

УДК 621.9.04

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ МНОГОПРОХОДНОГО ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ

*канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Предложены способы управления формой стружки, срезаемой на предварительных проходах при многопроходном зубодолблении при увеличенных круговых подачах. Рассмотрены примеры их реализации в кинематической структуре группы обката зубодолбежных станков.

Принципиальной особенностью процесса зубодолбления является дискретный характер резания, так как срезание стружки осуществляется только при рабочем ходе долбяка в поступательно-возвратном движении, воспроизводящем линию зуба колеса. Количество резов обратно пропорционально скорости обката, задаваемой круговой подачей. При прохождении каждым зубом долбяка зоны обработки прослеживаются три качественно различных периода срезания стружки [1, 2]:

- первый 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;
- второй период – резание вершинной, входной и выходной режущими кромками. Срезаемые стружки имеют U-образную форму;
- третий период начинается с момента выхода долбяка из зоны резания. Стружка срезается вершинной и выходной режущими кромками и имеет L-образную форму, постепенно переходящую в I-образную, срезаемую выходной режущей кромкой.

При однопроходном зубодолблении наиболее распространен тип U-образного схода стружки. Причем толщина стружек, срезаемых вершинными режущими кромками, приблизительно одинакова, а толщина стружек, срезаемых выходными режущими кромками, значительно меньше толщин стружек, срезаемых входными режущими кромками на одноименных окружностях. При малых круговых подачах, характерных для классического способа зубодолбления, выходная режущая кромка срезает тонкие стружки, соизмеримые с естественным радиусом закругления режущей кромки. При U-образном сходе стружки более толстая вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности зуба долбяка и затрудняет ее сход. Стружка, срезаемая вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвергается растягивающей нагрузке, что приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка. После этого обе стружки сходят беспрепятственно и не вызывают высоких механических или температурных деформаций на границе между вершинной и входной режущими кромками. Тонкая стружка, срезаемая выходной режущей кромкой зуба, также отделяется от толстой стружки, сходящей с вершинной режущей кромки. Эта стружка выдавливается толстыми стружками в зазор между боковой стороной зуба долбяка и обрабатываемой поверхностью, где она истирается на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. Здесь образуется лунка локального износа по передней поверхности. Расстояние от выходной режущей кромки до центра лунки зависит от круговой подачи, при увеличении которой это расстояние возрастает.

При зубодолблении износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Причем его интенсивность нарастает от основания к вершинной режущей кромке по входной и выходной 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 у выходной режущей кромки. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки.

В практике зубообработки 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 обеих боковых режущих кромках. Причем интенсивность их развития замедляется в два раза. Этот путь повышения периода размерной стойкости долбяка не требует качественного изменения классического способа зубодолбления.

Современная тенденция в области обкатного зубодолбления ведущих западных фирм – переход от классического 1 – 3-проходного зубодолбления к многопроходному при 5 – 7 черновых проходах при одновременном увеличении круговой подачи на порядок, т.е. до 3,5 – 4 мм/дв. ход долбяка [3]. Такой режим при сохранении производительности традиционного 1 – 3-проходного зубодолбления обеспечивает повышение размерной стойкости долбяков. Объясняется это 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 и, как следствие, меньше нагревается. В итоге возрастает термоциклическая стойкость режущих кромок зубьев долбяка.

При многопроходной обработке, наряду с указанным выше технологическим приемом, возможны еще два пути замедления развития лунки локального износа на основе перераспределения припуска на всех проходах кроме первого.

Первый путь связан с такой модификацией классической схемы, которая обеспечит срезание вместо U-образной более простой L-образной стружки. В этом случае 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 срезании симметричной U-образной стружки, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова. В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыках между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность зубьев долбяка подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование лунки локального 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 существенно замедляется, что соответствует увеличению периода размерной стойкости долбяков.

Рассмотрим технические решения, реализующие сформулированные условия резания.

