется момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружке, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение долбяка прекращается. В итоге на проходе будет срезаться U-образная стружка, имеющая одинаковую толщину на входной и выходной режущих кромках.

Оба решения с точки зрения представления способа формообразующей обработки как s -системы одинаковы, так как имеют одинаковую структуру, функцию и критерий сложности. Вместе с тем эти решения различаются правилами управления угловым смещением долбяка. Следовательно, можно утверждать, что в данном случае кинематическая подсистема способа зубодолбления пересекается со способом управления в том же смысле, как и пересечение двух множеств в теории множеств.

В зубодолбежных станках с ЧПУ фирмы «Лоренц» (ФРГ) [26, 44] реализован способ многопроходного зубодолбления с непрерывным врезанием по спирали на черновых и получистовых проходах. Однако в литературе методика определения подачи радиального врезания, имеющая

решающее значение для данного способа, не раскрывается.

При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе многопроходного врезания долбяка 2 (рис. 2.2) относительно заготовки 1 действительная траектория имеет форму архимедовой спирали 3. Действительная (спиральная) подача долбяка равна геометрической сумме составляющих ее подач:

$$s_d = \sqrt{s_k^2 + s_p^2},$$

где s_d – действительная подача долбяка, мм / (дв·ход); s_k , s_p – соответственно круговая и радиальная подачи, мм / (дв·ход).

Подачу радиального врезания можно определить как часть круговой подачи, используя принцип пропорциональности перемещений:

$$s_p = s_k \frac{h}{l}, \quad (2.1)$$

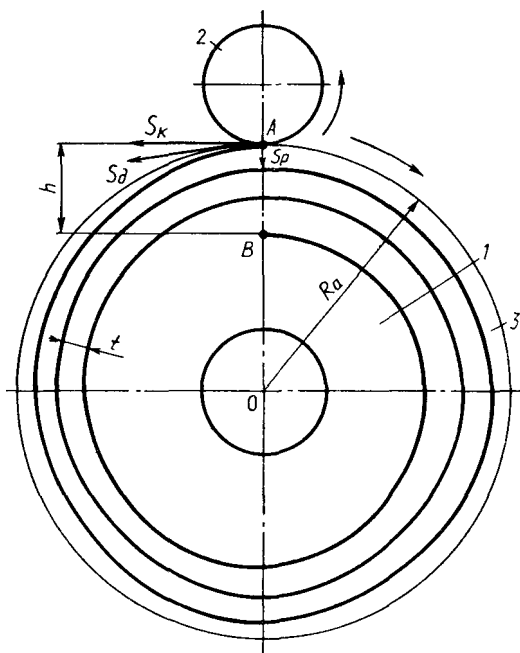


Рис. 2.2. Траектория движения долбяка при непрерывном врезании по спирали

где h – принимаемая величина радиального врезания на этапе черновых проходов, мм; l – длина архимедовой спирали между точками A и B , по которой перемещается долбяк относительно заготовки, мм.

Известно [34], что длина архимедовой спирали, начиная от полюса, рассчитывается по формуле

$$L = \frac{a}{2} (\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \text{Arsh } \varphi).$$

Здесь a – параметр архимедовой спирали, мм; φ – угол поворота радиус-вектора точки в полярных координатах, рад.

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк, можно определить как разность длин спиралей полюс 0 – точка A и полюс 0 – точка B . После элементарных преобразований получим

$$l = \frac{a}{2} [(\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2}) + (\text{Arsh } \varphi_2 - \text{Arsh } \varphi_1)] \quad (2.2)$$

(φ_1 и φ_2 – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса 0 до точки B и от полюса 0 до точки A).

Углы φ_1 и φ_2 определим из выражений

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a}, \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

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,

$$a = h/2\pi k.$$

В выражении (2.2) второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах практически приемлемого числа черновых проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь

при практических расчетах. После подстановки значения l в выражение (2.1) окончательно получаем

$$s_p = \frac{2s_k h}{a(\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2})}$$

Данный способ отличается от способа по рис. 1.1 тем, что на этапе черновых и получистовых проходов элементарное движение врезания $Vp(\Pi_4)$ функционально связано с движением B_2 круговой подачи долбяка, которое в свою очередь входит в сложное движение обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$. Характер задания подачи радиального врезания в виде функции $s_p = f(s_k)$ является правилом выполнения этого структурного элемента. Таким образом, структура кинематической подсистемы описывается выражением

$${}^*M = (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (J \equiv J \cup E)_{Vp} \cup (\bar{J} \cup E)_{Bc}$$

Функция этой подсистемы есть множество

$${}^*F = \{ \{M_{\bullet}\}_{z_u}, H^c - H^k, \{ \Phi_v(\bar{\Pi}_1), \Phi_s(B_2 \equiv B_3), \\ \parallel Vp(\Pi_4 \equiv B_2) s_p = f(s_k), \parallel Bc(\bar{\Pi}_5) \} \}$$

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 10, т. е. рассмотренный способ многопроходного зубодолбления незначительно отличается от первообразного.

В работах [29, 32, 36] предложены аналитические зависимости, раскрывающие характер изменения толщин стружек вдоль режущих кромок в функции круговой подачи долбяка. Следовательно, задаваясь постоянной, например средней толщиной стружки вдоль боковой входной режущей кромки, находящейся в более неблагоприятных условиях резания, можно, пользуясь одной из известных аналитических зависимостей, получить закономерность изменения круговой подачи, необходимую для усреднения толщины стружки вдоль режущей кромки. Следовательно, для минимизации влияния рассматриваемого фактора на размерную стойкость долбяков круговую подачу необходимо непрерывно изменять в течение цикла прохождения каждым зубом долбяка зоны обработки. Таким образом, для минимизации влияния на размерную стойкость долбяков рассматриваемого фактора (возрастание толщины стружки от

основания к вершинам зубьев инструмента) достаточно изменить правило выполнения скорости движения обката, т. е. круговой подачи. Из определения понятия способа формообразующей обработки следует, что изменение правила выполнения приема приводит к новому производному способу с новой частной целевой функцией. Однако структура кинематической подсистемы исходного или первообразного способа остается неизменной, а ее функция изменяется только этим правилом.

Известно, что толщина срезаемой стружки от основания к вершине зуба, например по входной режущей кромке, изменяется в несколько раз. Следовательно, при усреднении толщины стружки вдоль режущей кромки необходимо монотонно изменять круговую подачу от максимального до ее минимального значения, различающихся в такое же число раз. Вместе с тем при обсуждении влияния характеристического образа долбяка на микрогеометрию зубчатой поверхности отмечалось, что при изменении круговой подачи высота микрогребешков изменяется пропорционально квадрату этой подачи. Таким образом, устранение отрицательного влияния рассматриваемого фактора на размерную стойкость долбяков приводит к возникновению иного фактора – монотонному изменению высоты микрогребешков пропорционально квадрату круговой подачи. При чистовой обработке это ухудшает качественные показатели зубчатого колеса и соответствующей передачи, при обработке под последующее шевингование или шлифование – технологическую наследственность зубчатой поверхности, что увеличивает время чистовой обработки. Из приведенного выше следует, что усреднение толщины стружки вдоль боковой режущей кромки зубьев долбяка можно считать проблематичным.

2.2. Способы, обеспечивающие устранение явления затирания

Было показано, что при холостом ходе долбяка возникает явление затирания, которое, по существу, определяет износ входной и выходной режущих кромок зубьев долбяка по задним поверхностям.

Для устранения явления затирания предложено изменить направление «отскока» долбяка при холостом ходе, из-

вестное в технической литературе как «косой отскок». Существуют различные варианты выполнения «косого отскока». Наиболее простой – параллельное смещение направления радиального «отскока» относительно плоскости резания в направлении, противоположном направлению вектора круговой подачи. Конструктивно этот вариант обеспечивается посредством смещения инструментальной стойки станка при его наладке.

Другой вариант «косого отскока» осуществляется с помощью дополнительного кругового «отскока» долбяка [41] или заготовки [23] в сторону, противоположную вектору круговой подачи. В данном случае за счет сложения векторов радиального и кругового «отскоков» при холостом ходе воспроизводится «косой отскок». Такой вариант осуществляется кинематической подсистемой способа зубодолбления. Конструктивно это выполняется осевым перемещением червяка делительной пары шпинделя долбяка или делительного стола синфазно с радиальным «отскоком».

Для расчета величины смещения направления радиального «отскока» или дополнительного кругового «отскока» можно воспользоваться методикой, изложенной в работе [30], где рассматривается последовательность определения угла «косого отскока».

Таким образом, «косой отскок» в первом варианте требует только изменения правила выполнения одного приема исходного способа зубодолбления и, следовательно, не изменяет его структуру. Второй вариант предусматривает введение в исходный способ дополнительного приема и соответствующего правила его выполнения. В этом случае производный способ имеет более сложную кинематическую подсистему. В практике станкостроения широко распространен первый вариант. Тем не менее использование «косого отскока» не всегда удобно особенно в мелкосерийном производстве из-за увеличения времени переналадки станка.

В [40] показано, что «косой отскок» не решает в целом задачу устранения явления затириания. Причем при однопроходном зубодолблении «косой отскок» переносит зону возникновения явления затириания на противоположную боковую режущую кромку.

Известно решение [20], основанное на непрерывном при каждом двойном ходе долбяка изменении скорости обката (круговой подачи). Для обеспечения такого правила выпол-

нения приема исходного способа зубодолбления необходимо определить текущее значение круговой подачи при постоянном минимальном зазоре при холостом ходе между находящейся в наиболее неблагоприятных условиях выходной режущей кромкой очередного вступающего в зону резания зуба долбяка и профилируемой его боковой стороной зуба нарезаемого колеса. Можно воспользоваться методикой, изложенной, например, в работе [30], из которой, в частности, следует, что для каждой пары долбяк–заготовка необходима собственная закономерность изменения круговой подачи. Это позволяет утверждать, что такой характер изменения круговой подачи для устранения явления затирания не рационален. Кроме того, непрерывное изменение круговой подачи приводит к соответствующему квадратичному изменению высоты микроребешков зубчатой поверхности, что нежелательно.

Альтернативой рассмотренному правилу выполнения круговой подачи являются решения, основанные на дискретном на двух уровнях изменении круговой подачи. Последняя при каждом рабочем ходе остается неизменной и вместе с тем отличается от ее значения при холостых ходах. В частности, на периоды холостого хода долбяка предлагается [20] или прекращать движение обката (рис. 2.3, вариант 1), или

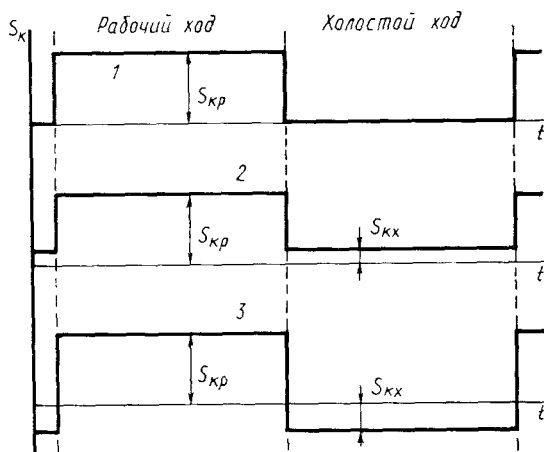


Рис. 2.3. Варианты дискретного изменения круговой подачи: s_{kp} – круговая подача при рабочем ходе; s_{kx} – круговая подача при холостом ходе

осуществлять его с минимальной («ползучей») круговой подачей (вариант 2), или реверсировать (вариант 3). В последнем варианте для обеспечения процесса формообразования при рабочем ходе долбяка движение обката должно иметь большую скорость, чем при холостом ходе. Для избежания потери производительности разность круговых подач рабочего и холостого ходов необходимо установить с учетом допустимой условиями обработки высоты огранки (микрогребешков) поверхности зубьев в направлении их профиля. Для этого можно воспользоваться выражением

$$s_{кр} - s_{кх} = 2 \sqrt{\frac{R_z m z_1^2 [(z_1 + z_u) \sin \alpha - \sqrt{(z_1 + 2)^2 - z_1^2 \cos^2 \alpha}]}{(z_1 + z_u) \sin \alpha \sqrt{(z_1 + 2)^2 - z_1^2 \cos^2 \alpha}}},$$

где $s_{кр}$ и $s_{кх}$ – круговая подача соответственно при рабочем и холостом ходах долбяка, мм / (дв.ход); R_z – допустимая высота микрогребешков, мм; m – модуль, мм; z_1, z_u – число зубьев соответственно нарезаемого колеса и долбяка; α – угол профиля исходного контура, град.

Достоинство данных вариантов изменения правила выполнения круговой подачи – их применимость как при однопроходном, так и при многопроходном зубодолблении.

Решения, основанные на различных вариантах изменения правила выполнения скорости обката, не изменяют структуру кинематической подсистемы исходного способа и, следовательно, не усложняют ее механику. Тем не менее каждое из решений можно рассматривать как новый способ зубодолбления, характеризующийся по сравнению с исходным новой частной целевой функцией.

Выше было показано, что одной из современных тенденций при зубодолблении является переход к многопроходной обработке при увеличенных круговых подачах на предварительных проходах. При таком режиме зубодолбления возможен автоматический выбор оптимального количества проходов при условии устранения явления затирания [13]. При многопроходном зубодолблении заготовке 1 и долбяку 2 перед каждым проходом при непрерывном движении обката $B_1 \equiv B_2$ сообщается движение Π_4 радиального врезания на часть припуска, снимаемого на проходе (рис. 2.4). Поэтому на каж-

дом этапе врезания суммарная (действительная) подача геометрически складывается из круговой подачи s_d и подачи радиального врезания s_p . Вектор подачи s_d отклоняется от вектора круговой подачи s_k в тело заготовки I . Одновременно на этапах врезания непрерывно контролируется возможность возникновения при холостом ходе долбяка явления затирания посредством измерения составляющей P_x силы, развива-

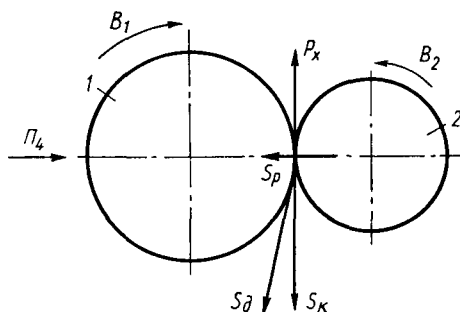


Рис. 2.4. План скоростей при взаимодействии долбяка и заготовки

емой явлением, или измерения момента этой составляющей. Как только при достижении какой-то глубины врезания возникнет явление затирания, оно будет зафиксировано. Электрический аналог силы P_x или ее момента после преобразований в управляющий сигнал отключит движение P_4 радиального врезания. Последующий проход будет осуществляться с круговой подачей s_k , меньшей суммарной подачи s_d этапа врезания. Такое уменьшение подачи на проходе является граничным условием отсутствия явления затирания, а также предельным для величины врезания, предшествующей каждому проходу при любом принятом значении круговой подачи.

Рассмотренный способ отличается от первообразного только правилом выполнения одного приема – подачи врезания. Характер изменения этого правила задается не кинематической подсистемой, а способом управления, представляющим собой также целостный объект со своей структурой и функцией. Таким образом, кинематическая подсистема способа многопроходного зубодолбления и способ управления многопроходным зубодолблением пересекаются как два множества в теории множеств. Заметим, что подобное пересечение – характерная особенность всех способов формооб-

разования с адаптивным управлением независимо от уровня развития системы управления.

2.3. Способы, обеспечивающие повышение производительности зубодолбления при касательном врезании

По утверждению автора первого изобретения в области обкатного зубодолбления с касательным врезанием [31], обеспечиваются одинаковые условия резания на режущих кромках зубьев долбяка, что позволяет повысить его размерную стойкость. Однако это не является достаточно корректным. Действительно, на этапе касательного врезания условия резания несколько изменяются, так как врезание воспроизводит зубчато-реечное зацепление. На этапе профилирования условия резания для обоих вариантов врезания (касательного и радиального) одинаковы. Кроме того, типы стружки, описанные при обсуждении процесса зубодолбления, характерны для обоих вариантов. Поэтому некоторые отличия условий резания на этапе врезания не могут дать существенного повышения периода размерной стойкости инструмента. Отметим, что рассмотренные пути устранения отрицательного воздействия на размерную стойкость долбяков факторов,

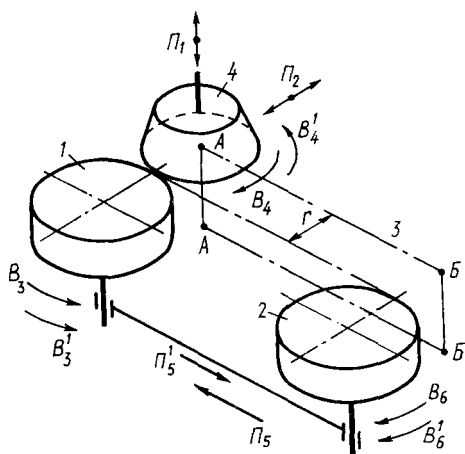


Рис. 2.5. Способ последовательного зубодолбления двух заготовок при касательном врезании

характерных для зубодолбления с радиальным врезанием, можно применять также и для зубодолбления с касательным врезанием.

По мнению автора, иное расположение заготовки относительно долбяка при обработке с касательным врезанием создает условия для обработки одним стандартным долбяком двух заготовок на двух позициях как последовательно, так и параллельно. В этом случае некоторое усложнение структуры первообразного способа зубодолбления с касательным врезанием (см. рис. 1.3) оправдывается повышением производительности зубообработки.

На рис. 2.5 показана схема способа зубодолбления с касательным врезанием, позволяющая установку каждой последующей заготовки совместить с обработкой предшествующей (целевая функция) [14]. Заготовки 1 и 2 размещаются 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 Π_1 скорости резания и синхронное с ним движение «отскока» Π_2 в плоскости, перпендикулярной направлению движения врезания. Профилирование заготовки 1 осуществляется 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 Π_1 выводится в крайнее верхнее положение, движение B_4 долбяка реверсируется (движение B_4^1), а движение B_3 заготовки 1 прекращается. Затем движением Π_5 на ускоренном ходе заготовки совместно перемещаются в положение, соответствующее исходному для обработки заготовки 2, где движение Π_5 переключается на подачу врезания, долбяку 4 сообщается движение Π_1 , а заготовке 2 – движение B_6 , согласованное с движением Π_5 , и движение B_6^1 , согласованное с движением B_4^1 долбяка 4. Этап врезания продолжается до тех пор, пока ось долбяка 4 не переместится на линию Б–Б, соответствующую окончанию врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В этом положении движение Π_5 прекращается, одновременно прекращается согласованное с ним движение B_6 заготовки 2, и на втором этапе в течение одного оборота заготовки осуществляется профилирова-

ние ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений B_4^1 долбяка B_6^1 заготовки.

Во время профилирования заготовки 2 заменяется обработанное зубчатое колесо новой заготовки 1.

После завершения профилирования заготовки 2 долбяк выводится в крайнее верхнее положение, движение B_4^1 реверсируется (движение B_4), а движение B_6^1 заготовки 2 прекращается. Затем движением Π_5^1 на ускоренном ходе заготовки перемещаются в положение для обработки заготовки 1. В этом положении движение Π_5^1 переключается на подачу врезания, долбяку 4 сообщается движение Π_1 , а заготовке 1 – движение B_3^1 , согласованное с движением Π_5^1 , и движение B_3 , согласованное с движением B_4 долбяка. Этап врезания продолжается до тех пор, пока ось долбяка 4 не переместится на линию $A-A$. В этом положении движение Π_5^1 и согласованное с ним движение B_3^1 заготовки 1 прекращаются, и в течение полного оборота заготовки 1 осуществляется профилирование ее зубьев движением обката, состоящим из согласованных вращательных движений B_3 заготовки 1 и B_4 долбяка.

Одновременно на этапе профилирования заготовки 1 устанавливается новая заготовка 2 вместо обработанной и т. д.

Рассмотренный способ зубодолбления позволяет повысить производительность обработки зубчатых колес за счет совмещения вспомогательного времени, необходимого для замены нарезанного зубчатого колеса очередной заготовкой, с машинным временем обработки на другой позиции.

Данный способ как s -система отличается от первообразного по структуре и по функции. Его кинематическая подсистема содержит дополнительную механику ${}^k M_{Bp} = J_2 \equiv J_2 \cup E_2$, функция которой ${}^k F_{Bp} = Bp_2(\Pi_5^1 \equiv B_6^1)$. Базирующая надсистема удваивается, т. е. преобразуется в множество, состоящее из двух равных множеств:

$${}^6 M = \left\{ \left\{ \bigcup_{i=1}^3 {}^6 M_i \right\}, \left\{ \bigcup_{i=1}^3 {}^6 M_i \right\} \right\}.$$

Таким образом, данный способ характеризуется увеличе-

нием критерия сложности кинематической подсистемы на три единицы и критерия сложности базисующей подсистемы также на три единицы.

На рис. 2.6 показана схема способа, обеспечивающая удвоение производительности зубообработки (целевая функция) за счет одновременного долбления двух зубчатых колес. Заготовки 1 и 2 устанавливаются симметрично относительно направления A касательного врезания с расстоянием d между делительными окружностями, равным делительному диаметру долбяка 3. Затем долбяку 3 сообщается поступательно-возвратное движение Π_1 скорости резания и процесс зубодолбления выполняется в два этапа. На первом этапе заготовкам 1 и 2 сообщается движение врезания Π_2 , согласованное с их вращением B_3 в разные стороны, а долбяку 3 и заготовкам 1 и 2 – движение обката (профилирования), состоящее из со-

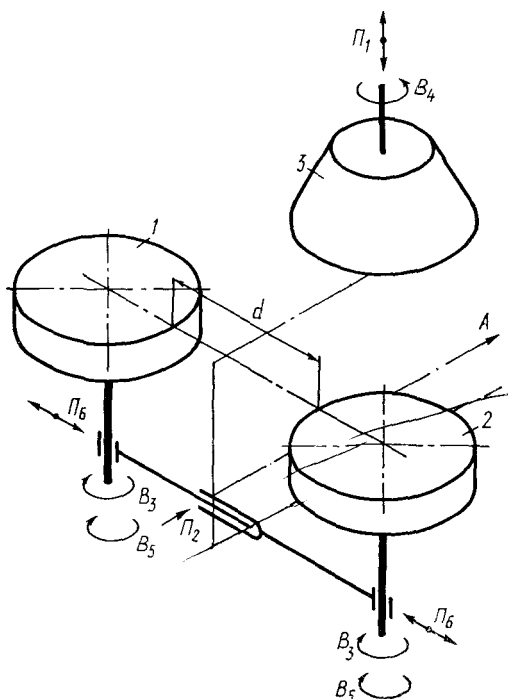


Рис. 2.6. Способ одновременной обработки двух зубчатых колес одним долбяком

гласованных вращения B_4 долбяка и вращения B_5 заготовки в одну сторону. Это продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто врезание долбяка на высоту нарезаемых зубьев. После чего движение врезания прекращается и на втором этапе в течение полного оборота заготовок 1 и 2 профилируются зубья движением обката. На обоих этапах обработки заготовкам сообщаются движения «отскока» Π_6 , синхронизированные с движением Π_1 долбяка 3 для устранения зати-

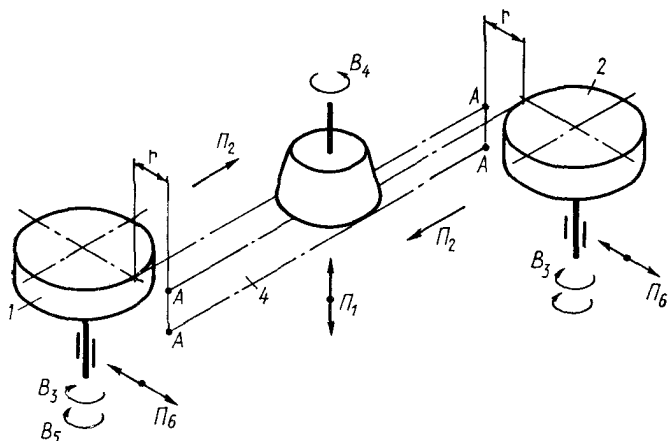


Рис. 2.7. Способ долбления двух зубчатых колес при встречном движении врезания

рания долбяка по вершинным режущим кромкам при холостом ходе.

Характерная особенность рассмотренной схемы – неодинаковые условия резания на этапе врезания на обеих заготовках из-за различных суммарных скоростей подачи. Однако это не оказывает принципиального значения на качество получаемых зубчатых колес, так как на этапе профилирования условия резания на обеих заготовках одинаковы.

Указанный недостаток устранен в следующем способе зубодолбления (рис. 2.7) [5]. Заготовки 1 и 2 устанавливаются с противоположных сторон долбяка 3 на расстоянии r от плоскости 4 движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка. При обработке долбяку 3 сообщают поступательно-возвратное движение Π_1 скорости резания. На этапе касательного врезания заготов-

кам 1 и 2 сообщаются движения Π_2 навстречу друг другу и одновременно вращательные движения B_3 , согласованные с движениями врезания Π_2 . Этап врезания продолжается до тех пор, пока ось долбяка и линии $A-A$ не совместятся, что соответствует врезанию на высоту зуба. Затем движения Π_2 и B_3 прекращаются, и на втором этапе долбяку и заготовкам сообщают движения обката (профилирования), состоящие из вращения B_4 долбяка, согласованного с вращениями B_5 заготовок в ту же сторону, что и при врезании. На обоих этапах заготовки 1 и 2 совершают также движение «отскок» Π_6 в направлении, перпендикулярном плоскости врезания.

Коэффициент сложности способа зубодолбления, приведенного на рис. 2.6, равен 15, а на рис. 2.7 – 18. Вместе с тем за счет иной ориентации заготовок (или базирующих подсистем) относительно долбяка эти способы позволяют теоретически удвоить производительность. Таким образом, иные связи между двумя равномошными составляющими базирующей подсистемы между собой и кинематической подсистемой обеспечивают достижение иной частной целевой функции. При этом по рис. 2.7 обеспечивается по сравнению с рис. 2.6 дополнительная частная целевая функция – создание одинаковых условий резания для обеих заготовок.

Для всех способов зубодолбления с радиальным врезанием путь врезания превышает на величину безударного перебега высоту зуба нарезаемого колеса. При зубодолблении с касательным врезанием он существенно возрастает, и его величина без учета безударного перебега определяется по формуле [17]

$$h = m \sqrt{2(z_1 + z_u) + 4},$$

где h – путь врезания, мм; m – модуль, мм; z_1, z_u – 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 целевая функция: уменьшение машинного времени врезания. Рассмотрим возможные пути достижения данной целевой функции. По сложившейся традиции врезание осуществляется одновременно с обкатом. Причем радиальную подачу

врезания устанавливаются равной 0,1–0,3 значения круговой подачи. Следовательно, процесс зубодолбления на этапе врезания производится при суммарной подаче, векторное 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 перехода к варианту последова-

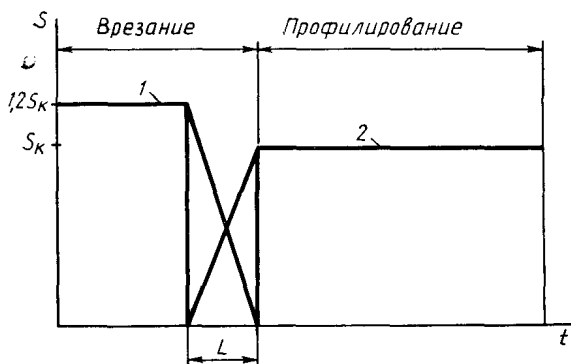


Рис. 2.8. Правило выполнения подач при зубодолблении с касательным врезанием

тельного выполнения врезания и обката, установив значение подачи врезания, равное суммарной подаче, например среднее ее значение, составляющее 1,2 значения круговой подачи.

