

УДК 621.914.1

В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева

Малыгин Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил Университет Дружбы народов им. П. Лумумбы, доктор технических наук, профессор, действительный член АИИН РФ, проректор по научной работе Севмашвуза. Имеет более 110 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании.



МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С УЧЕТОМ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предложены математическая модель и методики расчета параметров вибраций при фрезеровании, позволяющие оптимизировать конструкцию фрез на стадии проектирования инструмента и его выбор при разработке технологического процесса.

фрезерование, динамика, вибрации, дереворежущий инструмент, качество поверхности, динамическая модель.

Проблема обеспечения качества изделий в деревообработке и, прежде всего, в производстве мебели из массивной древесины на многоинструментальных станках с ЧПУ и высокими частотами вращения шпинделя ставит задачи оптимизации параметров дереворежущих фрез на стадии проектирования и выбора оптимальной конструкции на стадии разработки технологического процесса. Это обусловлено необходимостью решения следующих проблем:

повышение точности механической обработки поверхностей, что позволит снизить объем последующих шлифовальных операций;

уменьшение «ворсистой» поверхности при фрезеровании древесины поперек волокон, что особенно важно при получении профильных поверхностей;

повышение стойкости инструмента, так как сохранение остроты режущих кромок при обработке деревянных массивов в отличие от других видов обработки приобретает особое значение.

Наибольшее значение при этом придается снижению параметров вибраций. Это обстоятельство обуславливает актуальность математической модели и методики расчета параметров вибраций при фрезеровании древесины.

Многообразие условий механической обработки, стремление к созданию высокопроизводительных режущих инструментов, обеспечиваю-

щих необходимое качество выполнения операций резания, привели к разработке большого количества инструментов одного назначения. Причиной этого является недостаточное развитие расчетных методов, позволяющих прогнозировать и давать сравнительную оценку поведения инструмента для конкретных условий обработки на стадии проектирования. Поэтому рациональное использование режущих инструментов, их высокая эффективность невозможны без разработки мер по их оптимизации расчетными методами.

Формирование общего подхода и построение математической модели базировались на существующих зависимостях выбранных критериев от физических факторов процесса резания, установленных в соответствии с алгоритмом решения задачи [1, 2] путем сложного неоднородного моделирования. При всем многообразии и сложности зависимостей показателей надежности инструмента, определяющих его эффективность, от физических факторов процесса резания установлено, что влияние свойств технологической системы возрастает с применением хрупких инструментальных материалов. Оценить взаимодействие отдельных подсистем технологической системы, а также массогабаритные и геометрические показатели инструмента представляется возможным в рамках комплексной динамической модели.

Анализ показывает, что наиболее сложным, включающим в себя практически все элементы прочих видов обработки, является процесс фрезерования, который послужил основой модели. К особенностям этого процесса относится его кинематическая и, как следствие, динамическая нестабильность, обусловленная дискретным характером взаимодействия режущих элементов инструмента с обрабатываемой заготовкой и сложностью процесса формообразования. Нестационарность такого взаимодействия особенно проявляется за один оборот фрезы вследствие цикличности формирования срезов, число, форма и размеры которых изменяются в зависимости от условий контакта инструмента и обрабатываемой заготовки.

Исходим из того обстоятельства, что процесс резания характеризуется регулярно повторяющимися силовыми импульсами и относительными колебаниями инструмента и заготовки.

Технологическая система станка является системой с большим числом обратных связей, запаздыванием при работе «по следу» от прохода предыдущих резцов. Это обстоятельство, без сомнения, вносит ряд особенностей в общую динамическую картину процесса обработки. Рассматриваемая методика использует геометрическую интерпретацию и время как одну из обобщенных координат. При этом кинематическая цепь технологической системы замыкается силовой временной зависимостью, определяемой в целом через геометрический анализ мгновенных сечений срезаемого слоя. Общая структурная схема динамического взаимодействия систем инструмента и заготовки, учитывающая особенности технологической системы как системы замкнутой, имеющей обратные связи и запаздывание при работе «по следу», изображена на рис. 1.