Согласно первому решению, пользуясь известными зависимостям, например [4], можно найти толщину стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками. Тогда при обработке с L-образной стружкой вдоль входной режущей кромки при очередном врезании, не прерывая движения обката, заготовке сообщают дополнительное угловое смещение (дискретную круговую подачу) в направлении, противоположном ее вращению в движении обката на толщину стружки, которую должна срезать выходная режущая кромка. А при обработке с той же формой стружки вдоль выходной режущей кромки дополнительное угловое смещение изменяют на противоположное на толщину стружки, которую должна срезать входная режущая кромка. В итоге долбление на проходах, кроме первого, можно выполнять либо вдоль входной, либо вдоль выходной режущей кромки, либо от прохода к проходу последовательно чередовать режущие кромки, вдоль которых осуществляется долбление. Разность толщин стружки, срезаемой боковыми режущими кромками, можно использовать в качестве величины углового смещения при создании условий долбления с симметричной U-образной стружкой на всех проходах кроме первого. Для этого угловое смещение, не прерывая движения обката, сообщается при очередном врезании заготовке в направлении ее вращения в движении обката [3].

Второе техническое решение основано на активном контроле за моментом силы резания [5]. При врезании перед очередным проходом долбяку или заготовке сообщается угловое смещение, противоположное круговой подаче, и одновременно измеряется момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение прекращается. В итоге на проходе будет срезаться симметричная U-образная стружка.

Оба технических решения могут быть осуществлены в зубодолбежном станке с функциональными связями, выполненными на базе типовых интегральных схем. Соответствующая структурная схема приведена на рисунке 1 [6, 7].

Кинематическая структура станка содержит следующие кинематические группы: скорости резания Φ_v (Π_1), обката (профилирования) Φ_s ($B_2 B_3$), врезания Φ_r (Π_4), «отскока» долбяка при холостом ходе Φ_c (Π_5). Исполнительным органом группы Φ_v (Π_1) является шпиндель 1, несущий долбяк. Привод движения Π_1 шпинделя осуществляется от электродвигателя 2, круговая частота которого преобразуется в поступательно-возвратное движение кулисным механизмом 3. Исполнительными органами группы обката Φ_s ($B_2 B_3$) являются шпиндель 1 и делительный стол 4. Функциональная связь (аналог цепи обката) между ними обеспечивается системой отслеживающей син-

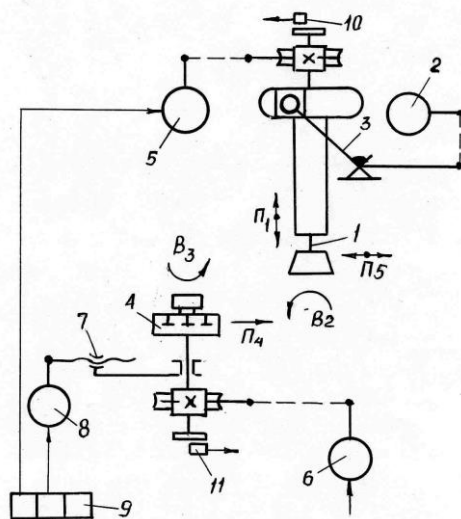


Рис. 1. Схема приводов зубодолбежного станка

хронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты [8]. Задающей координатой является шпиндель. Привод его вращательного движения V_2 осуществляется от электродвигателя 5. Круговая частота этого электродвигателя задает круговую подачу долбяка. Делительный стол является ведомой координатой. Привод его вращательного движения V_3 осуществляется от электродвигателя 6, являющегося конечным звеном отслеживающей синхронизации. Исполнительным органом группы врезания V_p (Π_4) является продольный стол 7. Привод его движения Π_4 осуществляется от электродвигателя 8 через тяговый вал (безлюфтовую передачу винт – гайка). В качестве электродвигателей 5, 6, 8 используются высокомоментные машины постоянного тока, позволяющие осуществлять бесступенчатое регулирование круговой частоты. Группа «отскока» V_c (Π_5) выполняется по традиционной для современных зубодолбежных станков схеме (не показана). В качестве источника энергии для электродвигателей 2, 5, 8 используется силовая часть устройства управления 9.

Связь механических исполнительных органов – шпинделя 1 и делительного стола 4 со схемой синхронизации обеспечивается импульсными измерительными преобразователями 10 и 11, установленными соответственно на шпинделе и делительном столе.