Другой вариант уменьшения времени врезания показан на рис. 2.8. Врезание на протяжении $2/3$ – $3/4$ пути осуществляется с подачей 1 , составляющей 1,2 значения круговой подачи s_k . Затем на участке L подача врезания регрессивно уменьшается, а круговая подача 2 прогрессивно возрастает так, что суммарная подача сохраняется постоянной. К моменту окончания врезания круговая подача увеличивается до значения s_k , а подача касательного врезания уменьшается до нулевого значения.

Рассмотренные варианты уменьшения времени касательного врезания рационально использовать также и при зубодолблении по роторной схеме (см. рис. 1.4).

2.4. Многообразие способов зубодолбления как частная развивающаяся система

Способы формообразующей обработки (s -системы) составляют три больших непрерывно пополняющихся класса [20], различающихся между собой по виду 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, и третий – s -системы, основанные на перераспределении вещества заготовки. Вместе с тем в основе любой s -системы независимо от ее принадлежности к одному из названных классов лежат первичные факторы физического воздействия на твердое тело.

Способы зубодолбления основаны на использовании механического воздействия (механическое резание) на твердое тело (заготовку) и относятся к первому классу.

Из определения понятия способа формообразующей обработки следует, что все известные и возможные новые способы обработки различны. Причем мера их различимости даже в пределах конкретного частного многообразия, полученного из одного и того же первообразного способа посредством соответствующих изменений приемов, их последовательностей и правил выполнения, будет также различна.

При обсуждении методики системного анализа способов формообразующей обработки было показано, что любая s -система на первом уровне разбиения может быть представлена в виде объединения трех подсистем: кинематической, базирующей и энергетической. В [20] при анализе способов формообразующей обработки, использующих различные виды энергетического воздействия, отмечено, что энергетическая подсистема является основным подмножеством s -систем. Отсюда первый наиболее общий уровень различимости способов формообразующей обработки по виду физического воздействия на твердое тело заготовки. Следовательно, анализируемый процесс – обкатное зубодолбление – выделен как частное многообразие способов формообразующей обработки из общего многообразия, объединяющего известные и возможные новые процессы на первом уровне различимости.

В пределах одного и того же вида физического воздействия посредством кинематической подсистемы воспроизво-

дится поверхность заданной формы. Поверхность конкретной геометрической формы может быть получена различными по структуре кинематическими подсистемами, что связано с большим разнообразием характеристических образов инструментов, 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 связанного с ним класса или подкласса геометрического воспроизведения поверхности. Это можно подтвердить следующим примером. Цилиндрическое зубчатое колесо с наружным венцом можно нарезать не только зуборезным долбяком, но и зуборезной гребенкой, червячной фрезой, модульной дисковой или пальцевой фрезой, копирующей зуборезной (долбежной) головкой, фасонным (модульным) резцом, обкатной резцовой головкой (зуботочение). Каждому виду зуборезных инструментов, наделенных собственным характеристическим образом, соответствует частное многообразие способов обработки. Причем все многообразия, включая анализируемый процесс, имеют общую первообразную целевую функцию – получение зубчатого венца на заготовке. Однако каждое из многообразий может быть выделено из их совокупности, т. е. большой развивающейся системы (надсистемы) по характеристическому образу инструмента и классу воспроизведения зубчатой поверхности для конкретного системного анализа. Именно по характеристическому образу инструмента и связанного с ним класса воспроизведения поверхности выделен процесс обкатного зубодолбления как частная развивающаяся система из надсистемы, объединяющей все известные и возможные новые процессы зубообработки.

По сложившейся традиции описание любого способа формообразующей обработки поясняется схемой взаимодействия инструмента и заготовки. Как правило, она иллюстрирует принцип получения геометрической формы поверхности и исходной ориентации заготовки относительно инструмента, т. е. кинематическую и базирующую подсистемы. Таким образом, следующий уровень различимости способов формообразующей обработки в пределах частного развивающегося многообразия определяется схемой взаимодействия

инструмента и заготовки. Рассмотренные примеры подтверждают вышесказанное.

Последующие уровни различимости характеризуются совокупностью приемов, последовательностью выполнения отдельных приемов и правил их выполнения в пределах конкретной схемы взаимодействия инструмента и заготовки.

При обсуждении известных способов обкатного зубодолбления рассмотрены только те, для реализации которых

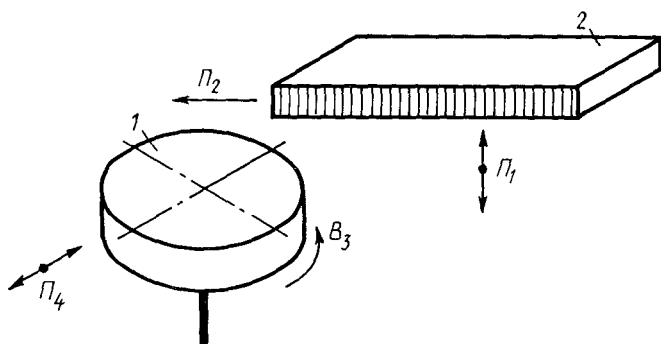


Рис. 2.9. Способ обработки зубчатого колеса длинной зуборезной гребенкой

используются стандартные зуборезные долбяки. Кроме того, для этого процесса характерно также применение зуборезных гребенок. Известны два основных (базовых) способа, различающихся прежде всего по характеристике ограничения, накладываемого на мощность характеристического образа.

На рис. 2.9 показана схема долбления зубчатого колеса 1 зуборезной гребенкой 2 при условии, что число зубьев гребенки больше числа зубьев нарезаемого колеса. В этом случае характеристический образ инструмента имеет вид

$$P = \{M_g\}_k, \quad (k \geq z),$$

где z – число зубьев нарезаемого колеса.

При долблении образующая (прямая, параллельная оси заготовки) воспроизводится поступательно-возвратным движением Π_1 гребенки, а направляющая (линия, очерчивающая профиль зубьев колеса) – движением обката $\Pi_2 \equiv B_3$, воспро-

изводящим речное зацепление. Заготовке или гребенке сообщается также движение Π_4 «отскока» при холостом ходе. Структура и функция кинематической подсистемы способа описываются множествами

$$\begin{aligned} {}^k M (\bar{J} \cup E)_{H^c} \cup (J \equiv J \cup E)_{H^k} \cup (\bar{J} \cup E)_{B_c}, \\ {}^k F = \{ \{ M_{\vartheta} \}_{k \geq 2}, \quad H^c - H^k, \quad \{ \Phi_v (\bar{\Pi}_1), \\ \Phi_s (\Pi_2 \equiv B_3), \quad \underline{\|} B_c (\bar{\Pi}_k) \} \}. \end{aligned}$$

Критерий сложности кинематической подсистемы равен 7, а общий критерий сложности способа – 10.

Данный способ используется главным образом в станках швейцарской фирмы «Мааг» для обработки мелко- и среднемодульных зубчатых колес с небольшим числом зубьев. Среди способов обкатного зубодолбления он наиболее прост, а его ограниченное использование объясняется большей трудоемкостью изготовления длинной гребенки по сравнению с долбяком.

На основе описанного способа создан способ (рис. 2.10), позволяющий обрабатывать крупномодульные зубчатые колеса 1 с большим числом зубьев короткой гребенкой 2 с малым числом зубьев. Характеристический образ короткой гребенки

$$P = \{ M_{\vartheta} \}_k, \quad (k \ll z).$$

На тяжелых зубообрабатывающих станках используются гребенки, у которых $k = 3$. Гребенке дополнительно сообщают движение деления Π_5 на один зуб, что усложняет кинематическую структуру способа на механику одного движения. В итоге сложность кинематической подсистемы способа возрастает до сложности первообразного способа зубодолбления (см. рис. 1.1), т. е. до 9. Это обеспечивает возможность нарезания короткой гребенкой зубчатых колес с любым числом зубьев, что можно рассматривать в качестве частной целевой функции.

Процесс резания и характер стружкообразования при использовании зуборезных гребенок существенно не отличаются от аналогичного процесса при использовании долбяков. Поэтому рассмотренные при анализе способов долбления колес зуборезными долбяками факторы, отрицательно

влияющие на размерную стойкость инструмента, в полной мере относятся и к зубообработке гребенками. Вместе с тем обработка зуборезными гребенками менее универсальна.

Таким образом, совокупность известных способов, составляющих процесс зубодолбления, как целенаправленных s -систем, объединенных общей первообразной целевой функцией, представляет собой частную развивающуюся сис-

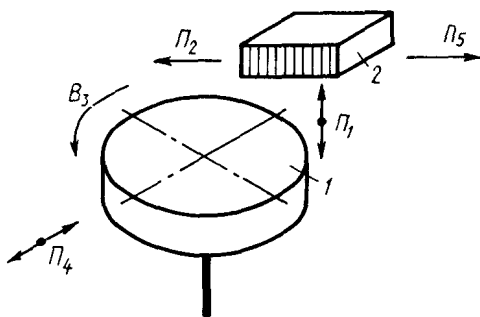


Рис. 2.10. Способ обработки зубчатого колеса короткой (трехзубой) гребенкой

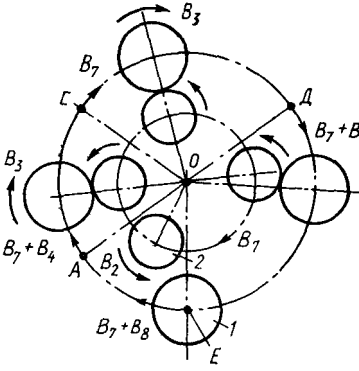
тему или надсистему по отношению к составляющим ее s -системам. При этом функционирование каждого способа, созданного для достижения конкретной частной целевой функции, однозначно задается ее структурой. Из системного анализа известного многообразия способов обкатного зубодолбления также следует, что различимость способов между собой может быть значительной на уровне структуры. Однако большая часть способов различается на уровне изменения последовательностей приемов (структурных элементов) и правил их выполнения.

Результаты системного анализа известных способов зубодолбления приведены в табл. 2.1. В пределах единственного вида используемой энергии и единого характеристического образа в качестве базовых приняты способы, различающиеся на уровне схемы взаимодействия долбяка и заготовки, объединяющей все три подсистемы, образующие конкретный способ. Для каждой схемы указаны общее количество способов зубодолбления, различающихся между собой на последующих уровнях, и предельные для данной схемы критерии сложности кинематической подсистемы.

Таблица 2.1. Классификация способов зубодолбления

Номер рису- нка	базовая схема	Кол-во S- систем	Критерий C_K	
			min	max
1	2	3	4	5
2.9		2	7	9
1.1		14	9	11
1.3		5	10	12

1	2	3	4	5
2.5		5	13	15
2.6		5	15	17
2.7		5	18	20

1	2	3	4	5
1.4		4	12n	

Для роторного зубодолбления этот критерий составляет $12n$, где n – количество одновременно взаимодействующих пар долбяк–заготовка.

При определении общего количества способов зубодолбления, объединяемых общей схемой, учитывались только те способы, которые являются производными от данной конкретной схемы или от базовой, положенной в ее основу. Поэтому действительное количество способов зубодолбления значительно больше. Это объясняется тем, что рассмотренные в параграфе 1.1 факторы, отрицательно влияющие на размерную стойкость долбяка, также характерны и для способов зубодолбления с касательным врезанием, а их устранение в этой группе способов увеличивает общее количество способов зубодолбления, образующих процесс обработки зубчатых колес.

Глава 3

МЕТАЛЛОРЕЖУЩИЙ СТАНОК КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

3.1. Структурная схема базового зубодолбежного станка с механическими связями

В основу любого металлорежущего станка, предназначенного для получения деталей заданной геометрической формы и размеров с требуемыми физико-механическими свойствами, положен вполне определенный способ или группа способов формообразующей обработки, различающихся главным образом только последовательностью и правилами выполнения отдельных приемов. Выбор конкретных способов формообразующей обработки для материализации их в конструкциях конкретных металлорежущих станков осуществляется с помощью техникоэкономических расчетов.

Металлорежущий станок обеспечивает качественное изменение объекта производства – заготовки. В этом заключаются целостность станка как целесообразно организованной машины и его функция. Структура станка состоит из целесообразно организованных объектов: блоков, узлов, механизмов, источников энергии, блоков управления. На наиболее общем уровне организации металлорежущий станок можно рассматривать как целесообразное объединение кинематической структуры, системы управления и компоновки. Однако первичной, т. е. основной базой металлорежущего станка, является кинематическая структура, так как назначение такой технологической машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на заготовке. Развитость кинематической структуры конкретного станка или группы станков, объединенных общей первообразной целевой функцией, совпадающей с целевой функцией соответствующего первообразного способа формообразующей обработки, зависит в первую очередь от количества источников энергии. Сове-

менная тенденция – использование в каждой кинематической группе отдельного двигателя, что обеспечивает сокращение количества передач в кинематических цепях и, как следствие, повышение кинематической точности. Применение отдельных приводов обусловлено также использованием вместо механических связей между исполнительными органами электронных. Последнее характерно для станков с числовым программным управлением.

В конструкциях металлорежущих станков кинематическая структура выражается кинематической схемой, для которой свойствен подробный показ элементов и механизмов, в том числе типовых, составляющих структуру кинематических цепей общей кинематической схемы станка. Однако на начальном этапе разработки кинематической структуры и при изучении конкретной группы станков, объединенных общей первообразной целевой функцией, более рационально заменить кинематическую схему структурной. Для этого достаточно последовательности типовых механизмов, например зубчатых и других передач, гитар сменных зубчатых колес и т. п., без ущерба для раскрытия сущности станка обобщить простейшими конструктивными признаками.

На первом начальном уровне обсуждения кинематическая структура относительно выделена из общей структуры станка, т. е. из целесообразно организованной технической системы. Дополнительно это объясняется тем, что при одной и той же кинематической структуре возможно использование различных систем управления.

На рис. 3.1 приведена структурная схема базового зубодолбежного станка с механическими связями, реализующая пионерный способ зубодолбления (см. рис. 1.1). Описание схемы выполнено в соответствии с наиболее целостной концепцией теории кинематики металлорежущих станков [37].

Кинематическая структура станка содержит следующие кинематические группы: скорости резания $\Phi_v (\bar{\Pi}_1)$, движения обката $\Phi_s (B_2 \equiv B_3)$, врезания $Bp (\Pi_4)$ и радиального «отскока» $Bc (\bar{\Pi}_5)$. Объединение их в общую структуру выполнено по схеме с общим электродвигателем.

Группа скорости резания $\Phi_v (\Pi_1)$ включает внутреннюю связь – элементарную поступательную кинематическую па-

ру, образованную гильзой 1 и корпусом 2 суппорта станка, и внешней связью

$$M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow \bar{\Pi}_1,$$

представляющую собой кинематическую цепь, передающую энергию от электродвигателя M к приводному валу 5, вращательное движение которого преобразуется в поступательно-возвратное движение $\bar{\Pi}_1$ гильзы 1 шпинделя 7 долбяка.

Движение $\bar{\Pi}_1$ имеет прямолинейную незамкнутую траекторию. Поэтому группа $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ настраивается только на три параметра: скорость резания – органом настройки i_v , путь и

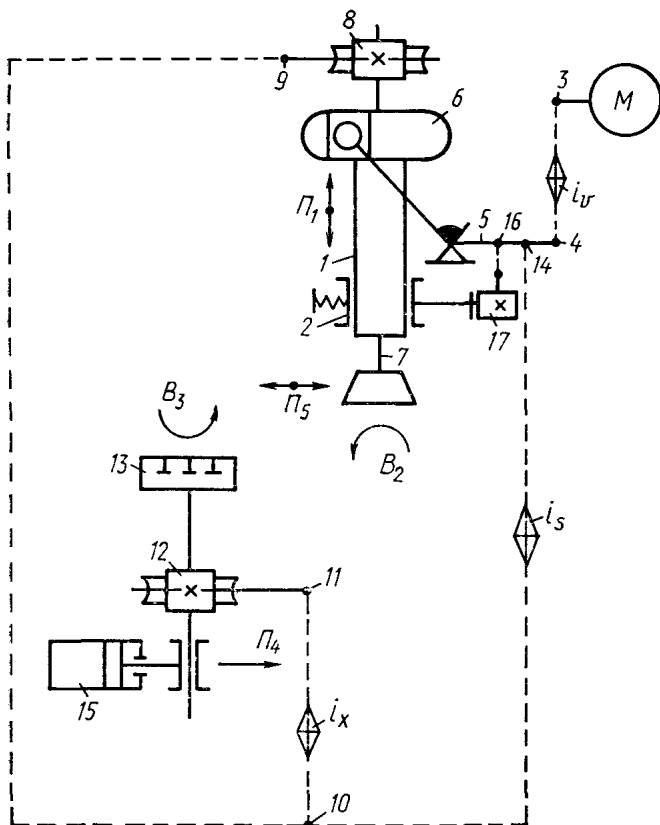


Рис. 3.1. Кинематическая структура базового зубодолбежного станка

исходную точку – изменением плеч рычагов кулисного механизма б.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ состоит из развитой внутренней связи (цепь обката) $B_2 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow i_x \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow B_3$, кинематически связывающей шпindelь 7 с делительным столом 13, предназначенным для установки заготовки. Связь содержит орган настройки i_x на траекторию движения $B_2 \equiv B_3$. Внешняя связь группы $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 10$ передает энергию движения от электродвигателя через звено соединения связей 10 во внутреннюю связь.

Движение обката $B_2 \equiv B_3$ имеет замкнутую траекторию и настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на скорость (круговую подачу) – органом i_s , на направление – реверсом, совмещенным с органом настройки i_s .

Группа врезания $Vp(\bar{\Pi}_4)$ включает внутреннюю связь – элементарную поступательную кинематическую пару, образованную корпусом делительного стола и направляющими станка, и внешнюю связь, передающую энергию движения во внутреннюю связь от гидроцилиндра 15, перемещающего стол в направлении радиального врезания $\bar{\Pi}_4$. Эта группа настраивается на скорость врезания регулируемым дросселем гидропривода станка, а на исходную точку – путевыми упорами.

Вспомогательная группа радиального «отскока» $Vc(\bar{\Pi}_5)$ состоит из внутренней связи (элементарной поступательной кинематической пары), образованной корпусом суппорта и направляющими станка, и внешней связи $M \rightarrow 3 \rightarrow i_v \rightarrow 4 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow \bar{\Pi}_5$, сообщающей движение кулачку 17, отводящему инструментальный суппорт от делительного стола (заготовки) при свободном ходе.

Формулы настройки (ΦH) для органов настройки i_v , i_x , i_s выводятся по общепринятой методике [37]. В качестве органа настройки i_v используются коробка скоростей, гитара сменных зубчатых колес, сменные шкивы, как правило, совместно с многоскоростным асинхронным электродвигателем. Органом настройки i_s служит коробка скоростей или гитара сменных зубчатых колес. В ряде зубодолбежных станков в группе $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ применяется отдельный электродвигатель. В этом случае передача 14 отсоединяется от приводного вала 5 и соединяется с валом электродвигателя. Для такого варианта более рационально функцию органа настрой-

ки i_s передать электродвигателю, т. е. применить в данной группе регулируемый электродвигатель.

3.2. Структурная схема зубодолбежного станка с электронными связями

В рассмотренном базовом варианте зубодолбежного станка механические связи между исполнительными органами можно заменить электронными. Соответствующая структура приведена на рис. 3.2, где в качестве аналога цепи обката используется система отслеживающей синхронизации, выполненная по схеме задающая – ведомая координаты [33]. В анализируемой схеме группы $\Phi_v(\bar{П}_1)$, $Vp(\Pi_4)$, $Vc(\bar{П}_5)$ аналогичны таким же группам предшествующей схемы.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ включает управляемые электродвигатели M_2 и M_3 , кинематически связанные через червячные передачи соответственно 1 и 2 со шпинделем 3 долбяка и делительным столом 4. Шпиндель 3 является задающей координатой группы. Поэтому электродвигатель M_2 этой координаты получает энергию от задатчика 5 через усилитель мощности (УМ) 6 (тиристорный преобразователь). На шпинделе 3 и делительном столе 4 установлены импульсные измерительные преобразователи (ИИП) 7 и 8, например фотоэлектрические. Эти преобразователи соединены с входами счетчиков (С) 9 и 10. К ним подключены блоки 11 и 12 установки передаточных отношений (ПО). Каждая пара С – блок ПО представляет собой регулируемый делитель частоты. Выход С 9 соединен с первым входом фазового дискриминатора (ФД) 13 и блоком круговой подачи (преобразователь частота – напряжение) (КП) 14 делительного стола, выход блока КП 14 – с первым входом суммирующего усилителя (СУ) 15, соединенного своим выходом через УМ 16 с электродвигателем M_3 ведомой координаты – делительного стола 4. Выход С 10 соединен с вторым входом ФД 13, выход которого через импульсно-аналоговый преобразователь (ИАП) 17 соединен со вторым входом СУ 15.

Система отслеживающей синхронизации – аналог цепи обката – работает следующим образом. При включении электродвигателя M_2 задающей координаты шпиндель 3 получает

вращение B_2 с заданной круговой подачей. Одновременно ИИП 7 начинает вырабатывать импульсный сигнал, пропорциональный круговой подаче шпинделя. После деления в С 9 в соответствии с коэффициентом деления, являющимся аналогом передаточного отношения гитары i_x цепи деления, установленном на блоке ПО 11, он поступает на блок КП 14. На выходе этого блока образуется аналоговый сигнал, пропорциональный частоте входного сигнала. Этот сигнал после

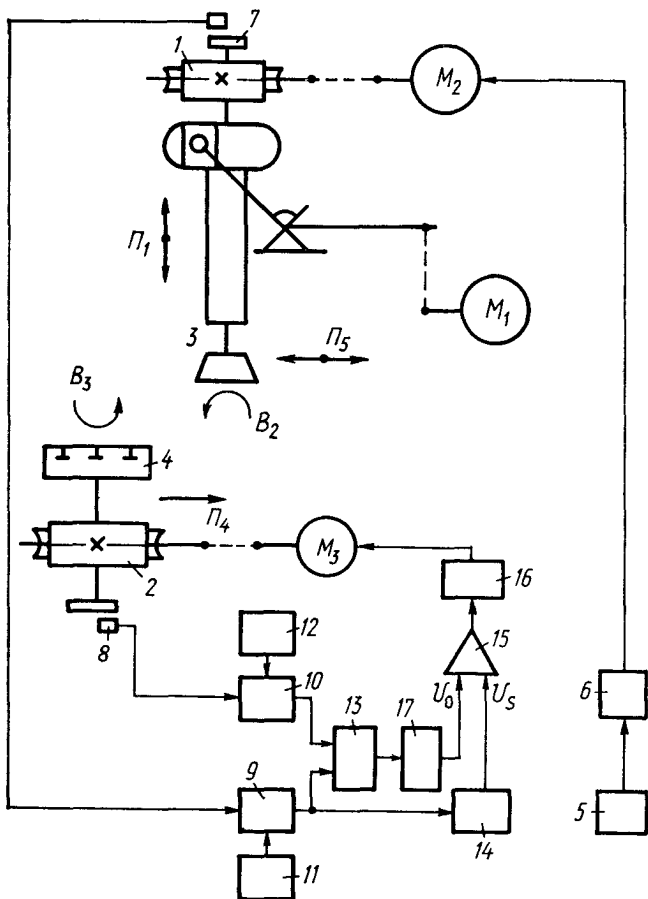
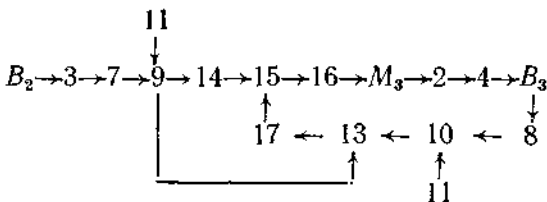


Рис. 3.2. Кинематическая структура зубодолбежного станка с электронной системой синхронизации

прохождения СУ 15 и усиления по мощности в УМ 16 сообщается электродвигателю M_3 , который сообщает через червячную передачу 2 вращательное движение B_3 делительному столу 4. В итоге ведомая координата – делительный стол 4 – будет отслеживать движение задающей координаты – шпинделя 3 долбяка. Функциональная связь такого типа вместо механической цепи обката в работе [37] названа электрическим валом.

Девиация механики ведомой координаты устраняется следующим образом. ИИП 8 непрерывно вырабатывает импульсный сигнал, пропорциональный действительной круговой подаче движения B_3 . Этот сигнал после деления в С 10 в соответствии с коэффициентом деления, заданным на блоке ПО 12, поступает на второй вход ФД 13, на первом входе которого действует сигнал с выхода С 9. В ФД 13 происходит сравнение двух сигналов: заданного и действительного. В результате на выходе ФД 13 образуется сигнал ошибки U_o , который после преобразования в ИАП 17 в аналоговую форму поступает на второй вход СУ 15 для коррекции заданного сигнала U_s .

Внутреннюю связь группы обката $\Phi_3(B_2 \equiv B_3)$ для данной схемы можно записать по аналогии с такой связью, состоящей из механических передач, в следующем виде:



Внешняя связь группы $M_2 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ передает энергию движения от электродвигателя M_2 во внутреннюю связь через звено соединения связей, функцию которого выполняет шпиндель 3.

Движение обката $B_2 \equiv B_3$ настраивается на траекторию блоком ПО 11, на скорость – задатчиком 5, определяющим круговую подачу задающей координаты, на направление – электрическим реверсом, совмещенным с УМ 6. Следует отметить, что блок ПО 12 не является органом настройки на траекторию. Его непосредственная функция – стабилизация траектории движения обката.

Теория кинематической структуры металлорежущих станков [37] была разработана для станков с механическими связями. Вместе с тем, как следует из приведенных выше примеров, она может без изменений применяться также и для анализа станков с электронными связями. Таким образом, данная теория имеет всеобщий характер и, следовательно, приемлема для станковедения как науки о металлорежущих станках. Необходимо отметить, что в основу теории положен системный принцип.

Системный подход на основе наиболее общих принципов наблюдается также в теории компоновки металлорежущих станков. По мнению автора, наиболее последовательно этот подход сформулирован в работе [16]. Причем теоретическая концепция, изложенная в данной работе, непосредственно опирается на теорию кинематической структуры металлорежущих станков.

Наибольшее количество литературы посвящено третьей составляющей металлорежущего станка – системе управления. Однако, по нашему мнению, единая теоретическая концепция, имеющая всеобщий характер, еще не сформулирована.

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ С РАДИАЛЬНЫМ ВРЕЗАНИЕМ

4.1. Кинематическая структура станков, изменяющих характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка

При обсуждении особенностей характера стружки, срезаемой при зубодолблении, было показано, что с точки зрения максимизации периода размерной стойкости долбяка необходимо создание условий резания, обеспечивающих профилирование зубчатого колеса либо вдоль одной боковой стороны зубьев, либо вдоль обеих боковых сторон, но при одинаковой толщине стружки, срезаемой обеими боковыми сторонами. При однопроходной обработке резание вдоль одной боковой стороны осуществимо только при использовании долбяка с зауженными по делительной окружности зубьями. Соответствующая частная кинематическая структура зубодолбежного станка также возможна. Однако практическая реализация такого станка вызывает сомнение. Это объясняется тем, что долбяку необходимо сообщить вращательно-возвратное движение с частотой, равной частоте двойных ходов долбяка, что будет приводить к интенсивному износу делительной пары шпинделя и, как следствие, к снижению технологической надежности станка и точности обработки.

Нормальными долбяками оба вида профилирования зубьев могут осуществляться только при многопроходной обработке, начиная со второго прохода. Причем дополнительное угловое смещение долбяка перед очередным проходом может быть включено сигналом от реле времени или сигналом, формируемым за счет активного контроля за моментом силы резания на этапах врезания. Соответствующая структурная схема станка приведена на рис. 4.1 [10].