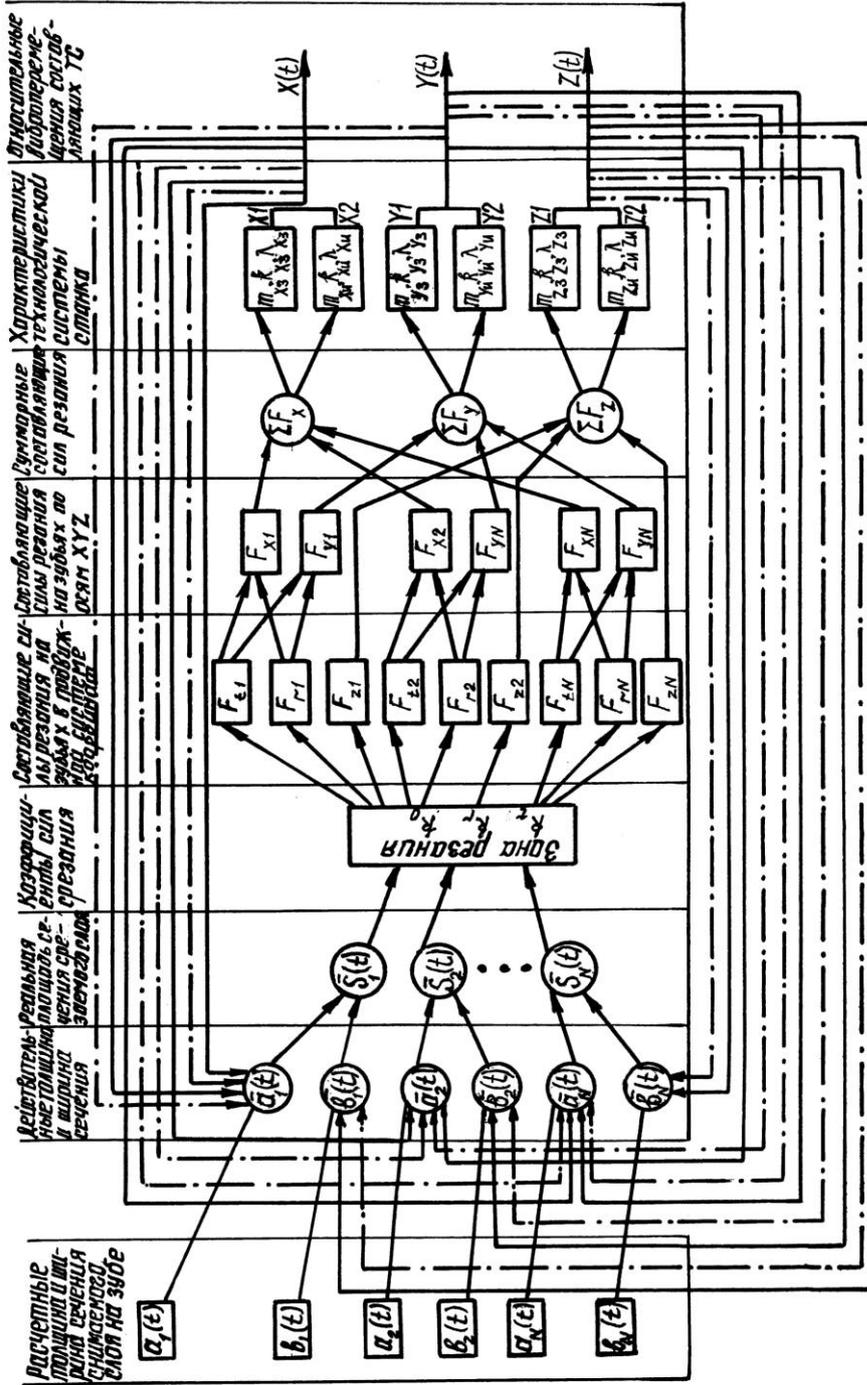


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия элементов технологической системы при обработке