Импульсные измерительные преобразователи 10 и 11 соединены с входами ключа 1 и счетчика 2 (рис. 2). Ключ 2, например элемент 2И, имеет два аналоговых управляющих входа и два выхода. Один

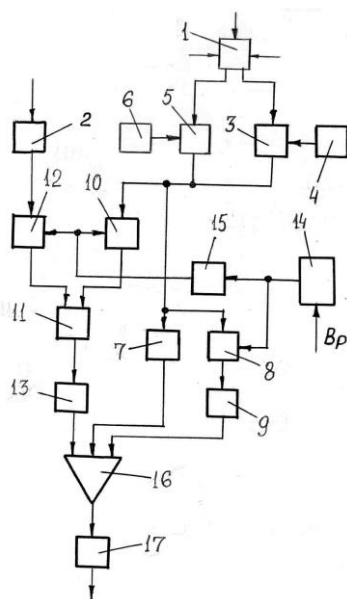


Рис. 2. Блок-схема функциональной связи группы обката

выход этого ключа соединен с входом счетчика 3, к которому подключен блок 4 задания коэффициента деления, выполняющий функцию установки передаточного отношения станочного зацепления группы обката. Другой выход ключа 3 соединен с входом счетчика 5, к которому подключен блок 6 установки коэффициента умножения, выполняющий также функцию установки передаточного отношения. Выходы счетчиков 3 и 5 соединены с входом импульсно-аналогового преобразователя 7, через ключ 8 – с входом импульсно-аналогового преобразователя 9 и через ключ 10 – с первым входом фазового дискриминатора 11. Выход счетчика 2 соединен через ключ 12 со вторым входом фазового дискриминатора 11. Выход этого дискриминатора соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 13. Управляющий вход ключа 8 соединен с выходом формирователя 14 сигнала управления угловым смещением (дискретной круговой подачей) делительного стола на этапах врезания, а управляющие входы ключей 10 и 12 – с выходом этого формирователя через элемент НЕ 15. Выходы импульсно-аналоговых преобразователей 7, 9, 13 соединены с входами суммирующего усилителя 16. Выход этого усилителя соединен через усилитель мощности 17 с электродвигателем ведомой координаты.

Счетчик 3 совместно с блоком 4 установки передаточного отношения выполняет функцию делителя частоты дискретного сигнала, а счетчик 5 совместно с блоком 6 установки коэффициента умножения выполняет функцию умножителя частоты дискретного сигнала. Выбор делителя или умножителя частоты зависит от передаточного отношения функциональной связи долбяк – заготовка:

$$i_x = c \frac{z_d}{z},$$

где i_x – передаточное отношение станочного зацепления; C – коэффициент, зависящий от передаточного отношения делительных передач; z_d и z – числа зубьев соответственно долбяка и заготовки.

В практике зубообработки $z \geq cz_d \geq z$. Поэтому при $cz_d < z$ ключом 1 устанавливается связь импульсного измерительного преобразователя 10 с делителем частоты, при $cz_d > z$ – с умножителем частоты.

При $cz_d = z$ эта связь может устанавливаться с любым из этих блоков.

Импульсно-аналоговый преобразователь 7 выполняет функцию задатчика круговой подачи V_3 делительного стола, а импульсно-аналоговый преобразователь 9 – функцию задатчика дополнительного углового смещения на этапах врезания. На входе этого преобразователя используется дополнительный делитель частоты.

При реализации первого технического решения, сформулированного выше, формирователь сигнала управления угловым смещением выполнен в виде электронного реле времени [6].

Это реле (рис. 3) содержит генератор эталонной частоты 1, счетчик импульсов 2, компаратор кодов 3, блок установки кода 4, усилитель-формирователь времени выдержки 5 и блок управления 6.

При наладке станка подача врезания и количество этапов врезания устанавливаются программно посредством задания программы на программируемом контроллере. Время, в течение которого на каждом очередном этапе врезания происходит угловое смещение

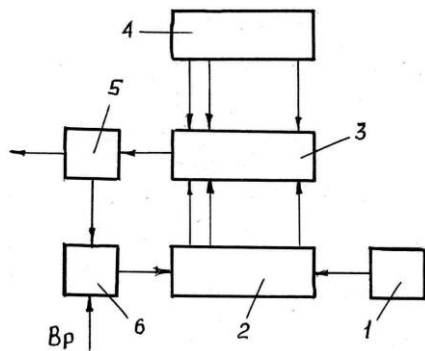


Рис. 3. Временной формирователь сигнала управления

делительного стола с заготовкой относительно долбяка, устанавливается посредством блока установки кода реле времени. Пуск реле времени осуществляется по программе одновременно с началом соответствующего этапа врезания.