Кинематическая структура станка содержит следующие кинематические группы: скорости резания $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$, обката

$\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$, врезания $B_p(\Pi_4)$, «отскока» $Bc(\bar{\Pi}_5)$. Группы $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ и $Bc(\bar{\Pi}_5)$ аналогичны таким же группам станка, схема которого дана на рис. 3.1. Поэтому их не рассматриваем.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ выполнена на базе аналогичной группы станка, показанного на рис. 3.2. На исполнительных

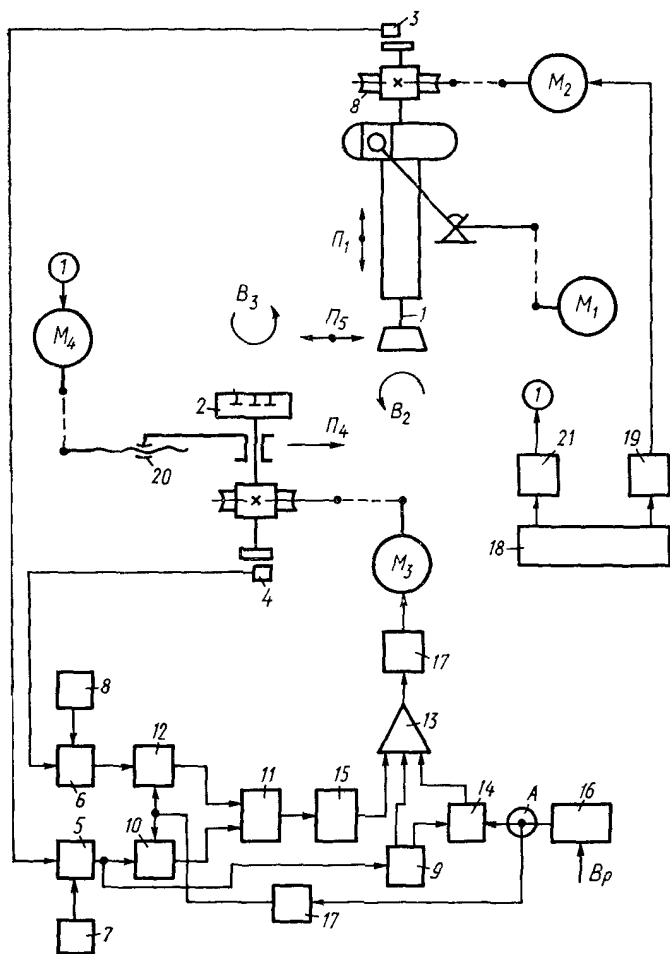


Рис. 4.1. Структурная схема функциональных связей станка для многопроходного зубодобления

органах станка шпинделе 1 и делительном столе 2 установлены фотоэлектрические ИИП соответственно 3 и 4, обеспечивающие связь механики станка с электрической схемой, отслеживающей синхронизации внутренней связи. ИИП 3, 4 соединены с входами счетчиков 5, 6, к которым подключены блоки ПО 7 и 8. Выход С 5 соединен с входом блока КП 9 и через элемент И 10 с первым входом ФД 11, со вторым входом которого соединен выход С 6 через элемент И 12. Первый выход блока КП 9 соединен с первым входом СУ 13, второй выход – со вторым входом СУ 13 через элемент И 14. Третий вход СУ 13 соединен с выходом ФД 11 через ИАП 15. Управляющие входы элементов И 10, 12 соединены с выходом реле времени (РВ) 16 через элемент НЕ 17, а управляющий вход элемента И 14 – непосредственно с РВ 16. Выход СУ 13 соединен через УМ 17 с электродвигателем M_3 привода ведомой координаты – делительного стола 2. Внешняя связь группы $\Phi_3(B_2 \equiv B_3) M_2 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ передает энергию движения от электродвигателя M_2 во внутреннюю связь через звено соединения связей шпиндель 1.

Движение $B_2 \equiv B_3$ настраивается на траекторию блоком ПО 7, на скорость – блоком задатчиков 18, соединенным через УМ 19 с электродвигателем M_2 задающей координаты.

Группа врезания $Vp(P_4)$ включает внутреннюю связь – элементарную поступательную кинематическую пару корпус делительного стола – направляющие станка и внешнюю связь, передающую энергию от электродвигателя M_4 через передачу вин-гайка 20 подвижному звену внутренней связи. Движение врезания на скорость настраивается блоком задатчиков 18, соединенным через УМ 21 с электродвигателем M_4 .

При наладке станка время, в течение которого на каждом этапе врезания, кроме первого, происходит дополнительный поворот делительного стола для обеспечения резания вдоль одной боковой режущей кромки, например выходной, устанавливается на РВ 16.

Схема работает следующим образом. При включении электродвигателя M_1 получает поступательно-возвратное движение \bar{P}_1 шпиндель 1 долбяка. Затем после ускоренного перемещения делительного стола 2 в исходную для обработки точку по циклу электродвигатель M_4 переключается на подачу врезания в движение P_4 на часть высоты зуба, соот-

ветствующую величине врезания на первом черновом проходе, и одновременно включается электродвигатель M_2 задающей координаты, сообщающий движение B_2 шпинделю 1 с рабочей круговой подачей. Одновременно включается схема синхронизации функционально связанных приводов цепи обката.

ИИП 3 вырабатывает высокочастотный сигнал, пропорциональный круговой подаче B_2 , который поступает в счетчик 5 , где происходит деление в соответствии с коэффициентом, установленным на блоке 7 . Сигнал с выхода C 5 запускает блок КП 9 . Этот блок вырабатывает аналоговый сигнал, который после прохождения усилителей 13 и 17 приводит во вращение электродвигатель M_3 ведомой координаты – делительного стола 2 (движение B_3). В результате делительный стол 2 будет отслеживать движение шпинделя 1 . Одновременно происходит устранение девиации механических передач делительного стола, что обеспечивает точность функциональной связи движения обката $B_2 \equiv B_3$. ИИП 4 вырабатывает импульсный сигнал, пропорциональный действительной круговой подаче делительного стола 2 . Этот сигнал после деления в C 6 в соответствии с коэффициентом деления, заданным на блоке 8 , поступает через открытый по второму входу сигналом с элемента НЕ 17 элемент И 12 на второй вход ФД 11 . Одновременно на первый вход ФД 11 поступает сигнал с выхода C 5 через открытый по второму входу сигналом с элемента НЕ 17 элемент И 10 . В ФД 11 происходит сравнение задающего и действительного сигналов – аналогов движения B_3 делительного стола. В итоге на выходе ФД 11 образуется корректирующий сигнал, поступающий через ИАП 15 на третий вход СУ 13 для коррекции задающего сигнала, поступающего с блока КП 9 .

После врезания на заданную часть высоты зуба движение врезания $П_4$ прекращается и в течение одного оборота делительного стола 2 осуществляется первый черновой проход обработки. После его завершения при продолжающемся обкате включается движение врезания $П_4$ для врезания долбяка на вторую часть припуска. Одновременно включается РВ 16 . Вырабатываемый РВ 16 сигнал выдержки времени поступает на второй вход элемента И 14 и открывает его для прохождения сигнала от блока КП 9 на третий вход СУ 13 . Одновременно сигнал выдержки времени через элемент НЕ 17 закрывает элементы И 10 , 12 . В итоге сигнал коррекции на СУ 13

не поступает. Одновременно в этом усилителе происходит сложение двух сигналов, поступающих на второй и третий входы от блока КП 9, и делительный стол 2 дополнительно поворачивается, опережая шпиндель долбяка на угловой шаг так, что срезание припуска на последующем проходе будет осуществляться вдоль выходных или входных боковых режущих кромок зубьев долбяка.

После отработки установленной выдержки РВ 16 отключается, закрывает элемент И 14 и открывает через элемент НЕ 17 элементы И 10, 12. В результате схема синхронизации приводов перестраивается в исходную структуру, и после прекращения движения врезания $П_4$ в течение полного оборота делительного стола 2 выполняется второй черновой проход посредством движения обката. После его выполнения повторяется цикл врезания для следующего прохода и т. д. Причем перед каждым последующим черновым проходом структура схемы синхронизации приводов перестраивается, обеспечивая угловое смещение делительного стола относительно шпинделя долбяка.

Современные электронные реле времени позволяют устанавливать выдержку в достаточно широком диапазоне. Поэтому данная схема позволяет осуществлять резание на проходе как вдоль какой-то одной боковой режущей кромки, так и при одинаковой толщине стружки вдоль обеих боковых режущих кромок зубьев долбяка.

При рассмотрении способа многопроходного зубодолбления [15] показано, что управлять угловым смещением делительного стола на этапах врезания для обеспечения срезания припуска при одинаковой толщине стружки вдоль обеих боковых режущих кромок можно на основе активного контроля за моментом силы резания на этапах врезания. В этом случае структура функциональных связей станка остается неизменной (см. рис. 4.1), а к ее входу в точке А вместо РВ 16 подключается формирователь сигнала управления угловым смещением (рис. 4.2), который состоит из тензометрического моста, тензорезисторы 1 которого закреплены на тензометрической оправке для установки зуборезных долбяков. Выходы тензометрического моста соединены с входами дифференциального усилителя 2, выход которого подключен к цепи, состоящей из соединенных последовательно ключа 3, интегратора 4, усилителя-ограничителя 5.

При зубодолблении одновременно с включением движения врезания на очередную часть припуска открывается по управляющему входу ключ 3. Тензометрический мост при рабочих ходах долбяка в движении Π_1 регистрирует момент силы резания. Как физическое явление, сопровождающее резание, он представляет собой сумму моментов резания входной и выходной режущих кромок зубьев долбяка. Причем момент резания при обычных условиях зубодолбления имеет большее значение на входной стороне, т. е. знак суммарного момента резания постоянен. Электрический сигнал — аналог момента резания после усиления в дифференциальном усилителе 2 поступает через открытый ключ 3 в интегратор 4, где происходит его преобразование в непрерывный сигнал. После формирования в управляющий потенциал в усилителе-ограничителе 5 этот сигнал поступает на вход A схемы функциональных связей (см. рис. 4.1). Структура схемы перестраивается, и делительный стол 2 получает дополнительное угловое смещение. При неизменной круговой подаче B_2 шпинделя 1 долбяка результирующая круговая подача B_3 делительного стола постепенно увеличивается.

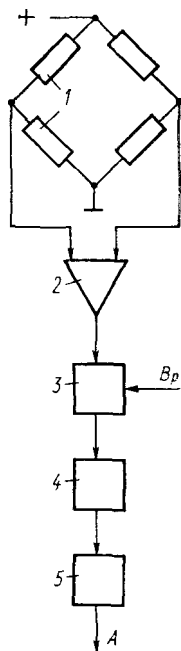


Рис. 4.2. Схема формирования сигнала управления угловым врезанием

Это равнозначно постепенному перераспределению толщины срезаемой стружки в сторону ее увеличения на выходных режущих кромках, что вызывает уменьшение момента резания. При выравнивании толщин стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, момент резания равен нулю, и формирование сигнала управления угловым смещением прекращается. Структура схемы перестраивается в исходное состояние, и после прекращения движения врезания Π_4 осуществляется очередной проход. Затем цикл врезания повторяется для следующего прохода.

Заметим, что в рассмотренной структурной схеме зубодолбежного станка для многопроходного зубодолбления элементы И 10, 12, 14, HE 17, реле времени 16 и формирователь сигнала управления угловым смещением являются блоками системы управления, а не кинематической подсистемы.

При обсуждении способов зубодолбления, изменяющих характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка, было показано, что посредством управления круговой подачей (скоростью обката) можно создать условия резания, при которых возможно срезание постоянной по толщине стружки вдоль боковых режущих кромок. В данном случае обеспечивается тепловая разгрузка боковых

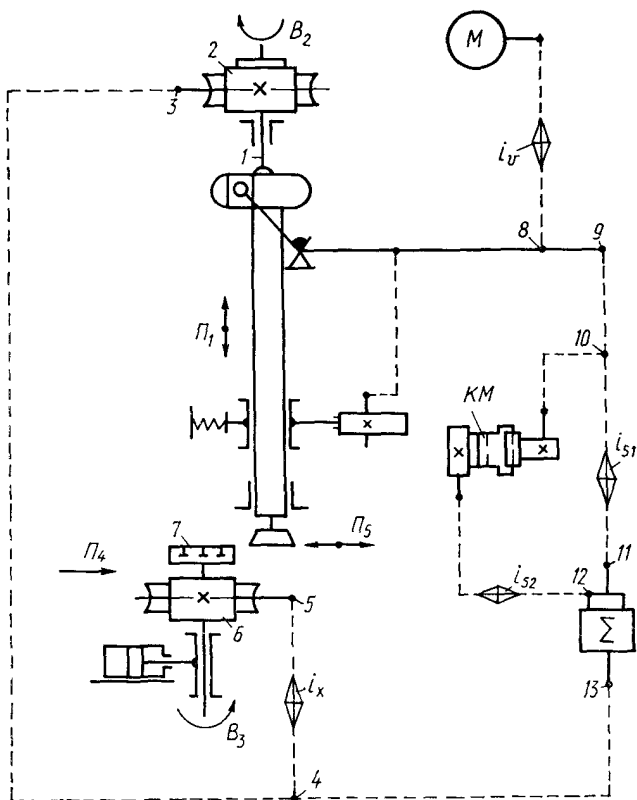


Рис. 4.3. Структурная схема станка с управляемым обкатом

режущих кромок в окрестностях вершины зубьев долбяка. В итоге возрастает размерная стойкость инструмента. При непрерывном управлении движением обката рационально его скорость разделить на две составляющие (постоянную и переменную) и сообщить их в цепь обката параллельно через суммирующий механизм. Кинематическая структурная схема станка приведена на рис. 4.3 [10].

В анализируемом станке группы $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$, $Vp(\Pi_4)$, $Vc(\bar{\Pi}_5)$ аналогичны таким же группам базового варианта станка (см. рис. 3.1). Поэтому их не рассматриваем. Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ включает развитую внутреннюю связь (цепь обката) $B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow B_3$, которая содержит гитару сменных зубчатых колес i_x , обеспечивающую согласование движений B_2 и B_3 шпинделя 1 и делительного стола 7. Внешняя связь группы

$$\begin{array}{ccccccccccc} M \rightarrow i_p \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 & \rightarrow & i_{s1} & \rightarrow & 11 & \rightarrow & \Sigma & \rightarrow & 13 \rightarrow & 4 \\ & & & & & & \uparrow & & & \\ & & \searrow & \text{KM} & \rightarrow & i_{s2} & \rightarrow & 12 & \rightarrow & \uparrow \end{array}$$

сообщает энергию движения от электродвигателя M во внутреннюю связь через звено соединения связей 4 шпинделю 1 долбяка и делительному столу 7. Внешняя связь имеет две параллельные ветви. Одна из них, содержащая орган настройки i_{s1} , сообщает во внутреннюю связь постоянную составляющую скорости обката, а вторая, содержащая кулачковый механизм КМ и орган настройки i_{s2} , – переменную составляющую. На кулачке механизма КМ «записана» переменная составляющая закона управления обкатом в конкретно выбранном масштабе. При этом орган настройки i_{s2} (гитара сменных зубчатых колес) выполняет функцию увеличения масштаба. Обе составляющие складываются суммирующим механизмом Σ внешней связи.

Сравнивая данную схему с базовой, можно заметить, что изменение кинематической структуры станка сводится к модернизации привода круговых подач. В современных зубодолбежных станках с механическими связями и общим для групп формообразования электродвигателем привод круговых подач выполняется в виде коробки подач с гитарой сменных зубчатых колес. На рис. 4.4 приведена кинематическая схема коробки подач рассмотренного зубодолбежного

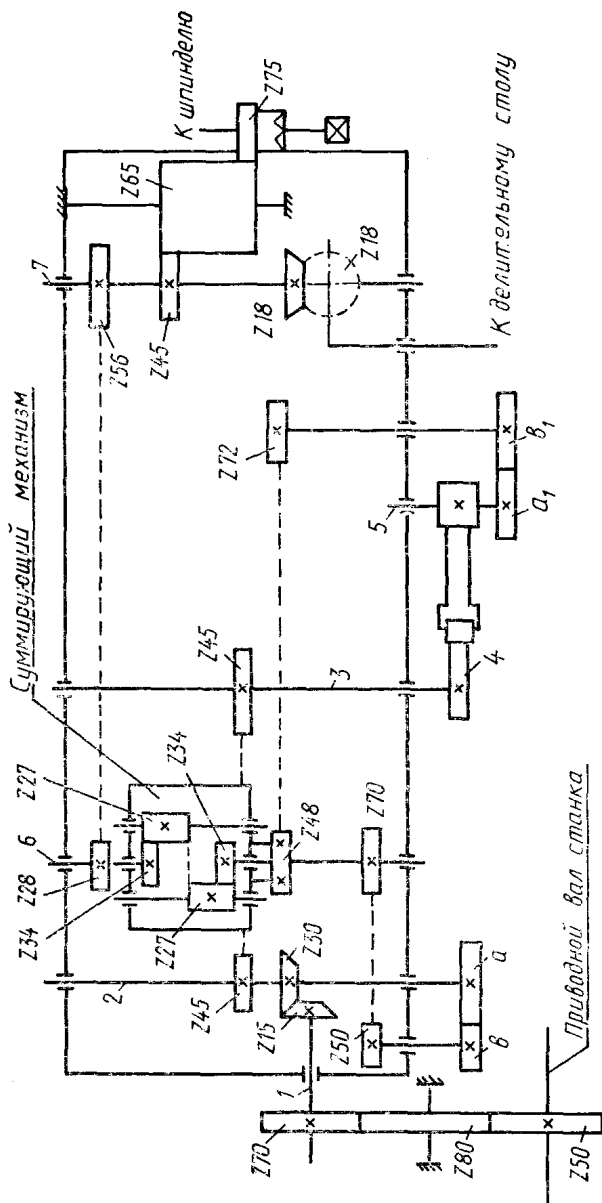


Рис. 4.4. Кинематическая схема привода круговых подач станка с управляемым обкатом

станка, разработанная как вариант модернизации соответствующей коробки базового зубодолбежного станка средних размеров модели 5122.

С приводным валом станка посредством зубчатой передачи $z_{50}/z_{80}/z_{70}$ соединен входной вал 1 коробки круговых подач, а с валом 1 конической зубчатой передачей – вал 2, который через гитару сменных зубчатых колес a/b и передачу z_{50}/z_{70} соединен с валом центрального зубчатого колеса z_{34} суммирующего механизма (первый вход), а через передачу z_{45}/z_{45} – с валом 3. На нем закреплен кулачок 4 механизма, преобразующего постоянное вращательное движение в переменное качательное. Выходной вал 5 кулачкового механизма через гитару сменных зубчатых колес a_1/\bar{b}_1 и передачу z_{72}/z_{48} соединен с корпусом суммирующего механизма (второй вход), а выходной вал 6 суммирующего механизма передачей z_{88}/z_{56} – с валом 7, после которого кинематическая цепь разветвляется. Через передачу $z_{45}/z_{65}/z_{75}$ вал 7 соединен с червячной передачей шпинделя долбяка, а через передачу z_{18}/z_{18} – с червячной передачей делительного стола.

Подробная конструктивная разработка коробки круговых подач показала, что она незначительно увеличивает вертикальный габаритный размер соответствующей коробки станка модели 5122 и нормально вписывается в его вертикальный габарит.

Другой вариант кинематической структуры зубодолбежного станка, реализующего способ зубодолбления с управляемым обкатом, приведен на рис. 4.5 [4]. Данная схема отличается от предшествующей только группой обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$.

Червяки 1 и 2 делительных пар внутренней связи группы обката имеют дополнительную степень подвижности – возможность осевого перемещения. Осевое перемещение червякам 1 и 2 сообщается гидроцилиндрами 3 и 4 соответственно. Рабочие полости гидроцилиндров посредством распределителя расхода 5 и реверсивного золотника 6 соединены с гидростанцией 7. Управление реверсивным золотником осуществляется кулачком 8, на котором «записана» переменная составляющая скорости обката. Делительные пары шпинделя 9 и делительного стола 10 одновременно являются суммирующими механизмами Σ , так как их червяки 1 и 2 имеют по две степени подвижности – вращательную и поступательную.

Поэтому внутренняя связь группы обката состоит из двух параллельных цепей, по одной из которых исполнительным органом (шпинделю 9 и делительному столу 10) сообщается постоянная составляющая движения обката $B_2 \equiv B_3$, а по другой – переменная.

Цепь постоянной составляющей имеет развитую механическую структуру $B_2 \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma 1 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow i_x \rightarrow 13 \rightarrow \Sigma 2 \rightarrow 10 \rightarrow B_3$. Она содержит гитару сменных зубчатых колес i_x , предназначенную для настройки движения обката на траекторию. Внешняя связь $M_2 \rightarrow i_s \rightarrow 12$ сообщает энергию движения от электродвигателя M_2 через звено соединения связей 12 во внутреннюю связь – цепь постоянной составляющей. Эта связь включает гитару сменных зубчатых колес i_s для

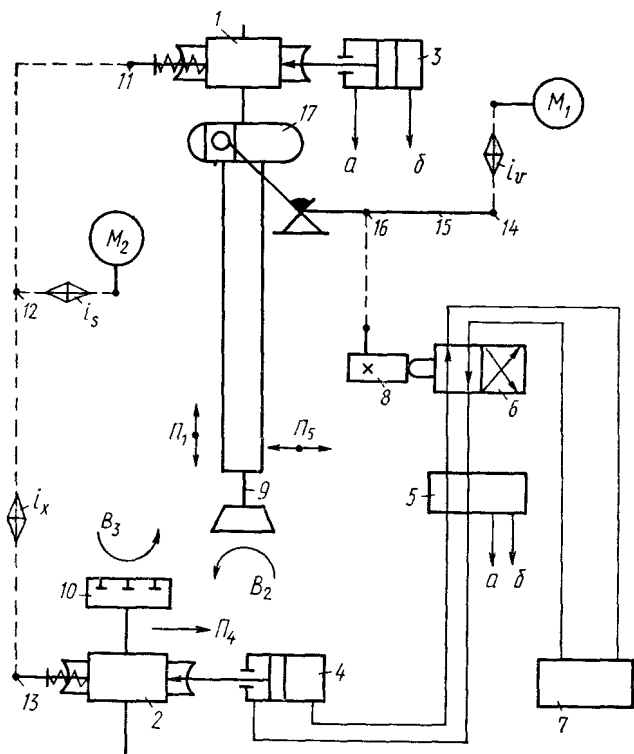
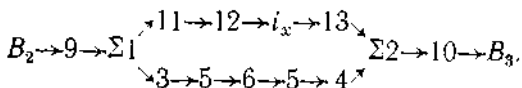


Рис. 4.5. Структурная схема станка с осевым перемещением длительных червяков

настройки движения обката на постоянную составляющую круговой подачи.

Цепь переменной составляющей $B_2 \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma 2 \rightarrow 10 \rightarrow B_3$ содержит два гидроцилиндра 3 и 4, т. е. как механические, так и гидромеханические узлы, но не содержит органа настройки. Поэтому делительные пары шпинделя и делительного стола должны быть одинаковыми. Энергия движения в цепь переменной составляющей сообщается двумя внешними связями от двух различных источников. Первая внешняя связь $M_1 \rightarrow i_v \rightarrow 14 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 6$ сообщает энергию от электродвигателя через звено соединения связей – реверсивный золотник 6 и содержит орган настройки переменной составляющей круговой подачи, функцию которого выполняет кулачок 8. Синфазность переменной составляющей круговой подачи обеспечивается кинематической связью кулачка 8 с приводным валом 15 (ведущее звено кулисного механизма 17 привода поступательно-возвратного движения Π_1 шпинделя 9). Вторая внешняя связь гидростанция $7 \rightarrow$ реверсивный золотник 6 сообщает энергию непосредственно к гидроцилиндрам 3 и 4 приводов поступательного перемещения червяков 1 и 2 делительных пар шпинделя 1 и делительного стола 2. Таким образом, реверсивный золотник как гидромеханический узел является звеном соединения связей, объединяющим две различные энергетические среды.

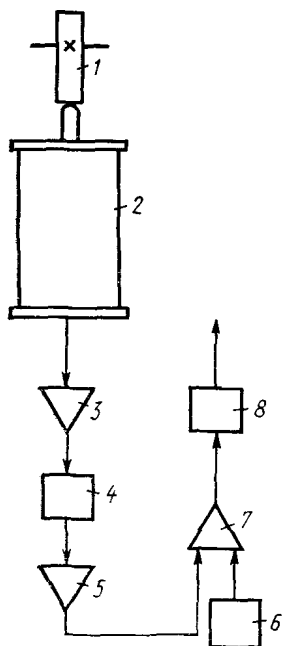
Цепи внутренней связи группы обката можно записать совместно следующим образом:



Рассмотренная кинематическая структура имеет отдельный электродвигатель M_2 в группе обката. В случае соединения групп формообразования через общий электродвигатель M_1 вход гитары сменных зубчатых колес i_s соединяется с приводным валом 15 станка.

Управлять скоростью движения обката в цикле прохождения зоны обработки каждым зубом долбяка с целью усреднения толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками, можно также, используя кинематическую структуру, у которой в группе обката внутренняя связь выполнена в виде системы отслеживающей синхронизации на типовых электронных блоках по рис. 3.2. Для такой схемы блок фор-

мирования задающего сигнала для электродвигателя задающей координаты (шпинделя станка) выполняется на основе индуктивного дифференциального датчика (рис. 4.6). Кулачок 1, на котором «записана» переменная составляющая круговой подачи, контактирует с подвижным якорем индуктивного датчика 2, питание которого осуществляется



от источника синусоидального напряжения частотой до 5000 Гц. Выход датчика 2 соединен со схемой преобразования сигнала, состоящей из последовательно соединенных предварительного усилителя 3, выпрямителя 4 и регулируемого усилителя 5.

Регулируемый усилитель 5 выполняет функцию задатчика переменной составляющей круговой подачи задающей координаты. Его выход соединен со вторым входом суммирующего усилителя 7, с первым входом которого соединен задатчик 6 постоянной составляющей кру-

Рис. 4.6. Схема блока формирования задающего сигнала

говой подачи. Таким образом, на выходе суммирующего усилителя 7 действует задающий сигнал, определяющий характер управления скоростью обката. Он сообщается в усилитель мощности 8. Кулачок 1 блока кинематически связывается с приводным валом станка, а усилитель мощности 8 — с электродвигателем задающей координаты, т. е. шпинделя долбяка.

Ведомая координата группы обката — делительный стол за счет внутренней связи — системы отслеживающей синхронизации будет отслеживать движение задающей координаты, повторяя закономерность ее круговой подачи. В итоге будет обеспечиваться зубодолбление с усреднением толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка.

4.2. Кинематическая структура станков, работающих без затираания

В параграфе 2.2 рассмотрены различные варианты изменения правила выполнения движения обката, обеспечивающие устранение явления затираания. В частности, установлено, что наиболее рациональны варианты, основанные на дискретном, двухуровневом изменении скорости обката. При таком характере правила выполнения движения обката, круговая подача при каждом рабочем ходе долбяка остаются неизменными (см. рис. 2.3) и, следовательно, микрогеометрия по профилю зубчатого венца будет постоянной.

Формально устранение явления затираания и изменение характера стружки, срезаемой боковыми режущими кромками, совпадают по принципу управления движением обката. Поэтому рассмотренные кинематические структуры двух зубодолбежных станков (рис. 4.3 и 4.5) могут обеспечить устранение явления затираания. Для этого в обеих схемах кулачок, несущий информацию о переменной составляющей круговой подачи, должен быть выполнен в виде звездочки с профилем зубьев в виде двух симметричных отрезков архимедовой спирали [10]. Для устранения удара в кулачковом механизме желателен кулачок с максимально возможным по условиям компоновки числом зубьев. В частности, в коробке подач (см. рис. 4.4) использован по условиям компоновки в базовом станке модели 5122 кулачок с пятью зубьями. Однако, видимо, более рационально вместо кулачкового механизма во внешней связи группы обката применять специальный механизм дискретного действия.