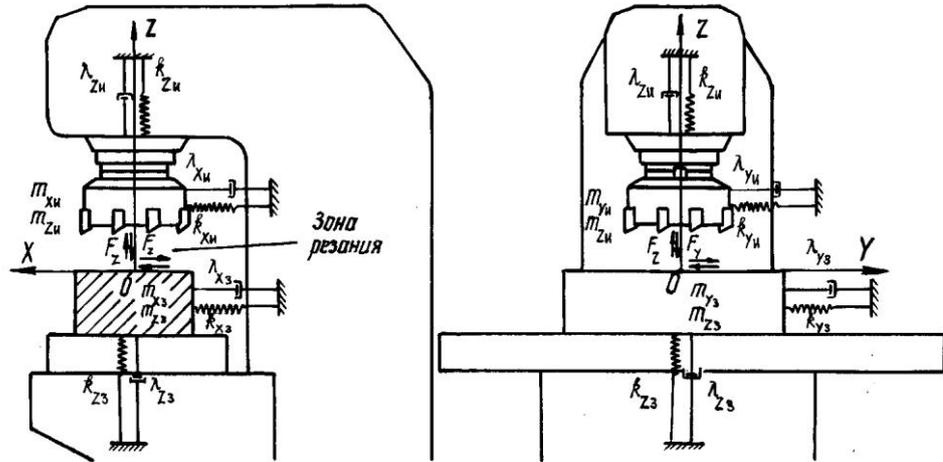
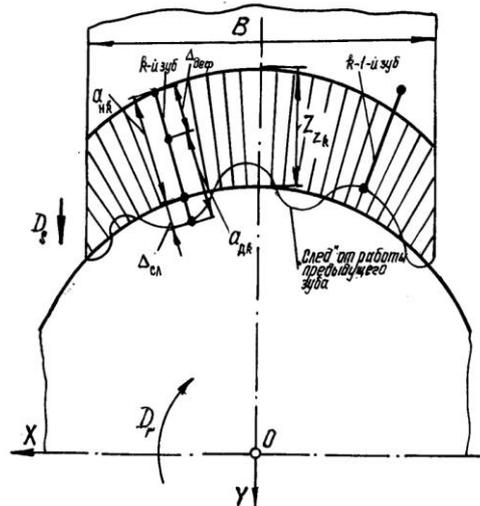


Рис. 2. Упругая технологическая система

Упругая технологическая система представлена в виде эквивалентной двухмассовой системы – системы инструмента (индекс «и») и системы заготовки («з»), совершающей колебания в 3-х взаимно-перпендикулярных направлениях (рис. 2). Эквивалентная упругая система (ЭУС) заготовки и ЭУС инструмента характеризуются приведенными к зоне резания массами m , обобщенными коэффициентами сопротивления (демпфирования) λ и жесткости k , в общем случае различными по трем координатным направлениям. Система является замкнутой. Эта замкнутость определяется взаимодействием ЭУС заготовки и инструмента с процессом резания, причем многоконтурность системы обусловлена участием в работе нескольких резцов фрезы.

Соответствующая схема изменения толщины срезаемого слоя в результате деформаций приведена на рис. 3.

Рис. 3. Изменение толщины слоя в результате деформаций технологической системы (a_{nk} – толщина слоя на k -м резце (зубе), обусловленная настройкой системы; a_{dk} – действительная толщина среза; $\Delta_{деф}$ – изменение толщины среза в результате деформации под воздействием силы резания; $\Delta_{сл}$ – изменение толщины среза в результате прохода предыдущего резца («след»))



Указанные системы взаимодействуют друг с другом через процесс резания, действие которого заменено суммарными составляющими силы резания:

$$\sum_{i=1}^N F_{Z_i} ; \sum_{i=1}^N F_{Y_i} ; \sum_{i=1}^N F_{X_i} .$$

Они являются результатом работы резцов, участвующих в резании в данный момент времени, число которых N является переменным из-за неравномерности фрезерования. На резцы действуют силы $F_{X_1}, F_{X_2}, F_{X_N}, \dots, F_{Y_1}, F_{Y_2}, F_{Y_N}, \dots, F_{Z_1}, F_{Z_2}, \dots, F_{Z_N}$, которые получены путем приведения к неподвижной системе координат OXYZ сил из системы координат, связанной с вращающейся фрезой: $F_{t1}, F_{t2}, \dots, F_{tN}; F_{r1}, F_{r2}, \dots, F_{rN}; F_{o1}, F_{o2}, \dots, F_{oN}$ – тангенциальные, радиальные и осевые составляющие на k -м резце.