Станок работает следующим образом. При включении электродвигателя 2 (см. рис. 1) получает поступательно-возвратное движение Π_1 шпиндель 1 долбяка. Затем после ускоренного перемещения продольного стола 7 в исходную для обработки точку электродвигатель 8 переключается на подачу врезания в движение Π_4 на величину врезания на первом черновом проходе. Одновременно включается электродвигатель 5 задающей координаты, сообщающий шпинделю 1 вращательное движение V_2 круговой подачи, и схема отслеживающей синхронизации.

Импульсный измерительный преобразователь 10 вырабатывает высокочастотный сигнал, пропорциональный круговой подаче долбяка. Этот сигнал через ключ 1 (см. рис. 2) поступает или в счетчик 3 делителя частоты, или в счетчик 5 умножителя частоты, где происходит или деление сигнала в соответствии с коэффициентом деления, установленным на блоке 4, или его умножение в соответствии с коэффициентом, установленным на блоке 6. На выходе счетчика 3 или счетчика 5 образуется импульсный сигнал – аналог круговой подачи делительного стола в движении V_3 . Этот сигнал преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 7, и после прохождения суммирующего усилителя 16 и усилителя мощности 17 приводит во вращение электродвигатель 6 ведомой координаты (делительный стол 4 с заготовкой обрабатываемого колеса). В результате делительный стол будет отслеживать движение шпинделя. Причем отношение круговых частот вращения (круговых подач) шпинделя и делительного стола будет соответствовать отношению частот дискретного сигнала на входе ключа 1 и на выходе одного из счетчиков.

Одновременно с началом вращательного движения V_3 импульсный измерительный преобразователь 11 вырабатывает высокочастотный сигнал – аналог действительной круговой подачи делительного стола. Этот сигнал через счетчик 2 и открытый по управляющему входу ключ 12 поступает на второй вход фазового дискриминатора 11, на первом входе которого действует задающий сигнал, поступающий через открытый по управляющему входу ключ 10 с выхода счетчика 3 или счетчика 5.

В фазовом дискриминаторе происходит сравнение задающего и действительного сигналов-аналогов круговой подачи делительного стола. В итоге на выходе фазового дискриминатора 11 образуется корректирующий сигнал, поступающий через импульсно-аналоговый преобразователь 13 в суммирующий усилитель 16, где происходит коррекция сигнала управления электродвигателем 6.

После врезания на заданную часть высоты зуба по программе движение врезания прекращается и в течение полного оборота делительного стола осуществляется первый черновой проход обработки. После его завершения при продолжающемся движении обката включается движение врезания Π_4 на вторую часть припуска. Одновременно включается формирователь 14 сигнала управления угловым смещением делительного стола. Этот сигнал открывает по управляющему входу ключ 8 для прохождения от импульсно-аналогового преобразователя 9 на вход суммирующего усилителя 16 сигнала-аналога углового смещения делительного стола. Одновременно через элемент НЕ 15 закрываются по управляющим входам ключи 10 и 12. Сигнал коррекции задающего сигнала на суммирующий усилитель 16 не поступает. В итоге в станочном зацеплении происходит рассогласование на величину заданного углового смещения.

По окончании этапа врезания формирователь 14 сигнала управления угловым смещением отключается, ключ 8 закрывается, а ключи 10 и 12 открываются. В итоге схема отслеживающей синхронизации перестраивается в исходное состояние, и в течение полного оборота делительного стола осуществляется черновой проход. После его выполнения повторяется цикл врезания для следующего прохода и т.д. Перед чистовым проходом врезание осуществляется на минимальную величину. Заготовка на этом этапе врезания угловым смещением делительного стола устанавливается относительно долбяка так, чтобы срезаание припуска на проходе осуществлялась обеими боковыми режущими кромками.

Современные электронные реле времени позволяют устанавливать выдержку в широком диапазоне и обеспечивать практически бесступенчатый ряд выдержек времени. 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.

Реализация второго технического решения, основанного на активном контроле за моментом силы резания, обеспечивается формирователем сигнала управления угловым смещением, выполненным по схеме, представленной на рисунке 4 [7].