При разработке структурной схемы с дискретным изменением скорости обката на двух уровнях, реализующей все закономерности по рис. 2.3, наиболее рационально обе составляющие движения обката, как и в предшествующих примерах, сформировать в двух параллельных цепях внешней связи группы обката и сообщать их во внутреннюю связь через суммирующий механизм. Этим условиям удовлетворяет кинематическая структура, приведенная на рис. 4.7, отличающаяся от базовой (см. рис. 3.1) группой обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$. Поэтому рассмотрим только эту группу.

Внутренняя связь группы обката $B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow i_x \rightarrow 4 \rightarrow 5$

выполнена в виде ненастраиваемой кинематической цепи. Обе цепи выходными звеньями связаны с входами 12 и 14 суммирующего механизма.

Механизм 11, формирующий дискретное движение, состоит из кривошипно-коромыслового механизма 15 и механизма дискретного действия 16. Они работают синхронно с кулисным механизмом 17 привода поступательно-возвратного движения $П_1$ шпинделя долбяка.

Механизм дискретного действия 16 [1] выполнен в виде кольца (ведомое звено кривошипно-коромыслового механизма) с пазами 18, имеющими скосы 19 с одной стороны. Кольцо охватывает диск 20, в пазах 21 которого установлены пальцы 22, опирающиеся на пружины. Разность φ угловых шагов расположения пазов 21 и 18 является углом качания кольца дискретного механизма. Этот угол определяет период сообщения движения во внутреннюю связь группы обката.

Передаточное отношение цепи, связывающей приводной вал 23 станка через кинематические передачи 9 и 10 с кривошипно-коромысловым механизмом 15, равно единице, что обеспечивает синхронную работу механизмов 15–17. Передаточное отношение цепи, связывающей приводной вал 23 с входом 14 суммирующего механизма, задается из условия сообщения во внутреннюю связь минимальной «ползучей» подачи. Необходимое по условиям резания значение рабочей круговой подачи устанавливается при настройке станка гитарой сменных зубчатых колес i_s .

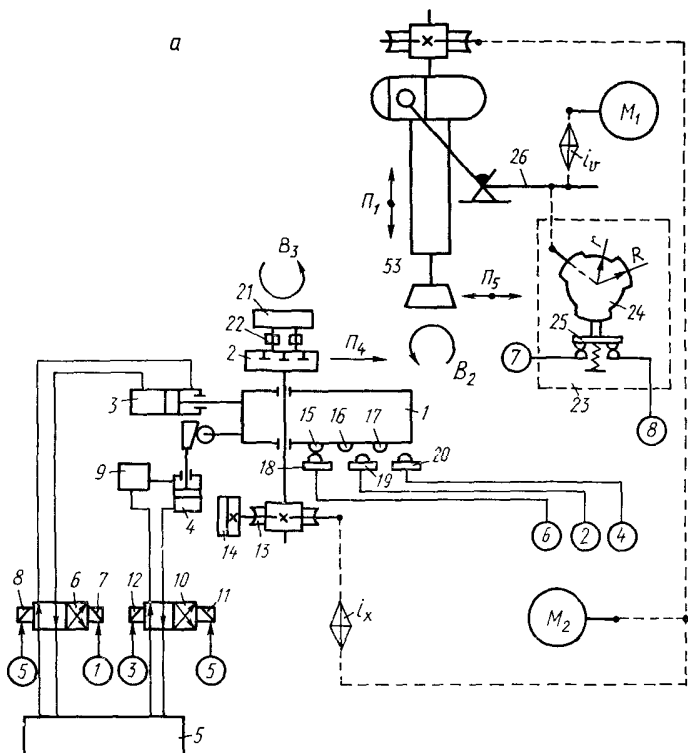
Рассмотренную структурную схему можно модернизировать, совместив устранение явления затирания с усреднением толщины стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка. Для этого в ненастраиваемую кинематическую цепь внешней связи достаточно ввести кулачковый механизм, на кулачке которого «записана» закономерность изменения круговой подачи, и гитару сменных зубчатых колес.

При обсуждении способов зубодолбления, технический эффект которых состоит в устранении затирания, был рассмотрен способ управления циклом многопроходной обработки на основе контроля за моментом возникновения затирания, позволяющий автоматически выбирать количество проходов при зубодолблении без затирания. Кинематическая структура станка и блок-схема системы управления

циклом многопроходного врезания приведены на рис. 4.8.

Кинематические группы $\Phi_v(\overline{П}_1)$ и $Bc(\overline{П}_5)$ аналогичны соответствующим группам базового варианта (см. рис. 3.1). Группа $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ отличается от такой же группы базового варианта применением отдельного регулируемого электродвигателя M_2 . Такое исполнение группы обката принято в ряде моделей зубодолбежных станков, например в станке модели 5A140. Группа радиального врезания $Bp(\overline{П}_4)$ с гидравлическими источниками энергии унифицирована с соответствующей группой станка модели 5122.

Продольный стол 1 (рис. 4.8, а), несущий делительный стол 2, оснащен гидроцилиндрами ускоренного перемещения 3 и врезания 4. Гидроцилиндр ускоренного перемещения



б

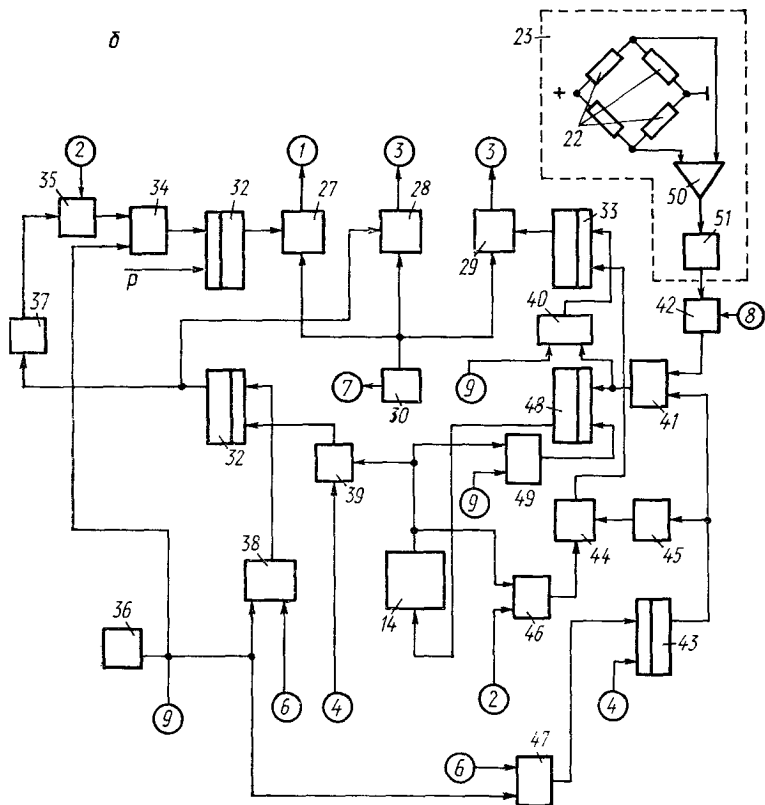


Рис. 4.8. Кинематическая структура станка для многопроходного зубодобления: а – схема приводов; б – блок-схема системы управления циклом врезания

3 соединен с гидростанцией 5 через реверсивный золотник 6, управляемый электромагнитами 7 и 8, а гидроцилиндр врезания 4 – через регулятор 9 подачи врезания и реверсивный золотник 10, управляемый электромагнитами 11 и 12.

На делительной паре 13 делительного стола 2 установлен счетчик 14, служащий для отсчета одного оборота делительного стола на этапах профилирования. Для связи с блок-схемой цикловой автоматики на продольном столе установлены упоры 15–17, которым соответствуют путевые переключатели 18–20. Первая пара упор – путевой переключатель соот-

ветствует исходному положению продольного стола, вторая – началу врезания, третья – окончанию этапов врезания. На технологической оправке 21 для установки заготовок закреплены тензорезисторы 22, входящие в блок 23 формирования сигнала управления количеством проходов. В блок 23 входит также электромеханический ключ, выполненный в виде кулачка 24, контактирующего с микропереключателем 25. Профиль кулачка очерчен чередующимися дугами радиусов R и r . Разность радиусов равна величине хода кнопки микропереключателя. Передаточное отношение кинематической связи приводной вал 26 станка – кулачок 24 равно $1/K$, где K – количество пар дуг обоих радиусов на кулачке.

Электромагниты 7 и 8 реверсивного золотника 6 соединены с выходами ключей соответственно 27 и 28, а электромагниты 11 и 12 реверсивного золотника 10 – с выходами ключей соответственно 28 и 29 (рис. 4.8, б). Аналоговые входы ключей соединены с блоком питания 30, а управляющие входы – с выходами триггеров соответственно 31–33.

Первый вход триггера 31 соединен с выходом элемента ИЛИ 34, соединенного первым входом с выходом элемента И 35, а вторым входом с блоком 36 начальной установки триггеров. Первый вход элемента И 35 соединен с путевым переключателем 19, а второй – через элемент НЕ 37 с выходом триггера 32. Второй вход триггера 31 используется для пуска схемы цикловой автоматики. Первый вход триггера 32 соединен с выходом элемента ИЛИ 38, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй – с блоком 36 начальной установки триггеров. Второй вход триггера 32 соединен с выходом элемента И 39. Первый вход элемента И 39 соединен с выходом счетчика 14 (рис. 4.8, а), а второй – с путевым переключателем 20. Первый вход триггера 33 соединен с выходом элемента ИЛИ 40, соединенного первым входом с выходом элемента ИЛИ 41, а вторым – с блоком 36 начальной установки триггеров. Первый вход элемента ИЛИ 41 соединен с выходом элемента И 42, оба входа которого соединены с блоком 23 формирования сигнала управления количеством проходов. Второй вход элемента ИЛИ 41 соединен с выходом триггера 43. Второй вход триггера 33 соединен с выходом элемента И 44, у которого первый вход соединен через элемент НЕ 45 с выходом триггера

43, а второй – с выходом элемента ИЛИ 46. Первый вход элемента ИЛИ 46 соединен с путевым переключателем 19, а второй – с выходом счетчика 14. Первый вход триггера 43 соединен с выходом элемента ИЛИ 47, соединенного первым входом с конечным выключателем 18, а вторым входом – с блоком 30 начальной установки триггеров. Второй вход триггера 43 соединен с конечным выключателем 20. Первый вход триггера 48 соединен с выходом элемента ИЛИ 49, у которого первый вход соединен с выходом счетчика 14, а второй вход – с блоком 30 начальной установки триггеров. Второй вход триггера 48 соединен с выходом элемента ИЛИ 41, а выход – с входом счетчика 14.

В блоке 23 формирования сигнала управления количеством проходов тензорезисторы включены в мостовую схему, выходы которой соединены с входами дифференциального усилителя 50. Выход этого усилителя через усилитель-ограничитель 51 соединен с первым входом элемента И 42.

При включении схемы под напряжение все триггеры сигналом с блока 36 начальной установки триггеров устанавливаются в исходное состояние, при котором на их выходах сигнал отсутствует. Рабочий цикл начинается после подачи управляющего потенциала P на второй вход триггера 31, устанавливающего на его выходе сигнал, открывающий ключ 27, который включает электромагнит 7 реверсивного золотника 6. Поток масла из гидростанции 5 поступает через реверсивный золотник 6 в полость гидроцилиндра 3, который обеспечивает ускоренное перемещение $П_4$ продольного стола 1 в исходную точку для врезания. При набегании упора 16 на путевой переключатель 19 на выходе последнего появляется сигнал, который поступает на первый вход элемента И 35, открытый по второму входу сигналом с элемента НЕ 37. На выходе элемента И 35 появляется сигнал, который, поступая на первый вход триггера 31, сбрасывает сигнал с его выхода. В итоге ключ 27 закрывается и отключает электромагнит 7 реверсивного золотника 6. Ускоренное перемещение продольного стола 1 прекращается. Одновременно сигнал с путевого переключателя 19 включает электродвигатели M_1 и M_2 приводов соответствующих групп $\Phi_v(\Pi_1)$ и $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$. Этот же сигнал через элемент ИЛИ 46 и открытый по первому входу элемент И 44 сигналом с выхода элемента НЕ 45 поступает на второй вход триггера 33. Сигнал, устанавли-

вающийся на выходе триггера 33, открывает ключ 29, включающий электромагнит 12 реверсивного золотника 10. Поток масла через золотник поступает в полость гидроцилиндра 4 врезания, сообщающего продольному столу подачу врезания в движении $П_4$. Одновременно с профилированием заготовки движениями $П_1$ и $B_2 \equiv B_3$ осуществляется врезание на первую часть припуска.

В процессе долбления блок 23 формирования сигнала управления количеством проходов (этапов врезания) непрерывно при холостом ходе долбяка контролирует момент возникновения явления затирания при достижении определенной величины врезания. Электромеханический ключ блока 23 синхронно с холостым ходом долбяка подает сигнал, открывающий по второму входу элемент И 42, а тензометрический мост фиксирует момент возникновения затирания в виде сигнала – аналога момента силы этого явления. Этот сигнал после прохождения дифференциального усилителя 50 и усилителя-ограничителя 51 поступает через элементы И 42 и ИЛИ 41 на первый вход триггера 33 и на второй вход триггера 48. Сигнал, появившийся на первом входе триггера 33, сбрасывает сигнал с его выхода. Ключ 29 отключает электромагнит 12 реверсивного золотника 10, поток масла через гидроцилиндр 4 перекрывается и движение врезания прекращается. Одновременно сигнал, появившийся на втором входе триггера 48, устанавливает сигнал на его выходе, который включает счетчик 14.

В течение полного оборота делительного стола 2 осуществляется первый проход, что отслеживается счетчиком 14. По завершении прохода на выходе счетчика появляется сигнал, который поступает на первый вход триггера 48 и через элемент ИЛИ 46 и открытый по первому входу сигналом с элемента НЕ 45 элемент И 44 на второй вход триггера 33. На выходе триггера 48 сигнал сбрасывается, счетчик 14 отключается, а на выходе триггера 33 устанавливается сигнал, который открывает ключ 29. В итоге реверсивный золотник 10 включает гидроцилиндр 4, сообщающий продольному столу 1 врезание для второго прохода.

На очередном (втором) этапе врезания блок 23 отслеживает момент возникновения затирания и при его появлении выдает сигнал, переключающий схему на очередной проход, прекращая движение врезания.

На последнем этапе врезания упор 17 набегают на путевой переключатель 20. Сигнал с его выхода открывает по второму входу элемент И 39 и одновременно, поступая на второй вход триггера 43, устанавливает на его выходе сигнал, который через элемент НЕ 45 закрывает по первому входу элемент И 44. Сигнал с выхода триггера 43 поступает также через элементы ИЛИ 41 и 40 на первый вход триггера 33, сбрасывая сигнал с его выхода. В итоге ключ 29 отключает электромагнит 12 золотника 10 и движение врезания прекращается. Одновременно сигнал с выхода триггера 43 поступает на второй вход триггера 48, устанавливая на его выходе сигнал, включающий счетчик 14. Сигнал с выхода триггера 43 переключает также электродвигатель M_2 группы обката с круговой подачи черновых проходов на подачу последнего чистового прохода.

На чистовом проходе счетчик 14 отслеживает полный оборот делительного стола 2. По завершении прохода сигнал, появившийся на выходе счетчика, поступает на первый вход триггера 48 и через открытый по второму входу элемент И 39 на второй вход триггера 32. На выходе триггера 48 сигнал сбрасывается, и счетчик 14 отключается. На выходе триггера 32 устанавливается сигнал, который через элемент НЕ 37 закрывает по второму входу элемент И 35 и одновременно открывает по управляющему входу ключ 28. В итоге срабатывают электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10, которые изменяют направление потока масла в гидроцилиндрах 3 и 4. Продольный стол 1 под воздействием гидроцилиндра 3 ускоренно перемещается в исходное положение. Одновременно ползушка гидроцилиндра 4 также перемещается в исходное положение.

Вместе с реверсированием движения продольного стола выключаются электродвигатели M_1 и M_2 , и шпиндель выводит долбяз в крайнее верхнее положение.

При движении продольного стола 1 в исходное положение упор 15 набегают на путевой переключатель 18. Сигнал с его выхода поступает на первые входы триггеров 32 и 43, сбрасывая сигналы с их выходов. В результате снимается сигнал с управляющего входа ключа 28, отключаются электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10, и продольный стол останавливается в исходном положении. Одновременно появляются сигналы на выходах элементов НЕ 37 и 45, подготавливая схему к повторению цикла. После смены заго-

товки цикл многопроходного зубодолбления повторяется подачей управляющего потенциала на второй вход триггера 31.

В блоке 23 формирования сигнала управления количеством проходов рассмотренной схемы электромеханический ключ может быть заменен фотоэлектрическим, собираемым из элементов типового кругового импульсного измеритель-

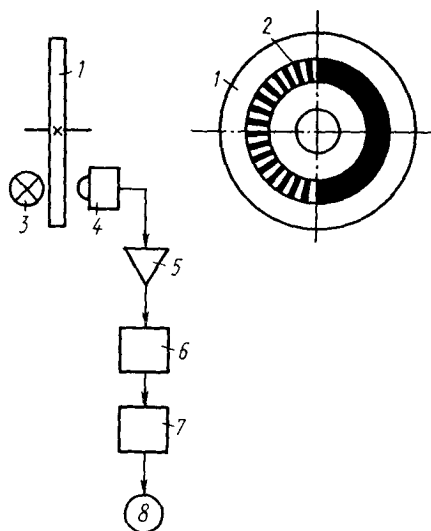


Рис. 4.9. Фотоэлектрический ключ

ного преобразователя и интегральных схем. Ключ (рис. 4.9) выполнен в виде фотоэлектрического диска 1, у которого фотоэлектрическая маска 2, состоящая из чередующихся прозрачных и непрозрачных штрихов, выполнена на одной половине торцевой поверхности. При использовании диска от типового измерительного преобразователя половина его фотоэлектрической маски закрывается. С противоположных сторон фотоэлектрической маски 2 диска устанавливаются осветитель 3 и фоторезистор 4, выход которого подключен к входу схемы, состоящей из усилителя 5, интегратора 6 и фильтра низших частот 7.

Ось фотоэлектрического диска 1 кинематически связывается с приводным валом станка передачей, имеющей передаточное отношение, равное единице. Синхронность враще-

ния диска с поступательно-возвратным движением шпинделя долбяка обеспечивается соответствующей установкой диска относительно крайнего верхнего или нижнего положения долбяка. При работе станка засветка фоторезистора 4 осуществляется только при холостом ходе. Следовательно, сигнал с выходного блока схемы-фильтра 7 поступает на вход элемента И 42 блок-схемы системы управления циклом врезания (см. рис. 4.8, б) только при холостых ходах шпинделя долбяка.

4.3. Кинематическая структура станков для многопроходного зубодолбления с непрерывным врезанием

Принципиальная особенность многопроходного зубодолбления с непрерывным врезанием состоит в том, что подача радиального врезания зависит от круговой подачи. Эта зависимость носит обратно пропорциональный характер. С увеличением количества предварительных проходов для избежания потери производительности зубообработки круговую подачу повышают, а подачу радиального врезания пропорционально уменьшают.

На рис. 4.10 приведены структурная схема станка и системы управления циклом, реализующая данный способ многопроходного зубодолбления.

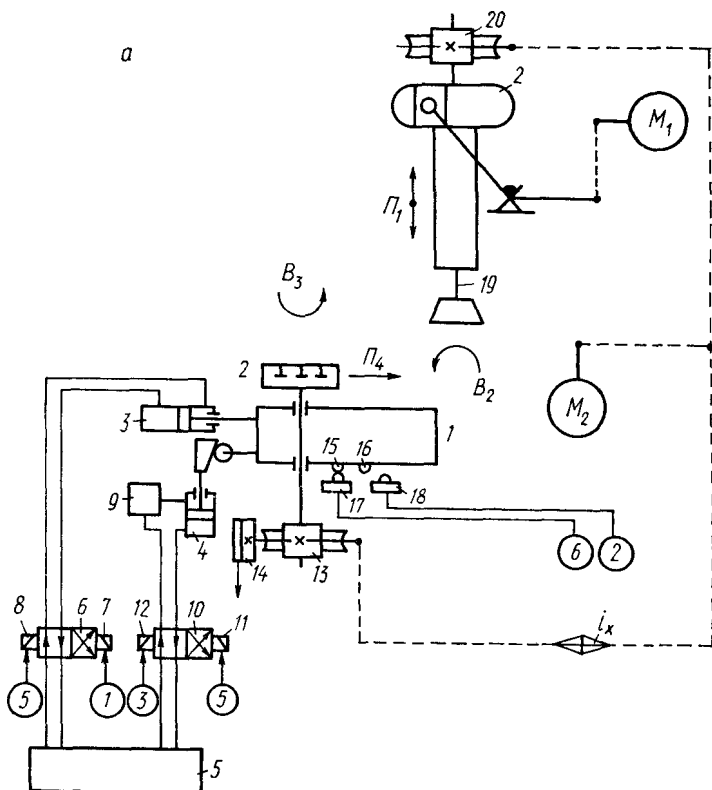
Кинематическая структура станка унифицирована со структурой станка с механическими связями между исполнительными органами (см. рис. 4.8, а). Поэтому ее описание опускаем. Блок-схема системы управления циклом врезания по архимедовой спирали состоит из стандартных интегральных схем.

Продольный стол 1 (рис. 4.10, а), 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 – с гидростанцией 5 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, 16, контактирующие с путевыми переключателями

17 и 18. Первый путевой переключатель соответствует исходному положению продольного стола, второй – началу движения врезания.

Станочное зацепление делительный стол 2 – шпindel 19 долбяка воспроизводится цепью обката, включающей делительную пару 13, гитару сменных зубчатых колес i_x и делительную пару 20. Источником энергии для цепи обката является регулируемый электродвигатель M_2 . Привод поступательно-возвратного движения шпинделя 19 осуществляется кулисным механизмом 21, кинематически связанным с электродвигателем M_1 .

Электромагниты 7 и 8 реверсивного золотника 6 соединены с выходами ключей 22 и 23 (рис. 4.10, б), а электромагниты 11 и 12 реверсивного золотника 10 – с выходами ключей 23 и 24. Аналоговые входы ключей 22, 23, 24 объединены



б

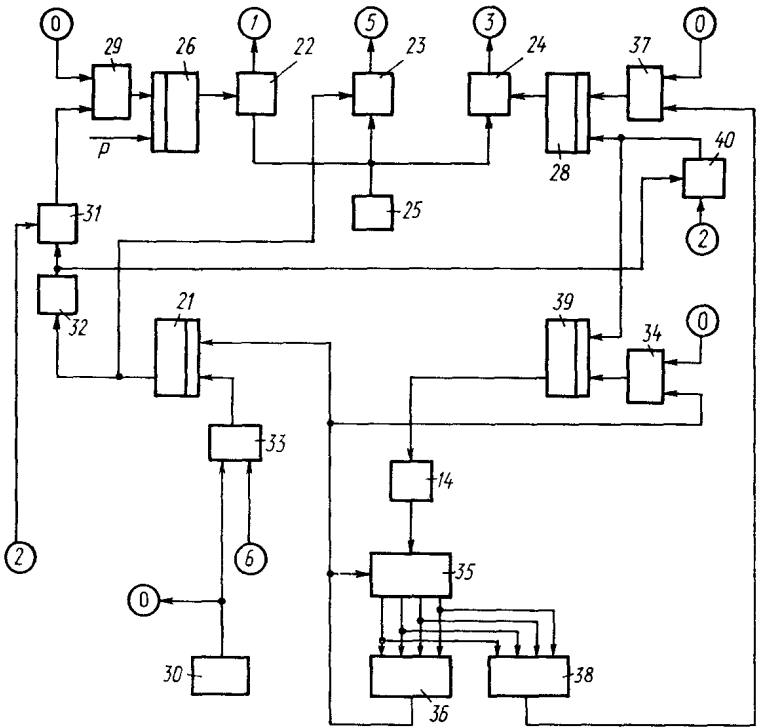


Рис. 4.10. Кинематическая структура станка с непрерывным врезанием по спирали: *а* – схема приводов; *б* – блок-схема системы управления циклом обработки при непрерывном врезании

и соединены с источником питания 25, а управляющие входы – с выходами триггеров 26, 27, 28. Первый вход триггера 26 соединен с выходом элемента ИЛИ 29, соединенного первым входом с блоком 30 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом элемента И 31, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй вход через элемент НЕ 32 – с выходом триггера 27. Второй вход триггера 26 используется для включения рабочего цикла. Первый вход триггера 27 соединен с выходом элемента ИЛИ 33, соединенного первым входом с блоком 30 начальной установки триггеров, а вторым входом – с путевым переключателем 17. Второй вход триггера 27 объединен с первым

входом элемента ИЛИ 34, с входом «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 35 и соединен с выходом блока задания общего количества проходов 36. Первый вход триггера 28 соединен с выходом элемента ИЛИ 37, соединенного первым входом с блоком 30 начальной установки триггеров, а вторым входом – с выходом блока задания количества черновых проходов 38. Вторые входы триггеров 28 и 39 объединены и соединены с выходом элемента И 40, у которого первый вход соединен с путевым переключателем 18, а второй вход – с выходом элемента НЕ 32. Первый вход триггера 39 соединен с выходом элемента ИЛИ 34, выход триггера 39 – с входом счетчика числа зубьев 14. Выход этого счетчика соединен с входом двоичного 4-разрядного счетчика 35, выходы которого соединены с соответствующими входами блоков задания количества проходов 36 и 38.

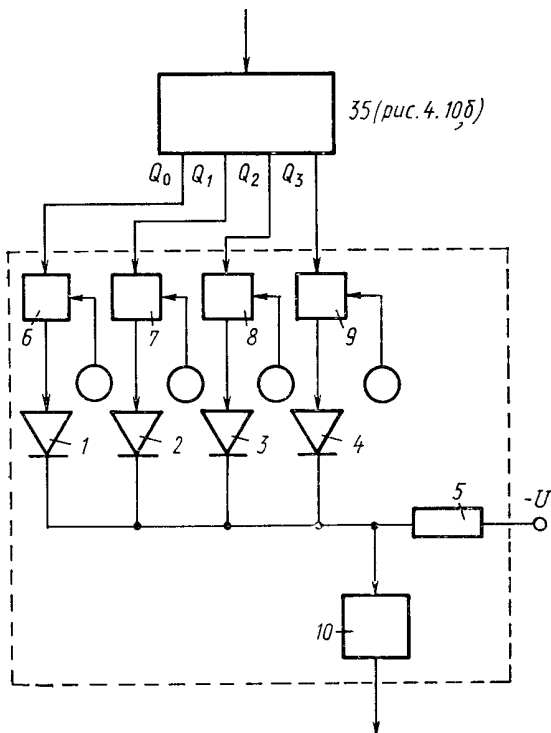


Рис. 4.11. Схема блока задания количества проходов

Блоки задания количества проходов 36 и 38 (рис. 4.11) содержат диодно-резисторный 4-входовый конъюнктор на диодах 1, 2, 3, 4, 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 35. Управляющие входы ключей 6, 7, 8, 9 используются для набора кода количества проходов. К выходу 4-входового конъюнктора подключен вход одноустойчивого мультивибратора 10.