Составляющие силы резания в подвижной системе координат зависят от сопротивления материала резанию и площадей действительного сечения срезаемого слоя

$$\bar{S}_1(t), \bar{S}_2(t), \dots, \bar{S}_N(t),$$

которые являются функциями времени.

Действительное сечение срезаемого слоя суть произведение действительной толщины $a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)$ на действительную ширину срезаемого слоя $b_1(t), b_2(t), \dots, b_N(t)$.

Действительная толщина и ширина сечения среза на k -м работающем резце определяются настройкой системы на заданную толщину и ширину сечения среза (кинематическая толщина и ширина сечения среза), а также изменением настройки в результате взаимных деформаций системы, произошедших в результате «влияния» всех участвующих в резании в данный момент времени резцов, и «следом» от прохода предыдущего резца. В предлагаемой расчетной схеме учтено влияние входа-выхода резца на изменение площади сечения срезаемого слоя на резцах, участвующих в процессе резания.

На основе представленной структурной схемы разработана методика расчета вибросмещений при многолезвийной обработке. Методика условно разделена на две части:

расчет сил резания, величина и характер поведения которых обусловлены схемой резания, характеристиками обрабатываемого материала, режимными параметрами, конструктивными и геометрическими характеристиками инструмента;

расчет динамических параметров двухмассовой системы, позволяющей определять вибросмещения, виброскорости по трем направлениям.

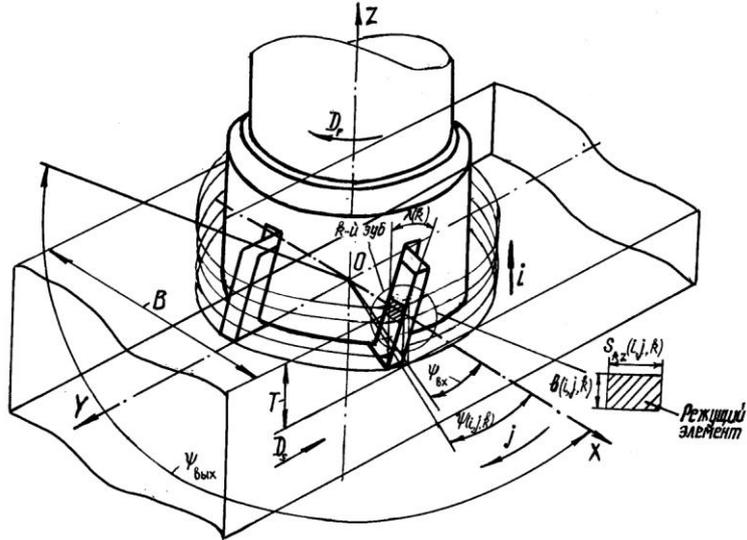


Рис. 4. Схема разбиения лезвий фрезы на элементы

При построении модели сил резания было произведено разбиение рабочих лезвий инструмента на дискретные режущие элементы (рис. 4). Мгновенное положение элемента на дуге контакта определяется углом $\psi(i, j, k)$ относительно оси OX принятой системы координат (i – номер положения элемента вдоль оси фрезы; j – номер углового положения элемента; k – номер резца, которому принадлежит дисковый элемент):

$$\psi(i, j, k) = \left[Q(j) - \sum_{m=1}^N G(m) \right] - \{ [(i-1)b(i, j, k) + b(i, j, k)/2] \operatorname{tg} \lambda(k)/R \}, \quad (1)$$

где $Q(j) = j\Delta$ – текущее угловое положение элемента при $i = 1, k = 1$;

Δ – дискретность расчета;

N – число резцов фрезы;

$b(i, j, k)$ – ширина элемента;

$\lambda(k)$ – угол наклона режущей кромки k -го резца;

R – радиус фрезы.