Формирователь содержит тензометрический мост 1, тензорезисторы которого закреплены или на приспособлении для базирования заготовок, или на оправке для закрепления долбяков. Выходы тензометрического моста соединены с входами дифференциального усилителя 2, соединенного своим выходом с входом цепи, содержащей последовательно соединенные интегратор 3, усилитель-ограничитель 4, аналоговый ключ 5, блок задержки 6. При рабочем ходе шпинделя в движении Π_1 тензометрический мост регистрирует момент силы резания. Этот момент как физическое явление в зоне резания представляет собой сумму моментов резания обеими боковыми режущими кромками. Причем момент резания на входной режущей кромке имеет большее значение. Следовательно, знак суммарного момента постоянен. Сигнал – аналог момента резания после усиления в дифференциальном усилителе 2 поступает в интегратор 3, где происходит его преобразование в непрерывный сигнал. После преобразования в управляющий потенциал в усилителе-ограничителе 4 этот сигнал после подачи на управляющий вход аналогового ключа 5 потенциала, соответствующего этапу врезания, через блок задержки 6 поступает на управляющий вход ключей 10 и 12. В результате система отслеживающей синхронизации на этапе врезания перестраивается, и делительный стол получает угловое смещение. При неизменной круговой подаче шпинделя долбяка результирующая круговая подача делительного стола увеличивается. Это равнозначно постепенному перераспределению толщины срезаемой стружки в сторону ее увеличения на выходных режущих кромках. При выравнивании толщин стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, момент резания равен нулю, и формирование сигнала управления угловым смещением прекращается. Структура системы отслеживающей синхронизации перестраивается на выполнение очередного прохода и т.д.

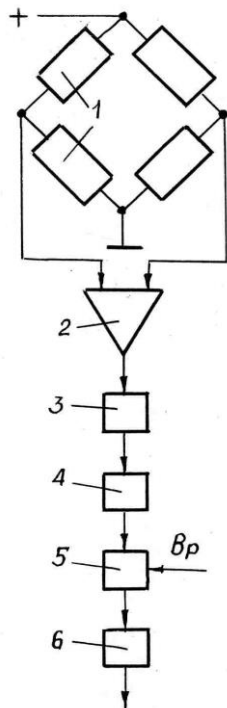


Рис. 4. Тензометрический формирователь сигнала управления

Структурная схема отслеживающей синхронизации зубодолбежного станка не зависит от структуры формирователя сигнала управления угловым смещением. Поэтому в эту систему могут быть включены оба рассмотренных формирователя параллельно через соответствующие ключи.

В работе в качестве основы функциональной связи принята схема, используемая в зубообрабатывающих станках KS300E фирмы Kaskifuji [8]. Эта схема обеспечивает одностороннюю относительно номинального значения коррекцию девиации механических передач группы обката. Возможно также использование модификаций данной схемы [9, 10], обеспечивающих двухстороннюю коррекцию девиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vaida A., Bejinaru G. Stutiul formei a schiilor la mortezarea rotilor dintate cu cutit-roata, in vederea determinarii fortelor de achietе // Buletinul universitatii din Brasov. – 1979. – A 21. – S. 41 – 48.
2. Кениг В., Бузакис К. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении // Экспресс-информация, режущие инструменты. – М.: ВИНТИ, 1978. – С. 1 – 12.
3. Hans I. Gezielt wirtschaftlicher wälzstossen // VDI-Zeitschrift. – 1970. – Vol. 112, № 4. – S. 266 – 269.
4. Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Управление процессом зубодолбления. – М.: Машиностроение, 1999. – 128 с.
5. А.с. 1641534 (SU), МКИ⁵ В23F 5/12. Способ долбления зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 14.
6. А.с. 1366360 (SU), МКИ⁵ В23F 5/12. Зубодолбежный станок с ЧПУ/ А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 2.
7. Патент 2023551 (RU), МКИ⁵ В23F 5/12. Система управления зубодолбежным станком с ЧПУ / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1994. – № 22.
8. Ратмиров В.А., Рашкович П.М. Программное управление зубообрабатывающими станками. – М.: НИИМАШ, 1983. – С. 11.
9. Заявка 20010361 (BY), МКИ⁶ В23Q 15/00, В23F 5/12. Устройство для синхронизации приводов вращения шпинделя долбяка и делительного стола зубодолбежного станка / А.И. Голембиевский // Афiцыйны бюлетэнь. – 2002. – № 4 (35).

10. Заявка 20010518 (ВУ), МКИ⁶ В23Q 15/00, В23F 5/12. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка / А.И. Голембиевский // Афіцыйны бюлетэнь. – 2002. – № 4 (35).