Выходы Q0, Q1, Q2, Q3 двоичного 4-разрядного счетчика имеют веса $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$. Следовательно, на входах 4-входового конъюнктора возможны состояния счетчика от 0000 до 1111, т. е. 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 счетчика 35, 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 26 управляющего сигнала *P*. На выходе триггера устанавливается сигнал, открывающий ключ 22, 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 P_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 31, открытого по второму входу. На выходе этого элемента появляется сигнал, который, поступая на первый вход триггера 26, сбрасывает с его выхода сигнал, и ключ 22 отключает электромагнит реверсивного золотника, управляющего ускоренным перемещением P_4 продольного стола 1. Сигнал с путевого переключателя 18 включает также привод поступательно-возвратного

движения Π_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 40, открытый по второму входу, поступает на вторые входы триггеров 28 и 39. Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 28, открывает ключ 24, 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 Π_4 . Сигнал, устанавливающийся на выходе триггера 39, включает счетчик 14 числа зубьев. В итоге указанного воздействия на схему сигнала с путевого переключателя 18 движениями Π_1 , Π_4 и $B_2 \equiv B_3$ осуществляются черновые проходы.

После каждого чернового прохода, соответствующего одному обороту делительного стола 2, на выходе счетчика 14 числа зубьев появляется сигнал, поступающий на вход двоичного 4-разрядного счетчика 35. После выполнения заданного на блоке 38 количества черновых проходов на выходе последнего появляется сигнал, поступающий на первый вход триггера 28. Сигнал с выхода триггера сбрасывается, ключ 24 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 35. В итоге на выходе блока 36 задания общего количества проходов появляется сигнал, который отключает привода движений Π_1 и $B_2 \equiv B_3$ и одновременно поступает на вход «сброс» двоичного 4-разрядного счетчика 35, на первый вход триггера 39 и на второй вход триггера 27. На выходе триггера 39 сигнал сбрасывается и счетчик 14 отключается. Одновременно на выходе триггера 27 устанавливается сигнал, включающий ключ 23. Электромагниты 8 и 11 реверсивных золотников 6 и 10 срабатывают, и изменяется направление потока масла в гидроцилиндрах 3 и 4. Продоль-

ный стол 1 под воздействием гидроцилиндра 3 ускоренно перемещается в исходное положение. Одновременно ползушка гидроцилиндра 4 также перемещается в исходное положение. В исходном положении продольного стола упор 15 набегает на путевой переключатель 17. Сигнал с его выхода поступает на первый вход триггера 27, сбрасывая сигнал с его выхода. Ключ 23 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 чистовой, что предусмотрено в ряде современных зубодолбежных станков [44], в блок-схему системы управления циклом (см. рис. 4.10, б) вводится дополнительный блок задания количества проходов, ключами которого устанавливается сумма получистовых проходов. Дополнительный блок присоединяется входами к соответствующим выходам 4-разрядного двоичного счетчика параллельно входам блоков, задающих черновые и чистовой проходы. Сигнал с выхода дополнительного блока используется для переключения электродвигателя группы обката на круговую подачу получистового прохода и соответствующего изменения подачи радиального врезания. В частности, в указанном источнике круговая подача на черновых проходах равна 3,078 мм / (дв·ход), на получистовых проходах – 1,539 мм / (дв·ход), на чистовых проходах – 0,531 мм / (дв·ход).

Современная тенденция в области зубодолбления с радиальным врезанием – компьютеризация станков с электронными связями. В зубодолбежных станках с процессорным управлением фирмы «Lorenz» (ФРГ) [26] предусмотрено хранение в памяти управляющего компьютера до 50 различных программ, в том числе программ, обеспечивающих как однопроходную, так и многопроходную обработку. Многопроходная обработка может осуществляться при последовательном выполнении врезания и обката и непрерывном врезании по архимедовой спирали. Предусмотрены прогрессивная и регрессивная подачи, имеются также программы, обеспечивающие повышение размерной стойкости долбяков за счет устранения факторов, описанных при обсуждении особенностей первообразного способа зубодолбления.

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ С КАСАТЕЛЬНЫМ ВРЕЗАНИЕМ

5.1. Структурная схема базового станка с касательным врезанием

В основу базового станка с касательным врезанием положен один из вариантов, описанный в [42].

Кинематическая структура станка (рис. 5.1) содержит следующие группы: скорости резания $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$, круговой подачи $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$, касательного врезания $Vp(\Pi_4 \equiv B_6)$, «отскока» $Vc(\bar{\Pi}_5)$.

Группы $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ и $Vc(\bar{\Pi}_5)$ аналогичны соответствующим группам базового станка с радиальным врезанием (см. рис. 3.1).

Группа $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ – сложная. Ее внутренняя связь, представляет собой цепь обката (профилирования зубьев колеса), связывающую шпиндель 1 с делительным столом 2, $B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow 6 \rightarrow \Sigma \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow B_3$. Внешняя связь $M_2 \rightarrow 9 \rightarrow 5$ передает энергию вращательного движения от регулируемого электродвигателя M_2 во внутреннюю связь через звено соединения связей 5.

Сложное движение $B_2 \equiv B_3$ настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на скорость обката изменением круговой частоты электродвигателя M_2 .

Группа $Vp(\Pi_4 \equiv B_6)$ – сложная. Ее внутренняя связь $\Pi_4 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow i_y \rightarrow 13 \rightarrow \Sigma \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 2 \rightarrow B_6$ представляет собой цепь, воспроизводящую реечное зацепление и кинематически связывающую продольный стол 10 с расположенным на нем делительным столом 2. Внешняя связь $M_3 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 11$ передает энергию от регулируемого электродвигателя M_3 во внутреннюю связь через передачу винт – гайка 11.

Сложное движение $\Pi_4 \equiv B_6$ настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_y , на подачу касательного

врезания изменением круговой частоты электродвигателя M_3 .

Делительный стол 2 совершает два элементарных движения B_3 и B_6 , являющихся составляющими двух различных сложных исполнительных движений $B_2=B_3$ и $\Pi_4=B_6$, воспроизводимых разными кинематическими группами. Поэтому их внутренние связи соединены между собой суммирующим механизмом Σ и имеют общий участок $\Sigma \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 2$.

Сравнивая первообразную базовую схему (см. рис. 3.1) и данную базовую структуру, замечаем, что последняя сложнее. Причем усложнение кинематической структуры происходит за счет усложнения группы врезания и ее связи с группой обката через суммирующий планетарный механизм.

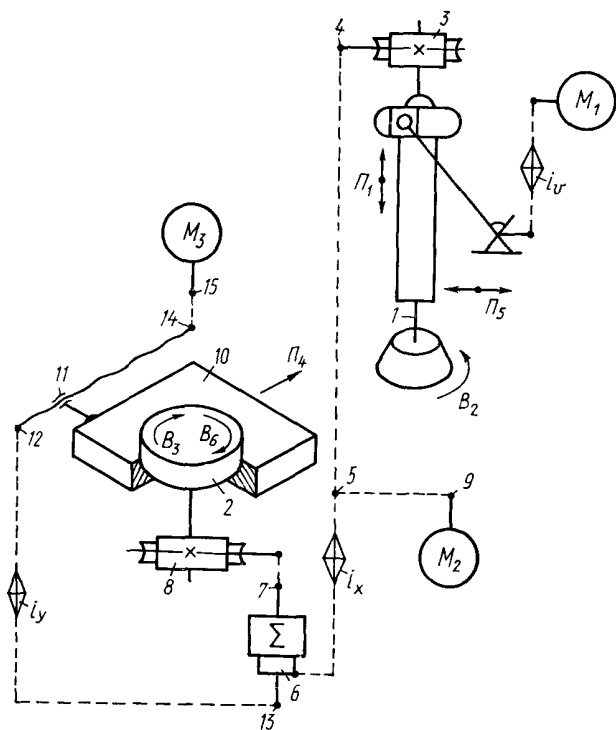
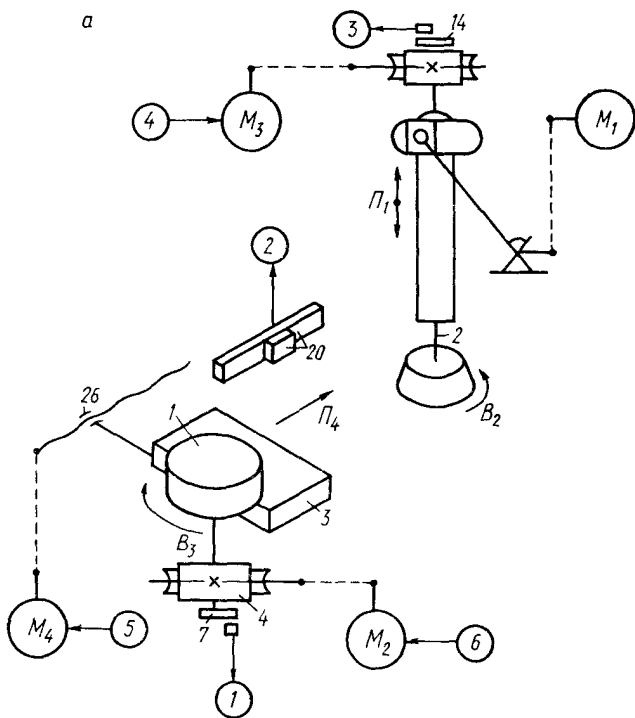


Рис. 5.1. Кинематическая структура базового станка с касательным врезанием

Вместе с тем благодаря иной исходной ориентации и направления движения врезания на основе рассмотренной структуры возможны схемы, обеспечивающие обработку одним долбяком одновременно на двух и более делительных столах.

В описанной структурной схеме станка с касательным врезанием исполнительные органы связаны посредством механических передач. Возможен вариант с использованием таких связей на электронных блоках, например на базе системы отслеживающей синхронизации (рис. 5.2) [6, 22].

По аналогии с предшествующей схемой будем считать, что делительный стол 1 одновременно участвует в двух сложных движениях $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ и $Bp(\Pi_4 \equiv B_6)$. Поэтому для построения блок-схемы отслеживающей синхронизации для обеих групп наиболее рационально выбрать делительный



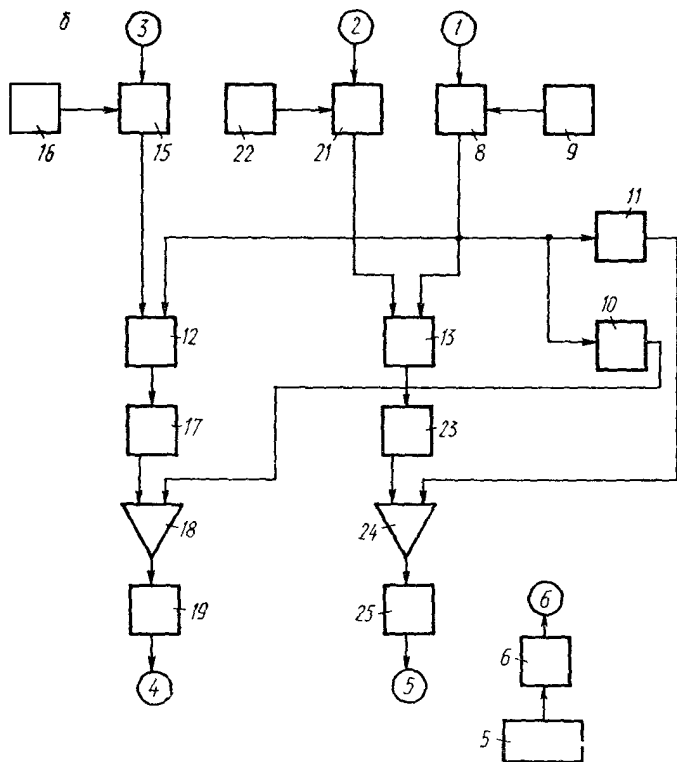


Рис. 5.2. Структурная схема базового станка с электронными связями: *а* – схема приводов; *б* – блок-схема системы отслеживающей синхронизации

стол 1 в качестве задающей координаты для двух ведомых координат – шпинделя 2 и продольного стола 3. Привод делительного стола 1 осуществляется через делительную пару 4 от электродвигателя M_2 , управляемого посредством задатчика 5 через УМ 6. Ведомые координаты – шпиндель 2 и продольный стол 3 оснащены отдельными регулируемыми электродвигателями M_3 и M_4 , управление которыми осуществляется системой синхронизации.

Общая для обеих сложных групп часть системы синхронизации содержит установленный на делительном столе 1 круговой ИИП 7, соединенный со счетчиком 8, оснащенный блоком ПО 9. Выход счетчика соединен с блоком КП 10, бло-

ком подачи врезания (ПВ) 11 и первыми входами ФД 12 и 13.

Для обеспечения функциональной связи в группе обката шпиндель 2 оснащен круговым ИИП 14, соединенным со счетчиком 15, к которому подсоединен блок ПО 16. Выход счетчика 15 соединен со вторым входом ФД 12, выход которого через ИАП 17 соединен со вторым входом СУ 18. Первый вход СУ 18 соединен с выходом блока КП 10, а выход – через УМ 19 с электродвигателем M_3 шпинделя.

Для обеспечения функциональной связи в группе врезания продольный стол 3 оснащен линейным ИИП 20, соединенным со счетчиком 21, к которому присоединен блок ПО 22. Выход счетчика 21 соединен со вторым входом ФД 13, выход которого через ИАП 23 соединен со вторым входом СУ 24. Первый вход СУ 24 соединен с выходом блока ПВ 11, а выход – через УМ 25 с электродвигателем M_4 продольного стола.

При настройке станка передаточные отношения в обеих сложных группах устанавливаются блоками ПО 9, 16, 22. Например, если круговая частота делительного стола 1 равна n , мин^{-1} , то подача касательного врезания S_1 , мм/мин , продольного стола 3 и круговая подача S_2 , мм^{-1} , шпинделя 2 определяются из соотношений

$$S_1 = CnT/A, \quad S_2 = Bn/A,$$

где A , B , C – коэффициенты деления импульсов, устанавливаемые соответственно блоками 9, 16, 22; T – шаг винта тягового вала (винт передачи 26) продольного стола, мм .

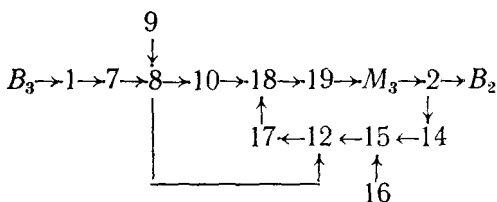
Схема работает следующим образом. После перемещения продольного стола в исходную для обработки точку включаются электродвигатель M_1 поступательно-возвратного движения $П_1$ и электродвигатель M_2 задающей координаты, сообщающий делительному столу круговую подачу B_3 , равную сумме его движений в обеих группах. Одновременно ИИП 7 начинает вырабатывать импульсный сигнал, пропорциональный действительной круговой подаче делительного стола. После деления в счетчике 8 он запускает блоки КП 10 и ПВ 11 и одновременно поступает на первые входы ФД 12 и 13. Блоки 10 и 11 вырабатывают аналоговые сигналы, которые после прохождения соответственно СУ 18, УМ 19 и СУ 24, УМ 25 включают электродвигатели M_3 и M_4 приводов обеих ведомых координат. В итоге движениями $П_1$, $B_2 \equiv B_3$, $П_4$

$\equiv B_3$ осуществляется касательное врезание параллельно с профилированием.

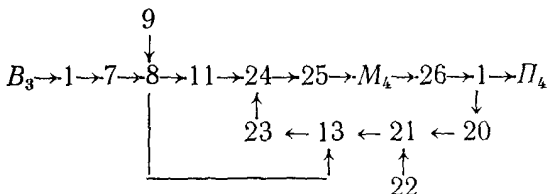
Одновременно ИИП 14 и 20 вырабатывают сигналы, пропорциональные действительным значениям скоростей ведомых координат. Эти сигналы после деления в счетчиках соответственно 15 и 21 поступают на вторые входы ФД 12 и 13, где сравниваются с задающими сигналами. С выходов ФД 12 и 13 корректирующие сигналы поступают в СУ 18 и 24 для коррекции погрешностей ведомых координат.

После врезания долбяка на высоту зуба обрабатываемого колеса по программе блок ПВ 11 и электродвигатель M_4 отключаются, движение врезания прекращается и продольный стол фиксируется. В дальнейшем в течение полного оборота делительного стола движениями Π_1 и $B_2 \equiv B_3$ осуществляется профилирование заготовки.

Таким образом, внутренняя связь группы обката по аналогии с такой же связью предшествующей структурной схемы, состоящей из механических передач, имеет вид



Аналогично внутренняя связь группы врезания



Внешняя связь для обеих групп $M_2 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ передает энергию во внутреннюю связь через звено соединения связей, функцию которого выполняет делительный стол 1, т. е. ведущая координата.

Возможны иные варианты схемы отслеживающей син-

хронизации. Например, в качестве задающих координат можно выбрать шпиндель 2 и продольный стол 3. Тогда делительный стол 1 будет ведомой координатой для групп обката и врезания. В этом случае схема синхронизации станет более сложной. Вместе с тем существенно возрастет гибкость за счет возможности задания наиболее рационального соотношения подачи врезания и круговой подачи (см. рис. 2.8).

При системном анализе способов обкатного зубодолбления рассматривались пути устранения специфических факторов, оказывающих отрицательное воздействие на износостойкость зуборезных долбяков. Эти пути, обеспечивающие повышение периода размерной стойкости инструмента, могут использоваться и при зубодолблении с касательным врезанием. Следовательно, описанные в параграфах 4.1 и 4.2 варианты модернизации группы обката (профилирования) применимы для аналогичной модернизации такой же группы в станках с касательным врезанием.

5.2. Кинематическая структура двухстоловых станков для последовательной зубообработки

Принципиальная особенность взаимной ориентации долбяка и заготовки позволяет создать компоновку зубодолбежного станка по типу компоновки станков вертикально-фрезерной группы, у которых 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. В итоге обеспечивается повышение производительности зубообработки.

На рис. 5.3 приведена кинематико-компоновочная схема станка, решающая данную задачу [14]. 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 выполняется от симметричного гидrocиллиндра двойного действия 6, установленного параллельно зубчатой рейке 5.

Кинематическая структура станка состоит из групп скорости резания $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$, обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_{31})$, врезания $Vp(\Pi_4 \equiv B_{32})$, «отскока» $Vc(\bar{\Pi}_5)$. Группы $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ и $Vc(\bar{\Pi}_5)$ аналогичны таким, же группам в ранее рассмотренных схемах. Делитель-

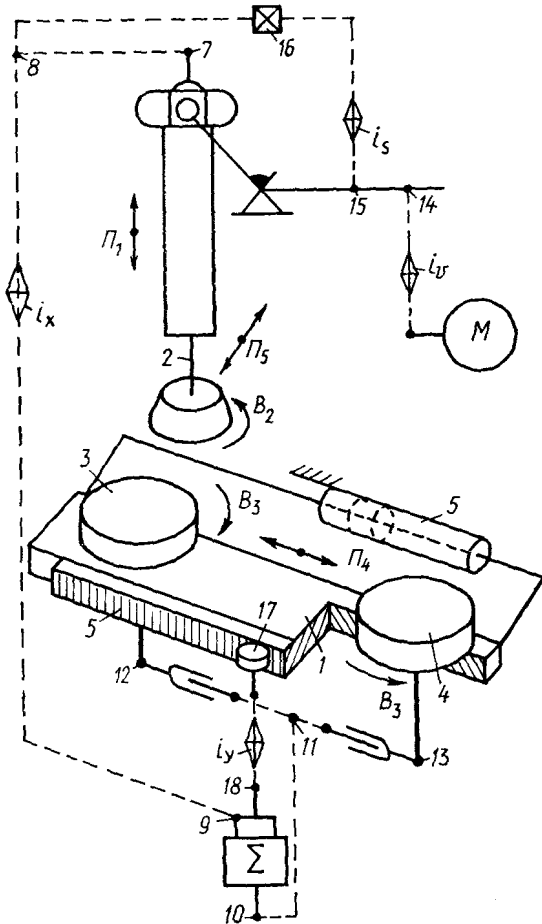


Рис 5.3. Кинематико-компоновочная схема двухстолового станка с касательным врезанием

ные столы 3 и 4 являются исполнительными органами обеих сложных групп. Поэтому их движение B_3 суммируется из движений B_{31} и B_{32} , которые им сообщаются в соответствующих группах.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_{31})$ обеспечивает профилирование зубьев заготовки. Ее внутренняя связь

$$B_2 \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow i_x \rightarrow 9 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11 \begin{array}{l} \nearrow 12 \rightarrow 3 \rightarrow B_{31} \\ \searrow 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_{31} \end{array}$$

представляет собой цепь обката, связывающую шпиндель 2 долбяка с обоими делительными столами 3 и 4. Внешняя связь

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 8$$

сообщает энергию движения от электродвигателя M во внутреннюю связь через звено соединения связей 8.

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 реверсивного механизма 16 обязательно, так как по условиям компоновки станка обработка заготовок на обоих делительных столах осуществляется при противоположных направлениях их вращательного движения.

Группа врезания $Vp(\Pi_4 \equiv B_{32})$ воспроизводит зубчато-ре-чное зацепление. Ее внутренняя связь

$$\Pi_4 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow i_y \rightarrow 18 \rightarrow \Sigma \rightarrow 10 \rightarrow 11 \begin{array}{l} \nearrow 12 \rightarrow 3 \rightarrow B_{32} \\ \searrow 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_{32} \end{array}$$

обеспечивает согласование вращательного движения делительных столов с движением врезания Π_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. По условиям компоновки цикл обра-

ботки 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.

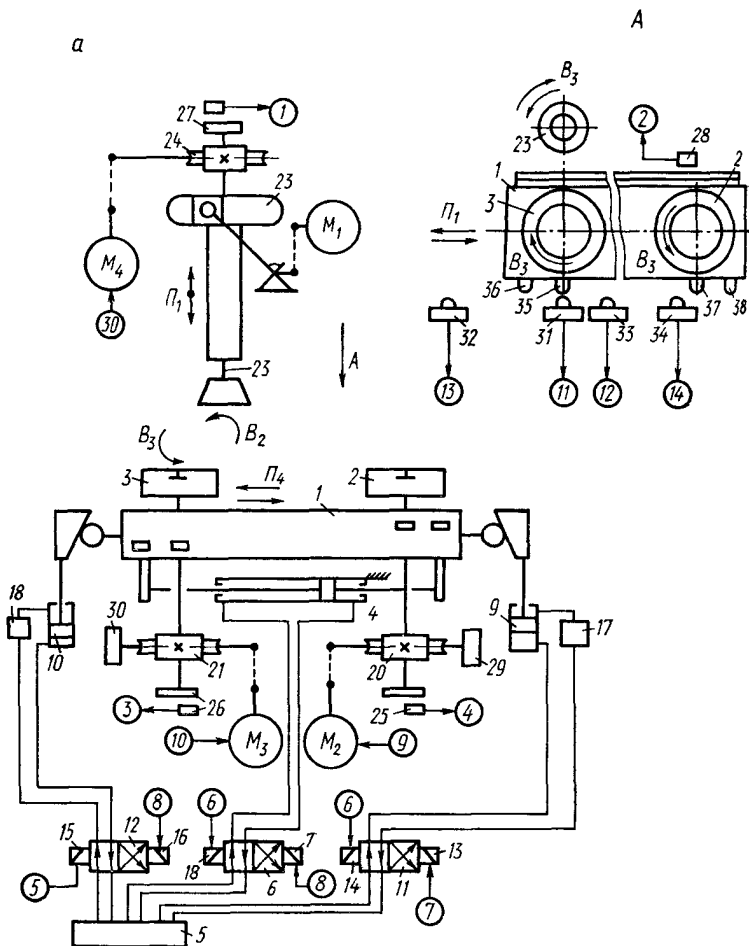
В соответствии с общей тенденцией в области станкостроения заменим в описанном станке механические связи электронными на базе интегральных схем, а гидравлический привод продольного стола унифицируем с приводом одной из выпускаемых базовых моделей, например 5122. Структурная схема и блок-схема цикловой автоматики представлены на рис. 5.4.

На продольном столе 1 в плоскости подач врезания P_4 установлены делительные столы 2 и 3. Привод ускоренного перемещения продольного стола 1 выполняется 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 соответственно 13, 14 и 15, 16. В трубопроводах гидроцилиндров 9 и 10 установлены регуляторы 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, на котором установлен долбяк, выполняется электродвигателем M_1 через кулисный механизм 23, а привод круговых подач шпинделя долбяка – через делительную передачу 24 от электродвигателя M_4 .

Для обеспечения функциональных связей между приводами исполнительных органов станка могут применяться программируемые контроллеры или системы отслеживающей синхронизации (БФС). Для связи с такими устройствами станок оснащен измерительными преобразователями: круговыми 25–27, установленными на делительных передачах 20, 21, 24, и линейным 28, установленным на продольном столе 1. Для связи с блок-схемой цикловой автоматики станок оснащен счетчиками числа зубьев (СЗ) 29 и 30, расположенными на делительных передачах 20 и 21, и конечными выключателями (ВК) 31–34, которым соответствуют упоры 35–38, уста-

новленные на продольном столе 1. Коммутация связей осуществляется через общий блок управления (БУ).

Блок-схема цикловой автоматики (рис. 5.4, б) состоит из ключей (К) 39–42, аналоговые входы которых объединены и соединены с источником питания 43. Выход К 39 соединен с электромагнитами 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12, выход К 40 – с электромагнитами 8 и 14 реверсивных золотников 6 и 11, выход К 41 – с электромагнитом 13 реверсивного золотника 11, выход К 42 – с электромагнитом 15 реверсив-



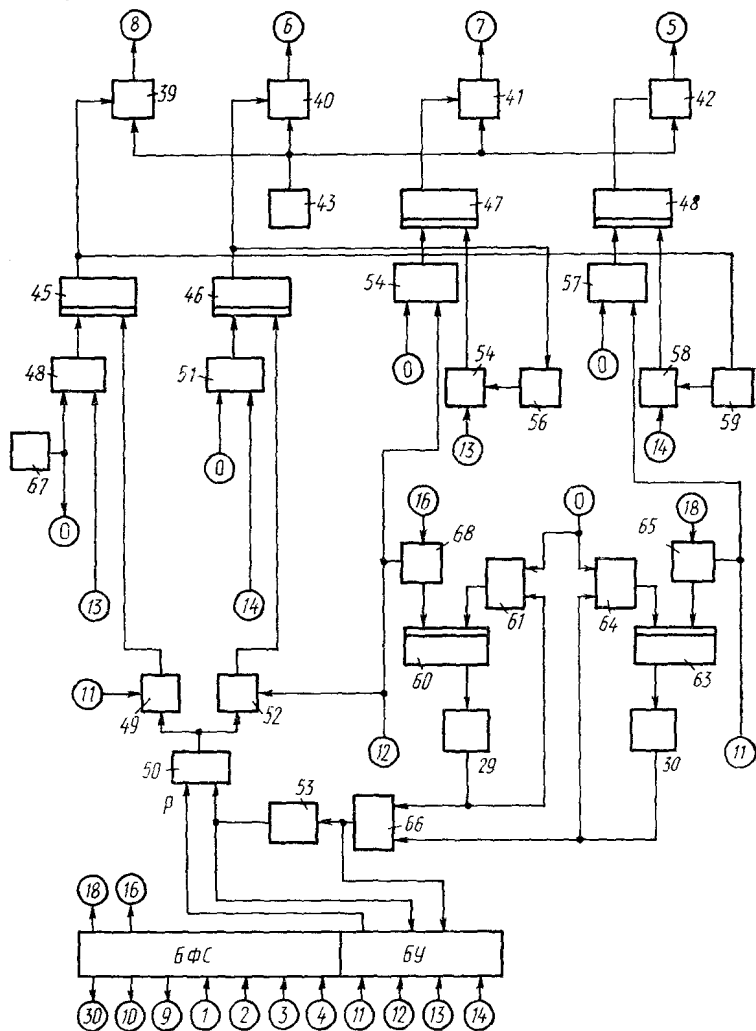


Рис. 5.4. Структурная схема станка для последовательной обработки зубчатых колес: *а* – схема привода станка; *б* – блок-схема цикловой автоматики

ного золотника 12. Потенциальные (управляющие) входы ключей 39–42 соединены с выходами триггеров (Т) соответственно 44–47.

Первый вход Т 44 соединен с выходом элемента ИЛИ 48, у которого второй вход соединен с ВК 32. Второй вход Т 45 соединен с выходом элемента И 49, у которого первый вход соединен с ВК 31, а второй вход – с выходом элемента ИЛИ 50. Первый вход Т 46 соединен с выходом элемента ИЛИ 51, соединенного вторым входом с ВК 34. Второй вход Т 46 соединен с выходом элемента И 52, у которого первый вход соединен с ВК 33, а второй вход – с выходом элемента ИЛИ 50. Первый вход элемента ИЛИ 50 соединен с БУ, а второй – с выходом реле времени (РВ) 53. Первый вход Т 47 соединен с выходом элемента ИЛИ 54, у которого второй вход соединен с ВК 33. Второй вход Т 47 соединен с выходом элемента И 55, соединенного первым входом с ВК 32, а вторым входом через элемент НЕ 56 – с выходом Т 46. Первый вход Т 48 соединен с выходом элемента ИЛИ 57, соединенного вторым входом с ВК 31. Второй вход Т 48 соединен с выходом элемента И 58, у которого первый вход соединен с ВК 34, а второй вход через элемент НЕ 59 – с выходом Т 45. Первый вход Т 60 соединен с выходом элемента ИЛИ 61, соединенного вторым входом с выходом СЗ 29 (рис. 5.4, а). Второй вход Т 60 соединен с выходом элемента И 62, у которого первый вход соединен с ВК 33, а второй вход – с БФС. Выход Т 60 соединен с входом СЗ 29. Первый вход Т 63 соединен с выходом элемента ИЛИ 64, соединенного вторым входом с выходом СЗ 30. Второй вход Т 63 соединен с выходом элемента И 65, у которого первый вход соединен с ВК 31, а второй вход – с БФС. Выход Т 63 соединен с входом СЗ 30. Выходы СЗ 29 и 30 соединены также с входами элемента ИЛИ 66, выход которого соединен с РВ 53 и БУ. Первые входы элементов ИЛИ 48, 51, 54, 57, 61, 64 соединены с блоком начальной установки 67 триггеров.

Рассмотрим цикл взаимодействия исполнительных органов станка. После включения схемы цикловой автоматики триггеры 45–48, 60, 63 устанавливаются в исходное состояние сигналом с блока 67 начальной установки через соответствующие элементы ИЛИ. При подаче с БУ управляющего сигнала Р на первый вход элемента ИЛИ 50 этот сигнал после прохождения через открытый по первому входу сигналом от ВК 31 элемент И 49 поступает на второй вход Т 45. На его выходе устанавливается сигнал, открывающий К 39, который соединяет с блоком питания электромагниты 7 и 16 реверсивных золотников 6 и 12. Электромагниты перемещают

плунжеры золотников, и поток масла из гидростанции 5 поступает в гидроцилиндры 4 и 10. Гидроцилиндр 4 сообщает ускоренное перемещение $П_4$ (на рис. 5.4, а влево) продольному столу 1, а гидроцилиндр 10 выводит свою ползушку в исходное положение. При набегании упора 36 на ВК 32 на последнем появляется сигнал, который поступает через элемент ИЛИ 48 на первый вход Т 45 и на первый вход элемента И 55. Сигнал на выходе Т 45 сбрасывается и ключ Т 39 отключает электромагниты 7 и 16. Одновременно сигнал, поступивший на первый вход элемента И 55, открытого по второму входу сигналом с выхода элемента НЕ 56, поступает на второй вход Т 47, устанавливая на его выходе сигнал, открывающий К 41. Этот ключ соединяет с блоком питания электромагнит 13 реверсивного золотника 11, который обеспечивает поток масла из гидростанции 5 в рабочую полость гидроцилиндра подачи врезания 9. В итоге продольный стол 1 в движении $П_4$ переключается с ускоренного хода на подачу врезания. Одновременно сигнал с ВК 32 через БУ поступает в БФС, который включает электродвигатель M_1 привода поступательно-возвратного движения $П_1$ долбяка, электродвигатель M_4 привода круговой подачи долбяка и электродвигатель M_2 привода круговой подачи делительного стола 2. При этом БФС обеспечивает согласование круговой подачи B_3 делительного стола 2 с круговой подачей B_2 долбяка и подачей врезания $П_4$ продольного стола.

Этап врезания продолжается до набегания упора 37 на ВК 33. Сигнал, появившийся на ВК 33, поступает на первые входы элементов И 52, 62 и через элемент ИЛИ 54 – на первый вход Т 47. На выходе Т 47 сигнал сбрасывается, К 41 отключает электромагнит 13 реверсивного золотника 11 и продольный стол 1 останавливается. Одновременно сигнал с ВК 33 поступает в БФС для перестройки функциональных связей делительного стола 2 с этапа врезания на этап профилирования (круговая подача стола уменьшается на составляющую, соответствующую этапу врезания). Сигнал, поступивший на первый вход элемента И 62, открытый по второму входу сигналом с БФС после перестройки функциональных связей, проходит на второй вход Т 60, устанавливая на его выходе сигнал, который включает СЗ 29.

Этап профилирования продолжается в течение одного оборота делительного стола 2 после прекращения врезания.

На этом этапе устанавливается очередная заготовка на делительном столе 3. По окончании профилирования на выходе СЗ 29 появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 66 поступает в БУ для вывода долбяка в крайнее верхнее положение, включает РВ 53 и одновременно через элемент ИЛИ 61 поступает на первый вход Т 60. На его выходе сигнал сбрасывается и СЗ 29 отключается.

РВ 53 задерживает начало повторения цикла обработки на другом делительном столе из исходного положения, соответствующего наличию сигнала на ВК 33, на время, необходимое для вывода долбяка в верхнее положение.

Сигнал с выхода РВ поступает в БУ для подготовки БФС к перестройке ее структуры и одновременно через элементы ИЛИ 50, И 52 поступает на второй вход Т 46, устанавливая на его выходе сигнал, который посредством К 40 соединяет с блоком питания электромагниты 8 и 14 реверсивных золотников 6 и 11. Плунжеры этих золотников перемещаются и поток масла поступает в гидроцилиндры 4 и 9. Гидроцилиндр 4 сообщает ускоренное перемещение P_4 (на рис. 5.4, а, вправо) продольному столу 1, а гидроцилиндр 9 выводит ползушку в исходное положение. При набегании упора 38 на ВК 34 на последнем появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 51 поступает на первый вход Т 46 и на первый вход элемента И 58, открытого по второму входу сигналом с элемента НЕ 59. На выходе Т 46 сигнал сбрасывается, К 40 отключает электромагниты 8 и 14 и поток масла в гидроцилиндры 4 и 9 перекрывается. С выхода элемента И 58 сигнал поступает на второй вход Т 48, устанавливая на его выходе сигнал, включающий посредством К 42 реверсивный золотник 12, открывающий поток масла в гидроцилиндр 10 подачи врезания. В итоге продольный стол переключается с ускоренного хода на подачу врезания. Одновременно сигнал с ВК 34 перестраивает структуру БФС, по командам с которого включаются электродвигатель M_1 привода движения P_1 долбяка, электродвигатель M_3 круговой подачи B_3 делительного стола 3 и реверсируется электродвигатель круговой подачи B_2 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 ограничи-

ваться набеганием упора 35 на ВК 31, а один оборот делительного стола 3 будет отсчитываться СЗ 30, включаемым сигналом с ВК 31 через элемент И 65. После обработки заготовки на делительном столе 3 сигнал с выхода РВ перестраивает схему управления для обработки очередной заготовки на столе 2 и т. д.

По циклу работы станка обработке каждой последующей заготовки предшествует реверс круговой подачи долбяка. Этот в данном случае обязательный прием обеспечивает равномерный износ зубьев долбяка, что приводит к повышению стойкости долбяка.

5.3. Кинематическая структура двухстоловых станков для параллельной зубообработки

При обсуждении исходного способа зубодолбления с касательным врезанием было показано, что на его основе возможны схемы двух производных способов (см. рис. 2.6 и 2.7), позволяющие одним стандартным долбяком обрабатывать одновременно (параллельно) две заготовки. В данном параграфе рассмотрим различные варианты реализации названных схем в кинематической структуре зубодолбежных станков.

На рис. 5.5 приведена кинематическая подсистема двухстолового зубодолбежного станка, у которого делительные столы расположены симметрично плоскости движения врезания [21].

Структура станка состоит из кинематических групп: скорости резания $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$, обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$, касательного врезания $Bp(\Pi_4 \equiv B_6)$, «отскока» делительных столов $Bc(\bar{\Pi}_5)$. Группа $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ – традиционная для станков анализируемого класса.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ – сложная. Ее внутренняя связь

$$B_2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow i_x \rightarrow 3 \begin{cases} \nearrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow B_3 \\ \searrow 8 \rightarrow \Sigma \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow B_3 \end{cases}$$

представляет собой цепь обката (профилирования), кинематически связывающую шпиндель 1 долбяка с делительными столами 7 и 11. Внешняя связь $M_2 \rightarrow 3$ связывает регулируемые

мый электродвигатель M_2 через звено соединения связей 3 с цепью обката. Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на круговую подачу – изменением круговой частоты электродвигателя M_2 .

Группа касательного врезания $Vp(\Pi_4 \equiv B_6)$ включает внутреннюю связь

$$\begin{aligned} \Pi_4 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow i_y \rightarrow 14 & \begin{cases} \nearrow 15 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow B_6 \\ \searrow 16 \rightarrow \Sigma \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow B_6 \end{cases} \end{aligned}$$

которая представляет собой цепь обката, воспроизводящую

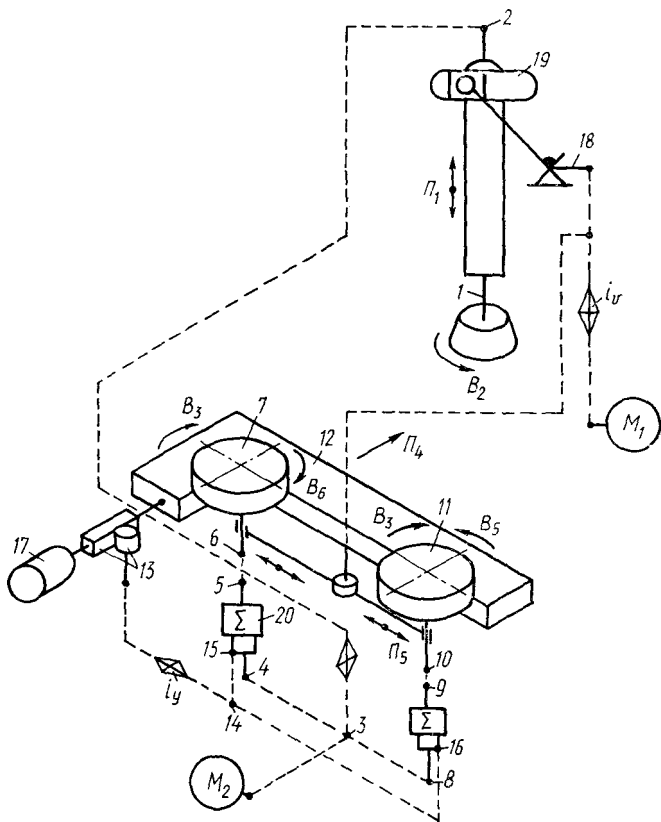


Рис. 5.5. Кинематическая структура станка для одновременной обработки двух зубчатых колес

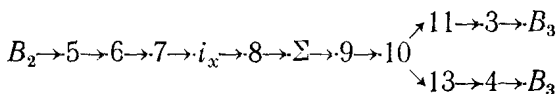
зубчато-реечную передачу и предназначенную для согласования движения врезания P_4 с дополнительным поворотом делительных столов 7 и 11. Внешняя связь сообщает энергию движения от гидроцилиндра 17 во внутреннюю связь через звено соединения связей, функцию которого выполняет рейка зубчато-реечной передачи 13. Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на скорость – изменением потока в гидроцилиндре 17.

Группа «отскока» $B_c(\bar{P}_5)$ – простая и включает две одинаковые внутренние связи, выполненные в виде двух одинаковых поступательных пар корпуса делительных столов 7, 11 – направляющих продольного стола 12. Внешняя связь выполнена в виде ненастраиваемой цепи, связывающей ведущий вал 18 кулисного механизма 19 внешней связи группы $\Phi_v(\bar{P}_1)$ с кулачком 20, обеспечивающим «отскок» P_5 делительных столов 7 и 11.

В движении профилирования $B_2 \equiv B_3$ делительные столы вращаются в одну сторону, а в движении касательного врезания (обкат зубчатого колеса по рейке) – в противоположные стороны. Следовательно, на этапе врезания суммарная круговая подача делительных столов различна. Поэтому для данной схемы оптимальный режим подач на этапе врезания – регрессивное убывание подачи врезания и одновременно прогрессивное возрастание круговой подачи (см. рис. 2.8). Создание такого режима подач при использовании современных регулируемых электрических и гидравлических приводов является достаточно простой задачей.

Одинаковые условия резания на обоих делительных столах обеспечивает схема, приведенная на рис. 5.6 [21]. Рассматриваемая структура отличается от предшествующей тем, что ее продольные столы 1 и 2, несущие делительные столы соответственно 3 и 4, на этапе врезания перемещаются навстречу друг другу. В предлагаемой структуре по сравнению с предшествующей группы обката и врезания имеют иную компоновку. Поэтому остановимся только на этих группах.

Группа обката $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ включает внутреннюю связь



представляющую собой цепь обката, связывающую шпиндель 1 с делительными столами 3 и 4 . Внешняя связь – короткая кинематическая цепь, соединяющая регулируемый электродвигатель M_2 с внутренней связью через звено 7 . Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на скорость – изменением круговой частоты электродвигателя M_2 .

Группа врезания $B_p(\Pi_4 \equiv B_6)$ – сложная. Ее внутренняя связь

$$\begin{array}{l} \Pi_4 \rightarrow 1 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow i_y \rightarrow 17 \rightarrow \Sigma \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 3 \rightarrow B_6 \\ \Pi_4 \rightarrow 2 \rightarrow 18 \rightarrow 13 \rightarrow 4 \rightarrow B_6 \end{array}$$

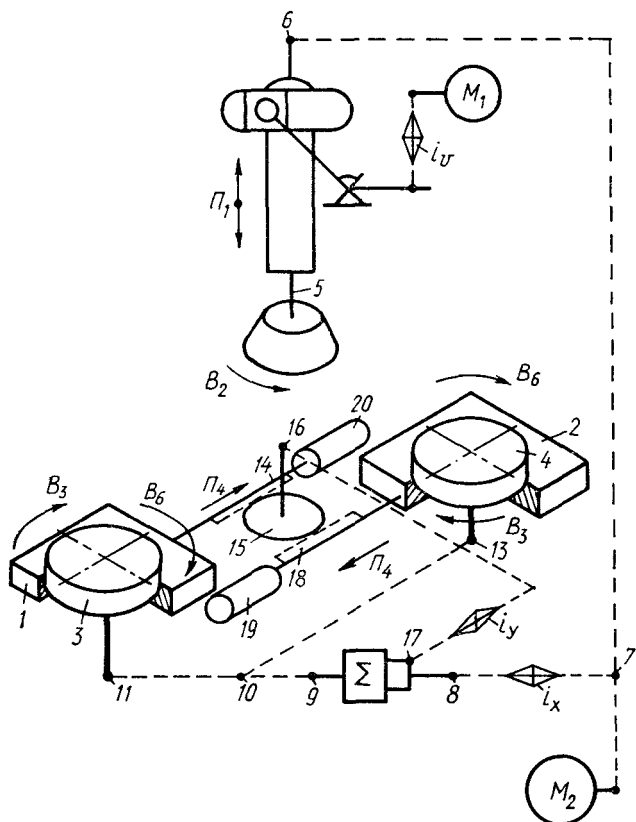
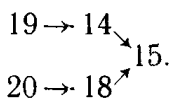


Рис. 5.6. Структурная схема станка со встречным движением делительных столов

Внешняя связь включает два гидроцилиндра 19 и 20, сообщающих движение во внутреннюю связь через реечно-зубчатые передачи 14–15 и 18–15:



Звено соединения связей данной группы – реечное колесо 15. Таким образом, группа врезания объединяет две отдельные одинаковые подгруппы, одна из которых обеспечивает согласование движений продольного стола 1 с делительным столом 3, а другая – продольного стола 2 с делительным столом 4. Обе подгруппы имеют общий участок во внутренних связях $15 \rightarrow 16 \rightarrow i_y \rightarrow 17 \rightarrow \Sigma \rightarrow 9 \rightarrow 10$, содержащий общий орган настройки i_y на траекторию. Одинаковые внешние связи обеих подгрупп объединены реечным колесом 15, которое выполняет функцию синхронизатора движений врезания.

При согласованном движении штоков гидроцилиндров, обеспечивающих встречные движения P_4 продольных столов и согласованные с ними вращения B_6 делительных столов, реечное колесо 15 поворачивается вокруг своей неподвижной оси без нагрузки. При рассогласовании скоростей этих движений, вызванном изменением нагрузки какого-либо из цилиндров, часть тягового усилия, развиваемого недогруженным (опережающим) цилиндром, будет передаваться через реечное колесо 15 и соответствующую рейку на шток отстающего цилиндра, добавляясь к усилию, развиваемому этим цилиндром. В результате движения врезания будут выполняться строго синхронно.

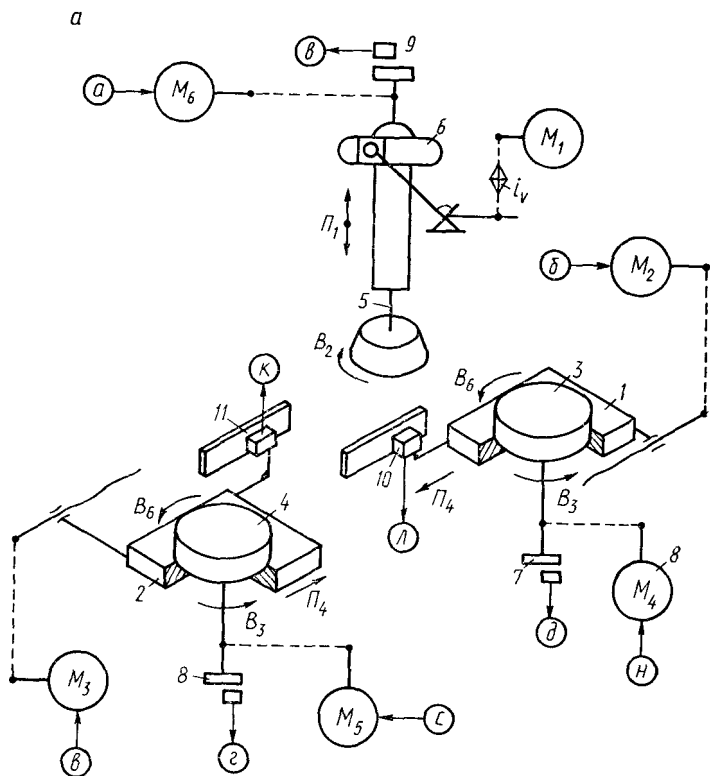
В рассмотренных структурных схемах вместо механических связей могут использоваться электронные на базе интегральных схем, например система отслеживающей синхронизации. Приведем решение такой задачи для второй схемы, так как в этом случае необходимо одновременно посредством электронных блоков обеспечить функцию, выполняемую в схеме по рис. 5.6 реечным колесом 15. Соответствующая структурная схема приведена на рис. 5.7 [9].

Продольные столы 1 и 2, несущие делительные столы 3 и 4, расположены симметрично относительно штосселя 5 долбяка с возможностью движения навстречу друг другу. Приводы столов продольных 1 и 2 и делительных 3 и 4 осу-

осуществляются от отдельных управляемых электродвигателей M_2, M_3, M_4, M_5 . Вращательное движение шпинделя 5 осуществляется от электродвигателя M_6 , а его поступательно-возвратное движение – от кулисного механизма б, кинематически связанного с электродвигателем M_1 .

Для связи с системой синхронизации исполнительные органы оснащены ИИП: круговыми 7–9, установленными на делительных столах 3, 4 и шпинделе 5, и линейными 10 и 11 – на продольных столах 1 и 2.

Система отслеживающей синхронизации (рис. 5.7, б) выполнена по схеме задающая – ведомая координаты. Шпиндель 5 является задающей координатой для обоих делительных столов 3 и 4, продольный стол 1 – задающей координатой для делительного стола 3, а продольный стол 2 – для делительного стола 4. Электродвигатели M_2, M_3, M_6 задающих



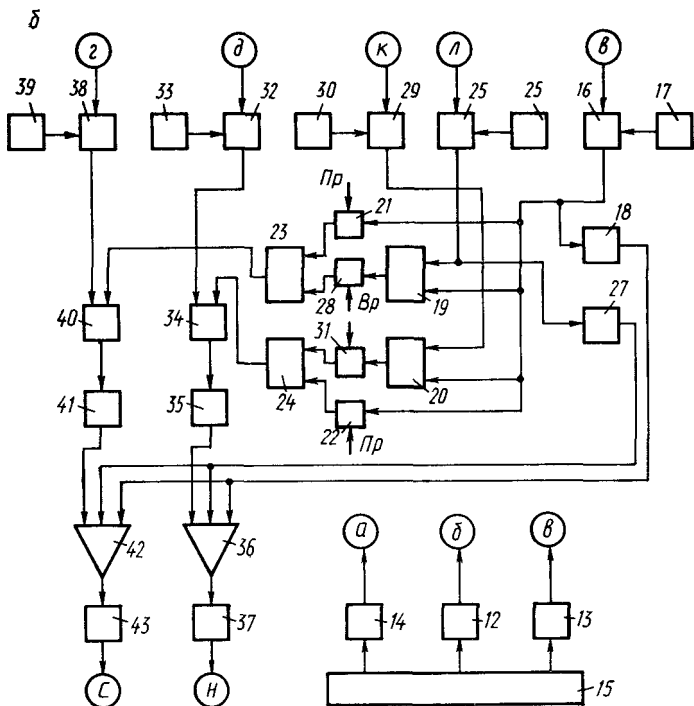


Рис. 5.7. Структура станка с двумя делительными столами: *а* – схема приводов; *б* – блок-схема системы синхронизации приводов

координат соединены с силовыми преобразователями 12–14 соответственно, входы которых соединены с блоком 15 задатчиков.

Канал первой задающей координаты содержит круговой ИИП 9, установленный на шпинделе 5 и соединенный со счетчиком 16, к которому подключен блок ПО 17. Выход счетчика 16 соединен с блоком КП 18 и вторыми входами сумматоров 19, 20 и через элементы И 21, 22 – с первыми входами элементов ИЛИ 23 и 24.

Канал второй задающей координаты содержит линейный ИИП 10, установленный на продольном столе 1 и соединенный со счетчиком 25, к которому подключен блок ПО 26. Выход счетчика 25 соединен с блоком ПВ 27 и первым входом сумматора 19, выход которого через элемент И 28 соединен со вторым входом элемента ИЛИ 23.

Канал третьей задающей координаты содержит линейный ИИП 11, установленный на продольном столе 2 и соединенный со счетчиком 29, к которому подключен блок ПО 30. Выход счетчика 29 соединен с первым входом сумматора 20, выход которого через элемент И 31 соединен со вторым входом элемента ИЛИ 24.

Канал первой ведомой координаты содержит ИИП 7, установленный на делительном столе 3 и соединенный со счетчиком 32, к которому подключен блок ПО 33. Выход счетчика 32 соединен с первым входом ФД 34, второй вход которого соединен с выходом элемента ИЛИ 24, а выход через ИАП 35 – с первым входом СУ 36. Второй вход СУ 36 соединен с блоком КП 18, третий вход – с блоком ПВ 27, а выход через УМ 37 – с электродвигателем M_4 первой ведомой координаты (делительным столом 3).

Канал второй ведомой координаты содержит ИИП 8, установленный на делительном столе 4 и соединенный со счетчиком 38, к которому подключен блок ПО 39. Выход счетчика 38 соединен с первым входом ФД 40, второй вход которого соединен с выходом элемента ИЛИ 23, а выход через ИАП 41 – с первым входом СУ 42. Второй и третий входы СУ 42 соединены соответственно с блоком КП 18 и блоком ПВ 27, а выход через УМ 43 – с электродвигателем M_5 , второй ведомой координаты (делительным столом 4).

Функциональная связь шпинделя 5 и делительных столов 3 и 4 осуществляется посредством канала первой задающей координаты и обоих каналов ведомых координат. Эта связь воспроизводит станочное зубчатое зацепление, соответствующее зацеплению долбяка и обрабатываемого зубчатого колеса, и определяет этап профилирования зубчатых колес. Передаточное отношение связи задается блоками 17 и 33 для первой ведомой координаты и блоками 17 и 39 для второй ведомой координаты. Круговая подача обоих делительных столов устанавливается блоком КП 18.

Функциональная связь этапа врезания между продольным столом 1 и делительным столом 3 выполняется каналом второй задающей координаты и первой ведомой координаты, а связь между продольным столом 2 и делительным столом 4 – каналом третьей задающей координаты и второй ведомой координаты. Эти связи воспроизводят зубчато-реечное зацепление. Передаточное отношение задается блоками 26, 33

и 30, 39 соответственно. Круговая подача обоих делительных столов для этапа врезания устанавливается блоком ПВ 27.

Работа станка осуществляется следующим образом. Первый этап – врезание. По команде «Ускоренный ход» включаются электродвигатели M_2 и M_3 второй и третьей задающих координат. После перемещения продольных столов 1 и 2 в исходные для врезания положения по команде «Врезание» электродвигатели M_2 и M_3 переключаются на рабочую круговую частоту, соответствующую подаче врезания $П_4$ продольных столов. Одновременно включаются привод поступательно-возвратного движения $П_1$ шпинделя долбяка и электродвигатель M_6 первой задающей координаты (движение B_2 долбяка), а на элементы И 28, И 31 подается потенциал ВР, который открывает их по управляющим входам.

ИИП 9, 10, 11 соответствующих задающих координат вырабатывают высокочастотные импульсные сигналы, которые поступают в счетчики 16, 25, 29, где происходит их деление согласно заданным передаточным отношениям. Сигнал с выхода счетчика 16 запускает блок КП 18 и одновременно поступает на вторые входы сумматоров 19 и 20. Сигнал с выхода счетчика 25 запускает блок ПВ 27. Сигналы с выходов счетчиков 25 и 29 одновременно поступают на первые входы сумматоров 19 и 20. Блоки КП 18 и ПВ 27 вырабатывают аналоговые сигналы, пропорциональные частотам сигналов, действующих на их входах. С выходов блоков КП 18 и ПВ 27 аналоговые сигналы поступают соответственно на вторые и третьи входы СУ 36 и 42. Парно складываясь, эти сигналы через УМ 37 и 43 приводят во вращательное движение электродвигатели M_4 и M_5 делительных столов 3 и 4. В результате делительные столы получают начальное вращательное движение, состоящее из суммы движений B_3 и B_6 . Движение B_3 совместно с движением B_2 долбяка образует движение обката, воспроизводящее зубчатое зацепление, а движение B_6 совместно с движением $П_4$ продольных столов воспроизводит зубчато-реечное зацепление.

ИИП 7 и 8 ведомых координат вырабатывают импульсные сигналы, которые после деления в счетчиках 32 и 38 поступают на первые входы ФД 34 и 40. На второй вход фазового дискриминатора 34 через элемент ИЛИ 27 и элемент И 31 поступает сигнал с сумматора 20, равный сумме сигналов

счетчиков 16 и 29 первой и третьей задающих координат, а на второй вход ФД 40 через элемент ИЛИ 23 и элемент И 28 – сигнал с сумматора 19, равный сумме сигналов счетчиков 16 и 25. В результате сравнения в ФД 34 и ФД 40 прямых сигналов, поступающих от сумматоров, и сигналов обратной связи, поступающих от счетчиков ведомых координат, на их выходах образуются корректирующие сигналы, которые после преобразования в ИАП 35 и 41 поступают на первые входы СУ 36 и 42 для коррекции задающих сигналов управления электродвигателями M_4 и M_5 ведомых координат.

После завершения врезания электродвигателя M_2 и M_3 отключаются и продольные столы 1 и 2 останавливаются и фиксируются. Управляющий потенциал ВР с элементов И 28 и 31 снимается, а на элементы И 21 и И 22 подается управляющий потенциал ПР. При перестройке схемы вторая и третья задающие координаты отключаются. Отключается также блок ПВ 27 и сумматоры 19 и 20. Движение делительных столов 3 и 4 замедляется, так как прекращается движение B_6 из-за прекращения движения $П_4$ продольных столов.

Второй этап – профилирование. При продолжающемся движении обката (профилирования) $B_2 \equiv B_3$ делительных столов и шпинделя долбяка сигнал со счетчика 16 первой задающей координаты поступает на ФД 34 и 40 соответственно через элементы И 22, ИЛИ 24 и И 21, ИЛИ 23. В ФД 34 и 40 выполняется сравнение сигналов, соответствующих движениям B_2 и B_3 задающей и ведомых координат. Корректирующие сигналы с выходов ФД после преобразования в аналоговую форму поступают на первые входы СУ 36 и 42, где происходит коррекция задающих сигналов управления ведомыми координатами на этапе профилирования. Этап профилирования осуществляется в течение одного оборота делительных столов. После завершения профилирования заготовок приводы задающей координаты и ведомых координат выключаются, управляющий потенциал ПР снимается с элементов И 21, 22, долбяк выводится в крайнее верхнее положение и продольные столы на ускоренном ходу отводятся в исходное положение для замены заготовки и повторения цикла.

В приводах подачи металлорежущих станков, в том числе зубодолбежных, основным типом электродвигателей явля-

ется высокомоментная машина постоянного тока. В таких приводах однозонное автоматическое регулирование круговой частоты производится посредством обратных связей по скорости (главная обратная связь) и току якоря (дополнительная обратная связь). Для этого в электродвигатели встраивают соответствующие датчики, например тахогенератор для главной обратной связи. Вместе с тем типовое автоматическое регулирование круговых частот электродвигателей не обеспечивает одинаковость (синхронность) движения двух исполнительных органов равнозначных задающих координат. В рассмотренной структурной схеме двухстолового станка такими координатами являются продольные столы, так как условия трения в однотипных механических системах редуктор – исполнительный орган не одинаковы и, следовательно, девиация их движения различна. В итоге один из исполнительных органов (в данном случае один из продольных столов) будет отставать, что нежелательно с точки зрения получения зубчатых колес неодинакового качества на различных столах. Рассмотрим возможные пути устранения этого явления.

На рис. 5.8 приведен первый вариант решения данной задачи.

Для управления приводами подач двух равнозначных координат задающий сигнал формируется в задатчике 1 в виде напряжения. В качестве задатчика в управляемых приводах станков используется источник питания со ступенчатым изменением выходного напряжения. Выход задатчика 1 соединен с входами сложений вычитателей 2 и 3. Выход вычитателя 2 через последовательно соединенные регулятор положения (РП) 4, регулятор скорости (РС) 5 и УМ 6 соединен с управляемым электродвигателем 7, а выход вычитателя 3 через последовательно соединенные РП 8, РС 9 и УМ 10 – с управляемым электродвигателем 11.

В электродвигатели 7 и 11 встроены тахогенераторы (ТГ) 12 и 13 соответственно, являющиеся датчиками обратной связи по скорости. Выходы ТГ 12 и 13 соединены с входами РС 5 и 9. Возможны также контуры регулирования по току якоря. В этом случае регуляторы тока размещаются между РС 5, 9 и УМ 6, 10. В качестве РП 4 и 8 используются П-регуляторы, а в качестве РС 5 и 9 – ПИ-регуляторы.

Электродвигатели 7 и 11 посредством редукторов 14 и 15

кинематически связаны с исполнительными органами 16 и 17 равнозначных координат. На исполнительных органах 16 и 17 установлены ИИП 18 и 19.

Выход ИИП 18 соединен с первыми входами ФД 20 и знакового дискриминатора (ЗД) 21, выход ИИП 19 – со вторыми входами ФД 20 и ЗД 21, выход ФД 20 через ИАП 22 – с аналоговыми входами ключей 23 и 24, управляемых положительным потенциалом, выход ЗД 21 – с входом инвертора

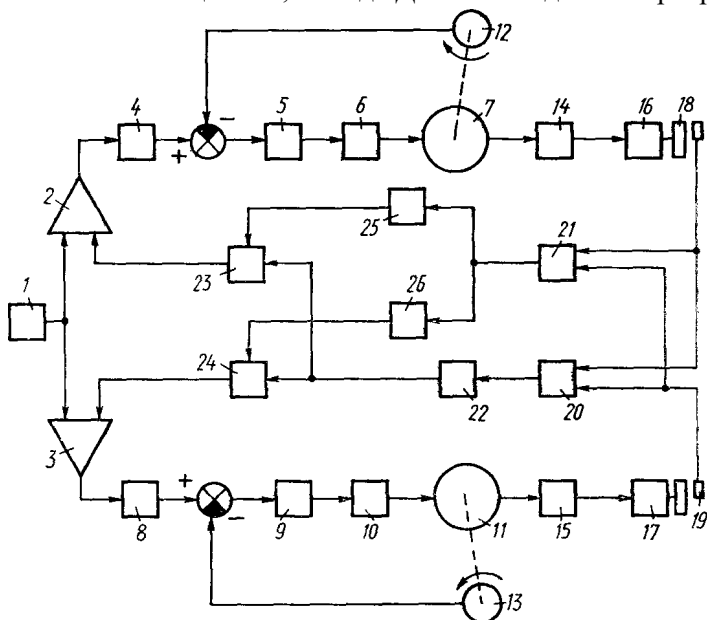


Рис. 5.8. Блок-схема системы синхронизации движений равнозначных координат (первый вариант)

25 и с входом повторителя 26, выход инвертора 25 – с управляющим входом ключа 23, а выход повторителя 26 – с управляющим входом ключа 24. Выходы ключей 23 и 24 соединены с входами вычитания вычитателей соответственно 2 и 3.

Схема работает следующим образом. Задающий сигнал с задатчика 1 одновременно поступает через вход сложения вычитателей 2 и 3, РП 4 и 8, РС 5 и 9, УМ 6 и 10 на электродвигатели 7 и 11. В результате оба электродвигателя приводятся во вращательное движение с круговой частотой, определяемой задающим сигналом. При этом круговые частоты

обоих электродвигателей отдельно автоматически регулируются за счет обратных связей по скорости.

Через соответствующие редукторы электродвигатели 7 и 11 сообщают движение исполнительным органам 16 и 17. Действительные скорости и мгновенные положения обоих исполнительных органов различаются из-за различных условий трения в парах трения и различной жесткости механических систем. Поэтому с началом движения формируется разностный сигнал, пропорциональный мгновенному значению разности действительных скоростей (положений) исполнительных органов для коррекции синфазности их перемещения.

ИИП 18 и 19 вырабатывают импульсные сигналы – аналоги действительных скоростей исполнительных органов 16 и 17. Сигналы с преобразователей поступают на входы ФД 20 и ЗД 21. На выходе ФД 20 образуется импульсный сигнал, пропорциональный абсолютной разности положений или действительных скоростей исполнительных органов, который после преобразования в ИАП 22 в аналоговую форму поступает на аналоговые входы ключей 23 и 24.

Одновременно на выходе ЗД 21 образуется сигнал «-» при отставании исполнительного органа 17 или сигнал «+» при отставании исполнительного органа 16. Знаковый сигнал с выхода ЗД 21 повторяется по знаку на выходе повторителя 26 и параллельно инвертируется на выходе инвертора 25. В результате на управляющих входах ключей 23 и 24 действуют противоположные по знаку потенциалы. При этом открывается ключ, на управляющий вход которого поступает положительный потенциал. Например, при отставании исполнительного органа 17 открывается ключ 23. Через него на вход вычитателя вычитателя 2 проходит сигнал, пропорциональный разности действительных положений исполнительных органов. В итоге на выходе вычитателя 2 задающий сигнал уменьшается, пропорционально снижается и скорость исполнительного органа 16. При изменении знака на выходе ЗД 21 аналогично изменяется скорость исполнительного органа 17. Таким образом, обеспечивается синхронизация перемещений обеих равнозначных координат.

На рис. 5.9 приведен второй вариант решения той же задачи.

Задатчик 1 соединен с первыми входами сложения параллельных сумматоров (ПС) 2 и 3. Выход ПС 2 через последовательно соединенные РП 4, РС 5 и УМ 6 соединен с управляемым электродвигателем 7, а выход ПС 3 через последовательно соединенные РП 8, РС 9 и УМ 10 – с управляемым электродвигателем 11. Обратная связь по скорости электродвигателей осуществляется посредством ТГ 12 и 13, выходы

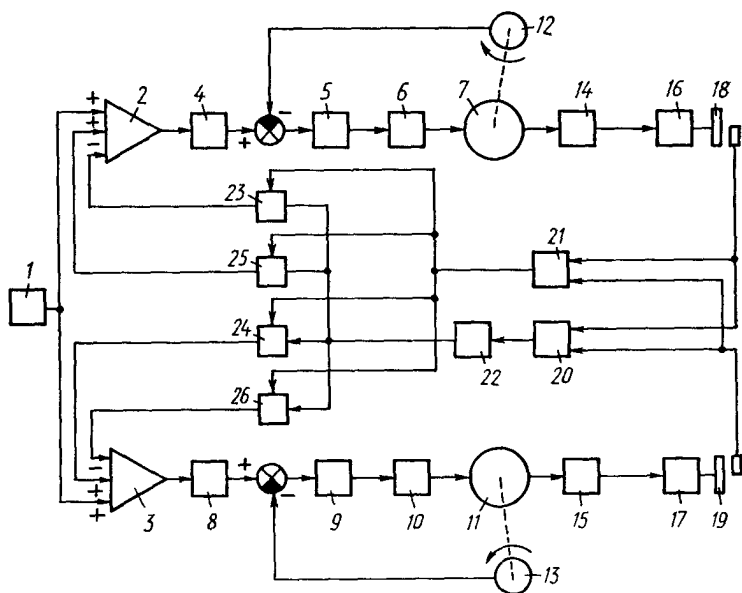


Рис. 5.9. Блок-схема системы синхронизации движений равнозначных координат (второй вариант)

которых соединены с входами РС соответственно 5 и 9.

Электродвигатели 7 и 11 редукторами 14 и 15 кинематически связаны с исполнительными органами 16 и 17, на которых установлены ИИП 18 и 19. Выход ИИП 18 соединен с первыми входами ФД 20 и ЗД 21, а выход ИИП 19 – со вторыми входами этих дискриминаторов. Выход ФД 20 через ИАП 22 соединен с аналоговыми входами ключей 23–26. Ключи 23 и 24 управляются отрицательным потенциалом, а ключи 25 и 26 – положительным потенциалом. Управляющие входы ключей соединены с выходом ЗД 21.

Выходы ключей 23 и 25 соединены соответственно с входом вычитания и вторым входом сложения ПС 2, а выходы ключей 24 и 26 – соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания ПС 3.

Синхронизация положений обоих исполнительных органов осуществляется следующим образом. Задающий сигнал от задатчика 1 одновременно сообщается через ПС 2, РП 4, РС 5, УМ 6 электродвигателю 7 и через ПС 3, РП 8, РС 9, УМ 6 электродвигателю 11. Круговые частоты обоих электродвигателей независимо друг от друга за счет собственных обратных связей по скорости соответственно ТГ 12 – РС 5 и ТГ 13 – РС 9 автоматически регулируются.

Электродвигатели 7 и 11 через редукторы 14 и 15 сообщают движение исполнительным органам 16 и 17. В итоге исполнительные органы совершают движение со скоростью, пропорциональной сигналу задатчика. Одновременно выполняется взаимная коррекция движения исполнительных органов по положению, учитывающая неодинаковость условий трения механики обоих исполнительных органов.

ИИП 18 и 19 вырабатывают импульсные сигналы – аналоги действительных мгновенных скоростей или положений исполнительных органов 16 и 17. Эти сигналы для сравнения поступают на входы ФД 20 и ЗД 21. На выходе ФД 20 образуется импульсный сигнал, пропорциональный по частоте абсолютной разности действительных положений исполнительных органов, который преобразуется в ИАП 22 в аналоговую форму и поступает на аналоговые входы ключей 23, 24, 25, 26. Одновременно на выходе ЗД 21 образуется сигнал «–» при отставании исполнительного органа 17 или сигнал «+» при отставании исполнительного органа 16. Знаковый сигнал с выхода ЗД 21 поступает на управляющие входы ключей 23, 24, 25, 26, управляемые различным по знаку потенциалом. При этом открываются два ключа, управляемые одним и тем же сигналом по знаку. Например, при отставании исполнительного органа 17 на выходе ЗД 21 образуется отрицательный сигнал, который открывает ключи 23 и 24. Через ключ 23 корректирующий сигнал поступает на вход вычитания ПС 2, а через ключ 24 – на второй вход сложения ПС 3. В итоге на выходе ПС 2 задающий сигнал уменьшается, а на выходе ПС 3 возрастает. Пропорционально снижается скорость исполнительного органа 16 и возрастает ско-

рость исполнительного органа 17. При изменении знака на выходе ЗД 21, что соответствует отставанию исполнительного органа 16, открываются ключи 25 и 26. В итоге сигнал коррекции увеличивает задающий сигнал на выходе ПС 2 и уменьшает задающий сигнал на выходе ПС 3, пропорционально возрастает скорость исполнительного органа 16 и снижается скорость исполнительного органа 17.

Таким образом, за счет одновременного воздействия сигнала абсолютной разности мгновенных скоростей обоих исполнительных органов на их электродвигатели обеспечивается синфазность перемещений этих органов.

Рассмотренные варианты синхронизации двух равнозначных задающих координат основаны на общем принципе. Сущность его заключается в формировании корректирующего сигнала в виде абсолютной разности сигналов, соответствующих действительным значениям мгновенных положений исполнительных органов, и сообщении этой разности последним по конкретному алгоритму. Отметим, что оба варианта приемлемы только при совместной работе двух независимых равнозначных координат.

Третий вариант синхронизации основан на формировании корректирующего сигнала в виде абсолютной разности сигналов эталонного и соответствующего действительному значению мгновенного положения исполнительного органа и сообщении этой разности последнему. Таким образом, синхронизация равнозначных задающих координат осуществляется через их синхронизацию с эталонным источником. Очевидно, в данном случае возможна синхронизация произвольного количества равнозначных задающих координат.

На рис. 5.10 приведена блок-схема системы синхронизации равнозначных задающих координат через их синхронизацию с эталонным генератором.

Задающий сигнал, как и в предшествующих схемах, формируется в виде ступенчатого изменяющегося напряжения задатчиком 1, выход которого соединен с первыми входами СУ 2 и 3. Выход СУ 2 через РП 4, РС 5, УМ 6 соединен с управляемым электродвигателем 7, а выход СУ 3 через РП 8, РС 9, УМ 10 – с электродвигателем 11. Для автоматического регулирования электродвигателей по скорости использу-

ются обратные связи ТГ 12 – РС 5 и ТГ 13 – РС 9.

Электродвигатели 7 и 11 через редукторы 14 и 15 соединены с исполнительными органами 16 и 17 равнозначных задающих координат. На исполнительных органах 16 и 17 установлены соответственно ИИП 18 и 19. Выходы ИИП 18 и 19 соединены со вторыми входами ФД 20 и 21 соответственно, первые входы которых соединены с управляемым делителем

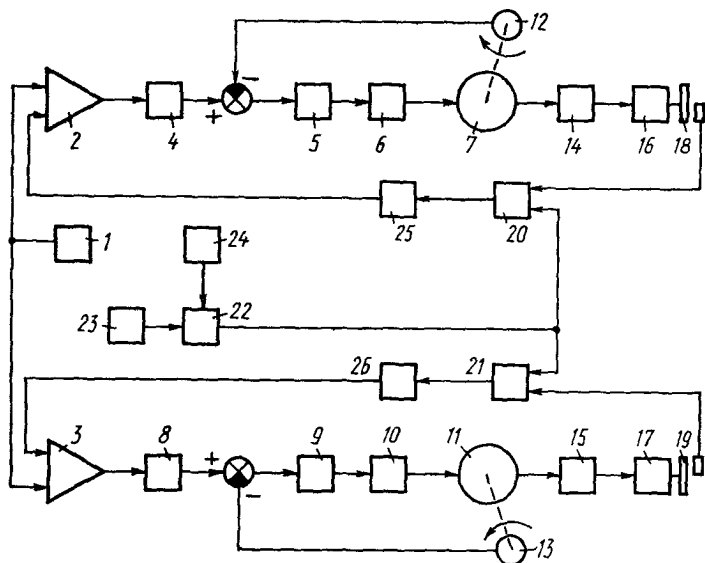


Рис. 5.10. Блок-схемы системы синхронизации движений равнозначных координат (третий вариант)

частоты, выполненным в виде счетчика 22 и блока ПО 23, устанавливающего коэффициент деления. Вход счетчика 22 соединен с выходом эталонного генератора (ЭГ) 24, выход ФД 20 через ИАП 25 – со вторым входом СУ 2, а выход ФД 21 – со вторым входом СУ 3.

ЭГ 24 может быть выполнен в виде схемы напряжение–частота. В этом случае его вход должен быть связан с выходом задатчика 1. Следовательно, частота выходного сигнала генератора будет ступенчато изменяться с изменением задающего сигнала. В данном случае управляемый делитель в схеме не нужен. Вместе с тем использование автономного ЭГ 24 и

управляемого делителя частоты обеспечивает более точную настройку схемы на всем диапазоне скоростей исполнительных органов.

Схема работает следующим образом. Задающий сигнал от задатчика сообщается параллельно через СУ 2, РП 4, РС 5, УМ 6 электродвигателю 7, а через СУ 3, РП 8, РС 9, УМ 10 – электродвигателю 11.

Электродвигатели 7 и 11 через редукторы сообщают движение исполнительным органам 16 и 17. В результате оба исполнительных органа обеих независимых координат совершают движение со скоростью, пропорциональной задающему напряжению. Одновременно осуществляется взаимная коррекция координат по положению, учитывающая неодинаковость механических систем обоих исполнительных органов.

ИИП 18 и 19 с началом движения исполнительных органов, вырабатывают импульсные сигналы с частотой, пропорциональной действительным значениям скоростей исполнительных органов. Эти сигналы поступают на первые входы ФД 20 и ФД 21. На вторые входы этих дискриминаторов поступают непрерывно сигналы с выхода счетчика 22 с эталонной частотой, соответствующей максимальному значению скоростей обоих исполнительных органов. В итоге на выходах ФД 20 и 21 образуются сигналы, равные абсолютной погрешности (отставанию) мгновенных значений действительных скоростей исполнительных органов от эталона. Эти сигналы поступают на вторые входы соответствующих СУ 2 и 3 для коррекции (увеличения) задающих сигналов. Таким образом, осуществляются коррекция скоростей обоих исполнительных органов по положению и одновременно их взаимная синхронизация по сигналу эталонного генератора.

5.4. Кинематическая структура роторных зубодолбежных станков

Кинематико-компоновочная схема роторного зубодолбежного станка для обработки зубчатых колес стандартными долбяками приведена на рис. 5.11 [8, 35].

Компоновка станка выполнена в виде станины 1 с колонной 2, на которой с возможностью вращения установлен ротор 3, имеющий форму полого цилиндра. На круговых

направляющих 4 торцевой поверхности ступени ротора большего диаметра установлены круговые столы 5 (в рассматриваемом примере показано три стола), несущие радиальные столы 6, на которых смонтированы делительные столы 7 для установки обрабатываемых заготовок. На вертикальных направляющих, расположенных на цилиндрической поверхности ротора, размещены инструментальные суппорты 8, количество которых равно числу делительных столов 7.

Структурная схема станка включает следующие кинематические группы: скорости резания $\Phi_v(\Pi_1)$, обката (профилирования) $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$, касательного врезания $Bp(B_4 \equiv B_5)$, транспортирования $Bc(B_6)$, «отскока» долбяка (не показана) $Bc(\Pi_7)$, позиционирования $\Pi_3(B_8)$. Количество групп скорости резания, обката, врезания, «отскока» долбяка и позиционирования равно количеству делительных столов.

Группы $\Phi_v(\bar{\Pi}_1)$ и $Bc(\bar{\Pi}_7)$ аналогичны соответствующим группам рассмотренных схем.

Группа $\Phi_s(B_2 \equiv B_3)$ – сложная. Ее внутренняя связь $B_2 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow i_x \rightarrow 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 7 \rightarrow B_3$ представляет собой цепь обката (профилирования), соединяющую шпиндель 9 долбяка с делительным столом 7. Внешняя связь $M_1 \rightarrow 14 \rightarrow i_s \rightarrow 15 \rightarrow 10$ сообщает энергию от электродвигателя M_1 во внутреннюю связь. Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_x , на круговую подачу – гитарой сменных зубчатых колес i_{s1} .

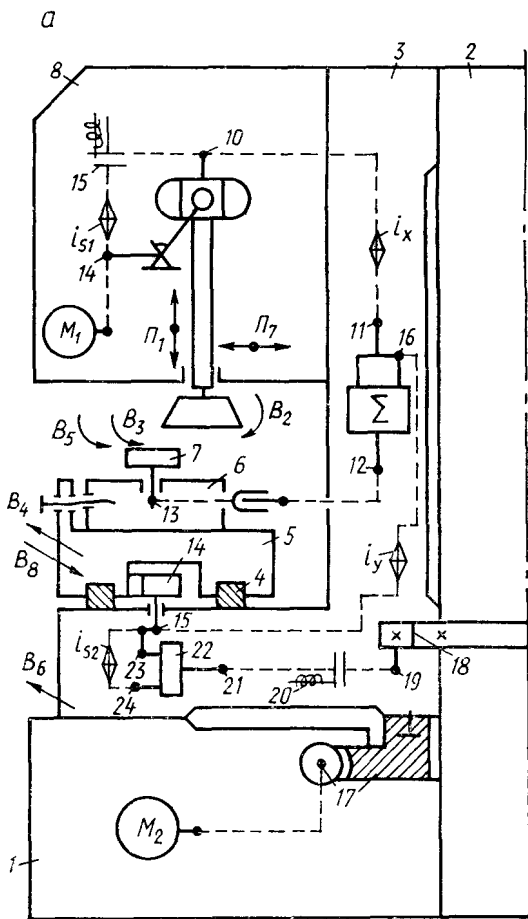
Группа $Bp(B_4 \equiv B_5)$ – сложная. Ее внутренняя связь $B_4 \rightarrow 5 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow i_y \rightarrow 16 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 7 \rightarrow B_5$ представляет собой кинематическую цепь, связывающую круговой 5 и делительный 7 столы. Внешняя связь $M_2 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 24 \rightarrow i_{s2} \rightarrow 15$ передает энергию от электродвигателя M_2 во внутреннюю связь через звено соединения связей 15. Группа настраивается на траекторию гитарой сменных зубчатых колес i_y , на подачу врезания – гитарой сменных зубчатых колес i_{s2} .

Группа $Bc(B_6)$ – простая. Ее внутренняя связь – элементарная вращательная пара станина 1 – ротор 3, а внешняя связь $M_2 \rightarrow 17 \rightarrow 3$. Звеном соединения связей служит ротор 3, т. е. подвижное звено вращательной пары внутренней связи. Таким образом, группа $Bc(B_6)$ одновременно является частью внешней связи группы врезания.

Группа позиционирования $\Pi_3(B_8)$ – простая. Ее внутрен-

няя связь — элементарная вращательная пара круговые направляющие 4 — продольный стол 5. Внешняя связь $M_2 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 23 \rightarrow 5$ соединяет электродвигатель M_2 с подвижным звеном внутренней связи, т. е. с продольным столом 5. Данная группа, как и группа транспортирования, органов настройки не имеет. Таким образом, внешняя связь группы позиционирования отличается от аналогичной связи группы врезания только отсутствием органа настройки на скорость.

Циклы обработки зубчатых колес на каждом делительном столе одинаковы, но смещены во времени на величину,



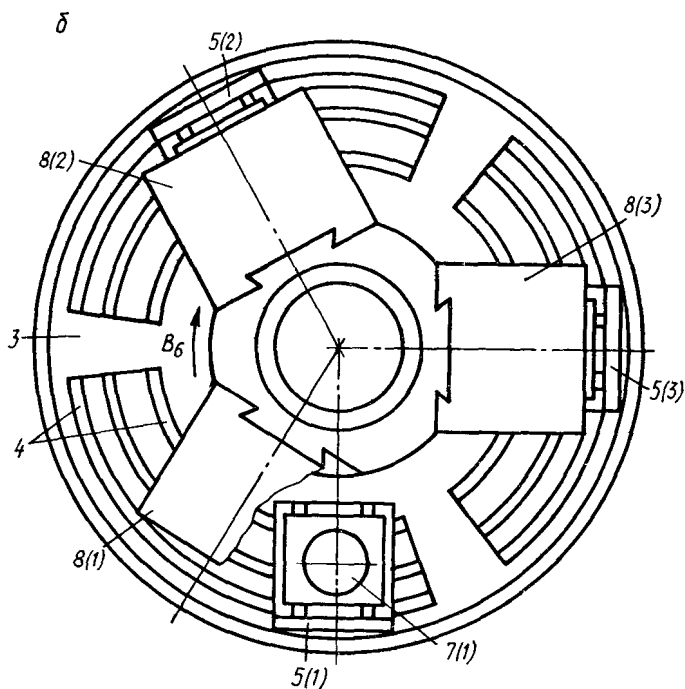


Рис. 5.11. Кинематико-компоновочная схема роторного зубодолбежного станка: *а* – кинематическая структура; *б* – вид в плане

равную времени поворота ротора 3 в движении B_6 на угол $2\pi/k$, где k – число делительных столов. На рис. 5.11, б показано положение, когда продольный стол 5, несущий делительный стол 7, находится в исходном положении (1) относительно инструментального суппорта 8 на позиции загрузки-выгрузки. В следующем (2) по направлению вращения ротора 3 положении исполнительных органов 5, 7, 8 происходит профилирование зубчатого колеса, а в положении (3) исполнительных органов профилирование закончено и осуществляется вывод столов 5 и 7 с нарезанным зубчатым колесом из зоны обработки, т. е. выполняется этап позиционирования в зону загрузки-выгрузки.

Цикл обработки на каждом делительном столе осуществляется за один оборот ротора 3, который получает вращательное движение B_6 с постоянной круговой частотой при включении электродвигателя M_2 . Одновременно включается

электродвигатель M_1 , сообщаящий шпинделю 9 движение скорости резания Π_1 . При включении электромагнитной муфты 15 движение от электродвигателя M_1 по внешней связи группы $\Phi_3(B_2 \equiv B_3)$ сообщается звену соединения связей 10, по внутренней связи этой группы – шпинделю 9 (движение B_2) и по цепи $i_x \rightarrow 11 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13$ – делительному столу 7 (движение B_3).

Одновременно с сообщением ротору движения B_6 включается электромагнитная муфта 15, а переключающий механизм 22 соединяет со своим выходом орган настройки i_{s2} . В итоге по внешней связи $M_2 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow 20 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 24 \rightarrow i_{s2} \rightarrow 15$ движение сообщается во внутреннюю связь группы $Bp(B_4 \equiv B_5)$ через передачу 14 продольному столу 5 (движение B_4) и по цепи $i_y \rightarrow 16 \rightarrow \Sigma \rightarrow 12 \rightarrow 13$ – делительному столу 7 (движение B_5).

В результате движениями Π_1 , $B_2 \equiv B_3$, $B_4 \equiv B_5$ осуществляется этап касательного врезания на высоту зуба, который продолжается до совпадения оси делительного стола 7 с плоскостью симметрии инструментального суппорта 8. В этой позиции электромагнитная муфта 20 отключается, движение врезания прекращается и продольный стол 5 фиксируется на направляющих ротора 3. В дальнейшем движениями Π_1 и $B_2 \equiv B_3$, в течение одного оборота делительного стола 7 выполняется профилирование заготовки.

По окончании обработки выключается электромагнитная муфта 15 и движение $B_2 \equiv B_3$ прекращается. Одновременно шпиндель 9 с долбяком выводится в крайнее верхнее положение. Затем посредством электромагнитной муфты 20 включается группа позиционирования и продольный стол 5 уходит из зоны зацепления долбяк – заготовка по ходу вращения ротора (движение B_8). При достижении позиции загрузки-выгрузки движение B_8 реверсируется и стол 5, перемещаясь с угловой скоростью, равной угловой скорости ротора 3, остается неподвижным относительно станины.

На позиции загрузки-выгрузки производится замена обработанного колеса заготовкой. В этот период ротор 3, вращаясь, перемещает инструментальный суппорт 8 в исходную позицию цикла. Из исходной позиции цикл обработки на данном столе повторяется. Заметим, что на этапе позиционирования кинематическая связь продольный стол 5 – делительный стол 7 сохраняется. Поэтому при движении позици-

онирования движение B_5 делительного стола отслеживает движение B_8 продольного стола 5. Таким образом, формально движения врезания и позиционирования имеют одинаковую структуру. Однако их функция принципиально различна. Видимо, в данном случае было бы рационально во внутренней связи группы обката между звеном соединения связей 15 и гитарой сменных зубчатых колес i_y установить электромагнитную муфту.

Описанный роторный станок можно рассматривать как совокупность нескольких одинаковых зубодолбежных станков, объединенных общим ротором и общим электродвигателем M_2 групп врезания, транспортирования и позиционирования. Следовательно, общее количество органов настройки, электромагнитных муфт, суммирующих механизмов и переключающих устройств в конструкции станка возрастает пропорционально количеству отдельных станков, входящих в общую структуру, что нежелательно. Поэтому в модернизированном варианте станка [35] используются общий электродвигатель и общий приводной вал, установленный в колонне, через который осуществляются кинематические связи с исполнительными органами отдельных станков, составляющих общую схему. В этом варианте для общей совокупности однотипных кинематических групп используются соответствующие общие органы настройки и суммирующие механизмы.

Вместе с тем в обоих вариантах станка развитые кинематические цепи существенно усложняют механику станка, увеличивают его металлоемкость и трудоемкость изготовления, снижают ремонтпригодность и, как следствие, качество обработки. Поэтому в станках роторного типа целесообразна замена кинематических связей между исполнительными органами электронными связями между электродвигателями их приводов. Структурная схема роторного зубодолбежного станка, у которого электронные связи между исполнительными органами выполнены по схеме отслеживающей синхронизации [12, 23], показана на рис. 5.12.

Общая компоновка базовых элементов (станины 1, колонны 2, ротора 3 с направляющими 4, круговых столов 5, несущих радиальные столы 6 с делительными столами 7) и инструментальных суппортов 8 выполнена аналогично компоновке предшествующей схемы.

Исполнительные органы станка (ротор 3, продольные столы 5, делительные столы 7 и шпиндели 9) кинематически связаны с отдельными регулируемыми электродвигателями соответственно 9, 10, 11, 12, 13. Для связи со схемой синхронизации на роторе 3, продольных 5 и делительных 7 столах, шпинделе 9 установлены ИИП соответственно 14, 15, 16, 17 для преобразования круговых частот вращения исполнительных органов в электрические сигналы, сообщаемые в систему отслеживающей синхронизации приводов, собираемую на типовых интегральных схемах.

Система отслеживающей синхронизации выполнена по схеме задающая – ведомая координаты с автоматической коррекцией погрешностей приводов обеих ведомых координат. При этом ротор 3 является задающей координатой для круговых столов 5, а шпиндели 9 – задающими координатами для круговых 5 и делительных 7 столов. Функционально связанные пары шпиндель – делительный стол объединены общим рабочим циклом станка. Синхронизация этих пар между собой осуществляется посредством автоматической подстройки круговых подач шпинделей (задающих координат) с сигналом эталонного генератора.

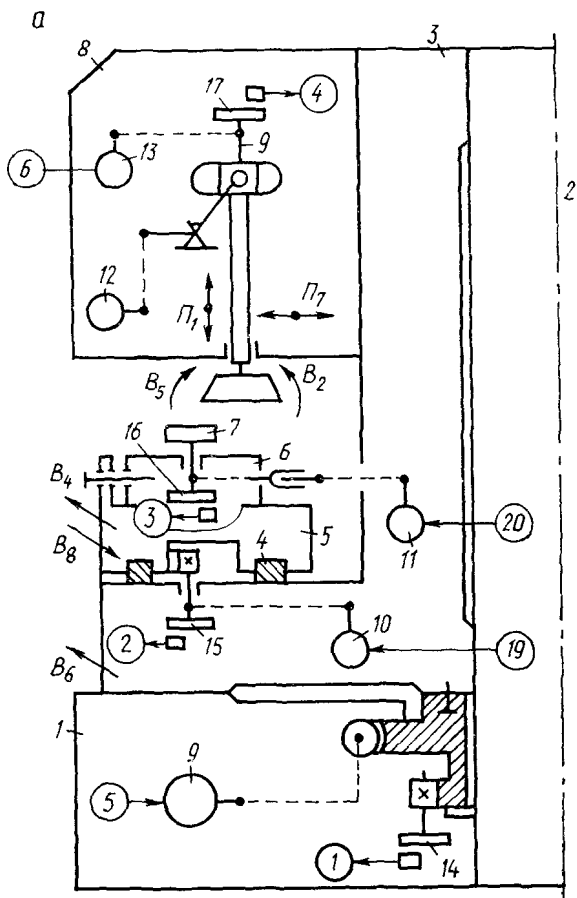
На рис. 5.12, б, в приведена часть общей схемы, обеспечивающая синхронизацию приводов одного станка из общей совокупности однотипных станков, объединенных общим ротором.

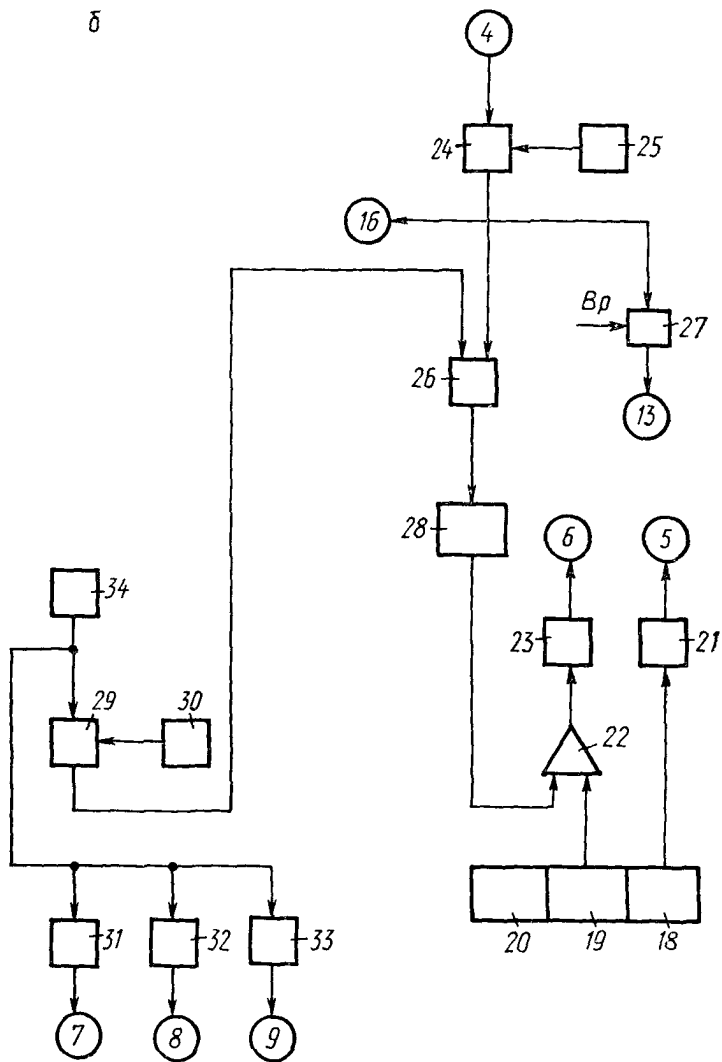
Источниками питания для задающих координат являются задатчики 18 и 19, входящие в блок управления (БУ) 20. Задатчик 18 через УМ 21 соединен с электродвигателем 9 привода ротора, а задатчик 19 через первый вход – выход СУ 22 и УМ 23 – с электродвигателем 13 шпинделя. ИИП 17 соединен с входом счетчика 24, к которому подключен блок ПО 25. Выход счетчика 24 соединен со вторым входом ФД 26 и первым входом элемента И 27. Выход ФД 26 соединен через ИАП 28 со вторым входом СУ 22. Первый вход ФД 26 соединен с выходом счетчика 29, к которому подключен блок ПО 30. Вход счетчика 29 объединен с входами блоков КП 31, ПВ 32, позиционирования (ПЗ) 33 и соединен с выходом эталонного генератора (ЭГ) 34.

ИИП 14, 15, 16 соединены с входами счетчиков соответственно 35, 36, 37. К счетчикам 35 и 37 подключены блоки ПО 38 и 39, а к счетчику 36 – блоки ПО 40 и 41 соответ-

ственно через элементы И 42, 43. Выход счетчика 35 соединен с первым входом элемента И 44, у которого второй вход является управляющим, а выход объединен с выходом элемента И 27 и соединен с первым входом ФД 45.

Второй вход ФД 45 соединен с выходом счетчика 36, а выход через ИАП 46 – со вторым входом СУ 47, у которого первый вход соединен с аналоговыми выходами ключей 48, 49. Аналоговые входы ключей 48, 49 соединены с блоками соответственно ПВ 32 и ПЗ 33. Потенциальные входы этих ключей являются управляющими. Выход СУ 47 через анало-





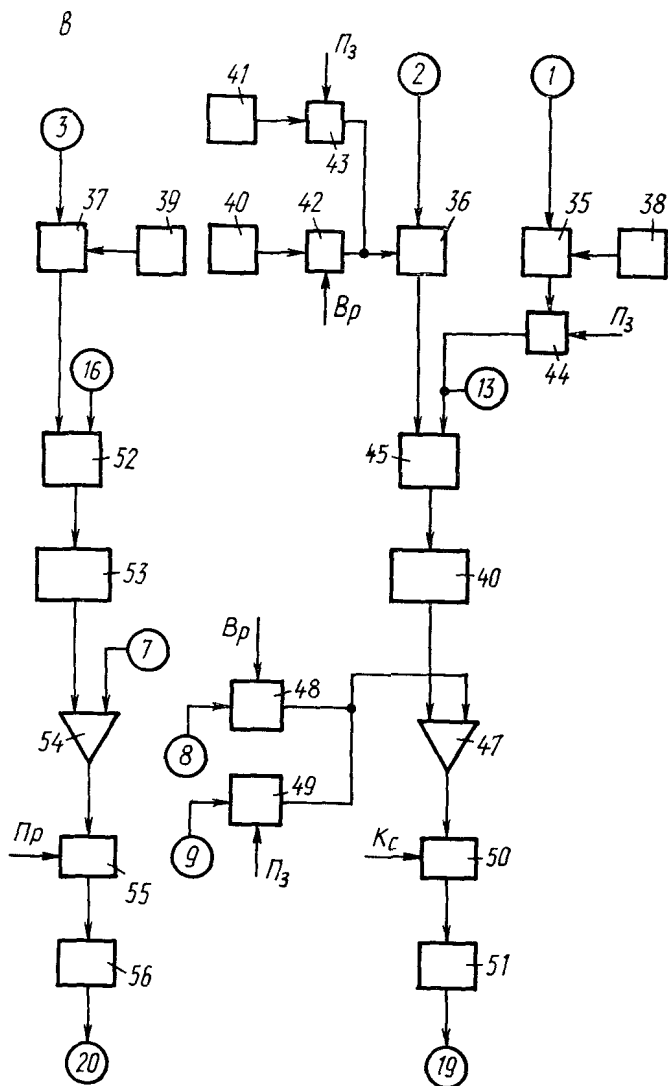


Рис. 5.12. Роторный зубодолбежный станок с электронными связями: а – схема приводов станка; б – блок-схема системы управления задающих координат; в – блок-схема системы управления ведомых координат

говые вход-выход ключа 50 и УМ 51 соединен с электродвигателем 10 продольного стола 5.

Выход счетчика 37 соединен со вторым входом ФД 52, у которого первый вход соединен с выходом счетчика 24, а выход через ИАП 53 – со вторым входом СУ 54, соединенного первым входом с блоком КП 31, а выходом через аналоговые вход-выход ключа 55 и УМ 56 – с электродвигателем 11 привода делительного стола 7.

При наладке станка передаточные отношения функциональных связей ротор – круговой стол, шпиндель – круговой стол, шпиндель – делительный стол задаются блоками ПО соответственно 38 и 41, 25 и 40, 25 и 39.

Схема работает следующим образом. По команде с БУ 20 сигнал от задатчика 18 через УМ 21 поступает на электродвигатель 9, и ротор 3 получает вращательное движение V_6 с постоянной угловой скоростью. Одновременно включается привод поступательно-возвратного движения $П_1$ шпинделя 9 и ЭГ 34, запускающий блоки КП 31, ПВ 32 и ПЗ 33. Указанные блоки преобразуют импульсный сигнал в напряжение, используемое для управления приводами круговых 5 и делительных 7 столов.

Одновременно с сообщением ротору вращательного движения по команде с БУ 20 с задатчика 19 через СУ 22 и УМ 23 поступает управляющее напряжение на электродвигатель 13, сообщающий вращательное движение V_2 шпинделю 9 с рабочей круговой подачей, определяемой сигналом задатчика. Одновременно на управляющий вход ключа 50 подается управляющий потенциал K_c , включающий соответствующий канал синхронизации, в рассматриваемом примере шпиндель 9 – круговой стол 5, а на управляющие входы элементов И 27, 42 и ключ 48 – управляющий потенциал V_r . В итоге от блока 32 через открытый по управляющему входу ключ 48 на первый вход СУ 47 поступает аналоговый сигнал, соответствующий подаче врезания V_4 кругового стола. Этот сигнал, пройдя открытый по управляющему входу ключ 50 и УМ 51, включает электродвигатель 10 привода кругового стола 5. Согласованными движениями V_2 шпинделя и V_4 кругового стола осуществляется касательное врезание долбняка на высоту зуба обрабатываемого колеса. Одновременно выполняется коррекция движения V_4 . ИИП 15 и 17, установленные на круговом столе и шпинделе, вырабатывают сигналы, соответствующие их действительным круговым подачам.

Эти сигналы поступают в счетчики 36 и 24, где происходит их деление согласно заданным передаточным отношениям. Итоговые сигналы с выходов счетчиков 36 и 24 поступают на входы ФД 45, где происходит сравнение сигнала задающей координаты с сигналом ведомой координаты. На выходе ФД 45 образуется сигнал погрешности ведомой координаты, который после его преобразования в ИАП 46 в аналоговую форму поступает на второй выход СУ 47 для коррекции сигнала управления ведомой координаты (кругового стола).

Этап врезания прекращается при совпадении оси делительного стола с плоскостью, проходящей через оси инструментального суппорта и ротора. По программе с управляющих входов элементов И 27, 42 и ключа 48 снимается потенциал Вр, а с управляющего входа ключа 50 – потенциал Кс. Круговой стол останавливается и фиксируется. Одновременно на управляющий вход ключа 55 подается управляющий потенциал Пр, по которому начинается этап профилирования зубчатого колеса. С блока КП 31 на первый вход СУ 54 поступает аналоговый сигнал, соответствующий круговой подаче B_5 делительного стола. Этот сигнал после усиления по мощности в УМ 56 запускает электродвигатель 11 делительного стола 7. Согласованные движения B_2 шпинделя и B_5 делительного стола в течение полного оборота делительного стола обеспечивают профилирование зубчатого колеса. На этапе профилирования происходит также коррекция погрешностей движения B_5 ведомой координаты. Для этого в ФД 52 сравниваются импульсные сигналы – аналоги действительных круговых подач шпинделя и делительного стола. Сигнал погрешности с выхода ФД 52 после преобразования в аналоговую форму в ИАП 53 поступает на второй вход СУ 54 для коррекции основного сигнала.

Этап профилирования по циклу работы станка прекращается после переноса ротором исполнительных органов в положение, соответствующее началу ухода стола из зоны резания. В этом положении управляющий потенциал Пр снимается с соответствующих управляющих элементов, электродвигатель 11 отключается и делительный стол 7 останавливается и фиксируется. Одновременно отключается привод движения $П_1$ и шпиндель выводится в верхнее положение.

На ключ 50 подается управляющий потенциал Кс, а на ключ 48 – потенциал Вр. Электродвигатель 10 вновь включается, и круговой стол 5 со скоростью подачи врезания уходит из зоны профилирования по направляющим ротора 3 по ходу его вращения. В итоге переносного и относительного движений делительный стол, опережая ротор, приходит в исходное положение загрузки – выгрузки. В этом положении по программе с ключа 48 снимается управляющий потенциал Вр, а на ключ 49 и элементы И 43 и 44 подается управляющий потенциал Пз. Одновременно реверсируется электродвигатель кругового стола. При этом его круговая частота определяется сигналом, сообщаемым в схему управления с блока ПЗ 30. Круговой стол, перемещаясь по направляющим ротора с подачей позиционирования B_8 , равной, но противоположно направленной круговой подаче B_6 ротора, остается неподвижным относительно зоны загрузки – выгрузки в течение времени, определяемого циклом обработки. Стабилизация положения кругового стола относительно этой зоны осуществляется посредством сравнения в ФД 45 сигналов – аналогов действительных круговых подач ротора и кругового стола, снимаемых с ИИП 14 и 15, и суммирования результирующего сигнала с основным сигналом управления в СУ 47. Этап позиционирования заканчивается при перемещении продольного стола в положение относительно ротора – исходное для этапа врезания, т. е. для повторения цикла.

Коррекция отдельных циклов обработки между собой выполняется за счет синхронизации круговых подач шпинделей относительно эталонного импульсного сигнала, вырабатываемого ЭГ 34. Сигнал с ЭГ непрерывно поступает в счетчик 29, где происходит его деление до частоты, соответствующей заданному значению круговой подачи шпинделей, устанавливаемому блоком ПО 30. С выхода счетчика 29 импульсный сигнал поступает на вторые входы ФД 26, на первые входы которого с блока счетчиков 24 поступают сигналы, соответствующие действительным круговым подачам шпинделей. На выходах ФД 26 образуются сигналы погрешностей круговых подач соответствующих шпинделей. Эти сигналы после их преобразования в блоке ИАП 28 в аналоговую форму поступают на вторые входы СУ 22 для коррекции сигналов управления приводами шпинделей.

В рассмотренной схеме синхронизации приводов испол-

нительных органов элементы И и ключи являются частью системы управления, а не функциональных связей, т. е. не являются непосредственно элементами кинематической подсистемы. При описании принципа работы схемы использован алгоритм, по которому врезание и профилирование осуществляются последовательно. Вместе с тем возможны и иные алгоритмы. Например, алгоритм, по которому на этапе врезания выполняется также движение обката (профилирования). Причем в этом случае расположение элементов управления, т. е. ключей и элементов И в системе синхронизации, остается неизменным, а изменяется только программа управления станком, задаваемая блоком управления (устройством ЧПУ).

В зависимости от используемой электронной системы синхронизации приводом исполнительных органов можно задать любой режим соотношений подач профилирования и врезания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Механическая передача*: А. с. 339704 СССР: МКИ³ F 16 H 29/00.
2. *Способ долбления цилиндрических зубчатых колес*: А. с. 1000185 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
3. *Зубодолбежный станок*: А. с. 1087276 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
4. *Зубодолбежный станок*: А. с. 1255314 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
5. *Способ одновременного долбления двух зубчатых колес*: А. с. 1265017 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
6. *Зубодолбежный станок*: А. с. 1273217 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
7. *Способ нарезания зубчатых изделий*: А. с. 1291311 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
8. *Роторный зубодолбежный станок*: А. с. 1324778 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
9. *Устройство для синхронизации приводов резания и профилирования зубодолбежного станка*: А. с. 1371862 СССР: МКИ³ В 23 Q 15/00.
10. *Зубодолбежный станок*: А. с. 1379031 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
11. *Способ нарезания зубчатых колес*: А. с. 1380881 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
12. *Роторный зубодолбежный станок*: А. с. 1583229 СССР: В 23 F 5/12.
13. *Способ управления многопроходной обработкой зубчатых колес*: А. с. 1627346 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
14. *Зубодолбежный станок*: А. с. 1641533 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
15. *Способ долбления зубчатых колес*: А. с. 1641534 СССР: МКИ³ В 23 F 5/12.
16. *Врагов Ю. Д.* Анализ компоновок металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 207 с.
17. *Голембиевский А. И., Терентьев В. А., Трофимов А. И.* Повышение производительности зубодолбления // *Машиностроитель*. 1979. № 3. С. 26.
18. *Голембиевский А. И., Трофимов А. И.* Устройство для регистрации затирания // *Машиностроитель*. 1983. № 11. С. 23.
19. *Голембиевский А. И.* Кинематическая структура зубодолбежных станков, работающих без затирания // *Машиностроение*. 1986. Вып. 11. С. 96–99.
20. *Голембиевский А. И.* Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении. Мн.: Наука и техника, 1986. 168 с.
21. *Голембиевский А. И.* Зубодолбежные станки с касательным врезанием // *Машиностроитель*. 1988. № 1. С. 25–27.
22. *Голембиевский А. И.* Система синхронизации функционально связанных связанных приводов зубодолбежных станков с ЧПУ // *Машиностроение*. 1988. Вып. 13. С. 95–99.
23. *Голембиевский А. И.* Зубодолбежный станок с электронной системой синхронизации // *Машиностроитель*. 1991. № 6. С. 16–17.

24. Голембиевский А. И. Совершенствование многопроходной обработки зубчатых колес зуборезными долбьяками // *Машиностроитель*. 1991. № 12. С. 17–18.

25. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Проблема системологии. М.: Советское радио, 1976. 246 с.

26. Каталог зубодолбежных станков фирмы «Lorenz». Ettlingen, 1988.

27. Кениг В., Бузакис К. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении // *Экспресс-информация, режущие инструменты*. М.: ВИНТИ, 1978. С. 1–12.

28. Коновалов Е. Г. Основы новых способов металлообработки. Мн.: Наука и техника, 1961. 296 с.

29. Матюшин В. М. Зубодолбление. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. 184 с.

30. Матюшин В. М. Нарезание колес зуборезными долбьяками с увеличенными круговыми подачами // *Организация процессов обработки металлов резанием*. 1961. Вып. 31. 47 с.

31. Способ нарезания цилиндрических колес: Патент 475761 СССР: МКИ³ В 23 F 5/00.

32. Петрухин С. С., Евдокимов В. А. Определение площади срезаемого слоя и сил резания при зубодолблении // *Станки и инструменты*. 1971. № 2. С. 27–28.

33. Ратмиров В. А., Рашкович П. М. Программное управление зубообрабатывающими станками. М.: НИИмаш, 1983. 47 с.

34. *Справочник машиностроителя в 6 томах* / Под ред. Н. С. Ачеркана. Т. 1. М.: Машгиз, 1960. С. 274–275.

35. Терентьев В. А., Трофимов А. И. Роторный зубодолбежный станок // *Машиностроение*. 1990. Вып. 15. С. 107–111.

36. Федоров Ю. И., Феофилов Н. Д. Определение толщины слоев металла, срезаемого периферийными режущими кромками зубьев инструмента при зубодолблении // *Изв. вузов. Машиностроение*. 1970. № 7. С. 133–136.

37. Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков. М: *Машиностроение*, 1970. 408 с.

38. Hans I. Gezielt wirtschaftlicher wälzstossen. VDI // *Zeitschrift*. 1970. Vol. 112, N 4. S. 266–269.

39. Hubka V. Theorie Technischer Systeme. Berlin: Springer. Verlag, 1987. 208 s.

40. Opitz H. u. a. Verschleissuntersuchungen beim Wälzstossen von Geradverzahnungen // *Bericht des Landes Nordrhein-Westfalen*. 1974. N 2401. 64 s.

41. Zařizeni k přidavnému pootáčení nástroje odvalovacich obrážeček na ozubeni: Patent 123494 CSR: MKU³ B 23 F 5/12.

42. Procédé d'usinage de rainures par pénétration laterale tangentielle: Patent 2092985 FR: MKU³ B 23 F 5/00.

43. Vaida A., Bejinaru G. Studiul formei aschiilor la mortezarea rotilor dintate cu cutit-roata, in vederea determinarii fortelor de achiere // *Buletinul universitatii din Brasov*. 1979. A 21. S. 41–48.

44. Wälzstossen in Eteppen // *Maschine*. 1991. Vol. 45, N 6. S. 75–78.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Системный характер способов зубодолбления.....	9
1.1. Особенности процесса обкатного зубодолбления	9
1.2. Способ зубодолбления как целостный объект реальной действительности.....	16
1.3. Геометрическая интерпретация воспроизведения зубчатого венца.....	21
1.4. Способ зубодолбления как целенаправленная техническая система.....	25
Глава 2. Системный анализ известных способов обкатного зубодолбления.....	39
2.1. Способы, изменяющие характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками.....	39
2.2. Способы, обеспечивающие устранение явления затирания.....	46
2.3. Способы, обеспечивающие повышение производительности зубодолбления при касательном врезании.....	51
2.4. Многообразие способов зубодолбления как частная развивающаяся система	58
Глава 3. Металлорежущий станок как техническая система.....	66
3.1. Структурная схема базового зубодолбежного станка с механическими связями.....	66
3.2. Структурная схема зубодолбежного станка с электронными связями.....	70
Глава 4. Анализ кинематической подсистемы зубодолбежных станков с радиальным врезанием.....	74
4.1. Кинематическая структура станков, изменяющих характер стружки, срезаемой боковыми режущими кромками зубьев долбяка....	74
4.2. Кинематическая структура станков, работающих без затирания.....	87
4.3. Кинематическая структура станков для многопроходного зубодолбления с непрерывным врезанием.....	97
Глава 5. Анализ кинематической подсистемы зубодолбежных станков с касательным врезанием.....	104
5.1. Структурная схема базового станка с касательным врезанием	104
5.2. Кинематическая структура двухстоловых станков для последовательной зубообработки.....	110
5.3. Кинематическая структура двухстоловых станков для параллельной зубообработки	119
5.4. Кинематическая структура роторных зубодолбежных станков	136
Литература.....	150

Научное издание

Голембиевский Анатолий Иосифович

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ

Заведующий редакцией *Н. Д. Гесь*. Редактор *С. В. Мащканова*. Художник *А. Е. Анкуда*.
Художественный редактор *Л. М. Гомонов*. Технический редактор *С. А. Курган*. Корректор
И. Л. Дмитриенко.

Сдано в набор 04.02.93. Подписано в печать 13.05.93. Формат 84X108 1/32. Бум. тип. № 1.
Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 7,98. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л.
7,88. Тираж 500 экз. Зак. № 155. Цена 60 р.

Издательство «Навука і тэхніка» Академии наук Беларуси и Министерства информации
Республики Беларусь. 220141, Минск, Жодинская, 18. ЛВ № 437. Типография им. Фран-
циска Скорины издательства «Навука і тэхніка». 220141. Минск, Жодинская, 18.