В выражении (1) первый член определяет положение торца k -го резца в j -м угловом положении, а второй – характеризует угол поворота элемента вдоль режущей кромки k -го резца, связанный с углом $\lambda(k)$. Угол $\psi(i, j, k)$ определялся в пределах угла контакта фрезы с заготовкой, зависящего от схемы обработки. Толщина среза на i -, j -, k -м элементах с учетом подачи на резец S_{zk} и радиального биения $\delta(k)$ на k -м резце определяется выражением

$$a(i, j, k) = S_{zk} \sin \psi(i, j, k) + \sigma(k). \quad (2)$$

Для каждого значения угла $\psi(i, j, k)$ вычисляли элементарные толщину и ширину сечения среза, окружную $F_c(i, j, k)$, радиальную $F_r(i, j, k)$ и

осевую $F_o(i, j, k)$ силы резания, действующие на дискретном элементе. Элементарные составляющие $F_i(i, j, k)$, $F_r(i, j, k)$, $F_o(i, j, k)$ приводили к ортогональной неподвижной системе координат XYZ , затем производили суммирование всех элементарных сил в подвижной и неподвижной системах координат по всем элементам и резцам и определяли полные мгновенные силы $F_i(j)$, $F_r(j)$, $F_o(j)$, $F_x(j)$, $F_y(j)$, $F_z(j)$ в j -м угловом положении. Рассчитанные значения ширины и толщины срезаемого слоя использовали в дальнейшем при расчете динамических характеристик процесса.

Расчет динамических параметров осуществляли на основе решения системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_{X\zeta} X1'' + \lambda_{X\zeta} X1' + k_{X\zeta} X1 = -\sum_{k=1}^N F_{Xk}; \\ m_{X\epsilon} X2'' + \lambda_{X\epsilon} X2' + k_{X\epsilon} X2 = \sum_{k=1}^N F_{Xk}; \\ m_{Y\zeta} Y1'' + \lambda_{Y\zeta} Y1' + k_{Y\zeta} Y1 = -\sum_{k=1}^N F_{Yk}; \\ m_{Y\epsilon} Y2'' + \lambda_{Y\epsilon} Y2' + k_{Y\epsilon} Y2 = \sum_{k=1}^N F_{Yk}; \\ m_{Z\zeta} Z1'' + \lambda_{Z\zeta} Z1' + k_{Z\zeta} Z1 = \sum_{k=1}^N F_{Zk}; \\ m_{Z\epsilon} Z2'' + \lambda_{Z\epsilon} Z2' + k_{Z\epsilon} Z2 = -\sum_{k=1}^N F_{Zk}; \end{cases}$$

(3)

$$\begin{cases} F_{Xk} = F_{ik}(t) \sin \psi_k(t) - F_{rk} \cos \psi_k(t); \\ F_{Xk} = F_{ik}(t) \cos \psi_k(t) + F_{rk} \sin \psi_k(t); \\ F_{ik} = k_t \bar{a}_k(t) \bar{b}_k(t); \\ F_{rk} = k_r F_{ik}; \\ F_{Zk} = k_o F_{ik}; \\ \bar{a}_k(t) = a_k(t) + (X1 - X2)_t \cos \psi_k(t) + (Y1 - Y2)_t \sin \psi_k(t) - \\ - (X1 - X2)_{t-\tau_{k-1}} \cos \psi_k(t) - (Y1 - Y2)_{t-\tau_{k-1}} \sin \psi_k(t); \\ \bar{b}_k(t) = b(t) + (Z1 - Z2)_t, \end{cases}$$

где $m_{X,Y,Z\zeta}$, $m_{X,Y,Z\epsilon}$ – приведенные к зоне резания массы систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей;

$\lambda_{X,Y,Z\zeta}$, $\lambda_{X,Y,Z\epsilon}$ – коэффициенты демпфирования систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей;

- $k_{X,Y,Z}$, $k_{X,Y,Zи}$ – коэффициенты жесткости систем заготовки и инструмента в направлении соответствующих осей;
- $X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2$ – абсолютные виброперемещения системы заготовки и системы инструмента;
- F_{Xk}, F_{Yk}, F_{Zk} – составляющие силы резания по соответствующим направлениям на k -м резце;
- $F_{\tau k}, F_{rk}$ – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания на k -м резце;
- $a_k(t), b_k(t)$ – закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -м резце, обусловленные настройкой технологической системы;
- k_τ, k_r, k_o – эмпирические коэффициенты, характеризующие обрабатываемый материал;
- $\bar{a}_k(t), \bar{b}_k(t)$ – истинный закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -м резце, обусловленный динамическим взаимодействием элементов технологической системы;
- $\psi_k(t)$ – текущее угловое положение k -го резца на дуге резания.

Индексы t и $t-\tau_{k-1}$ соответствуют тому, что координаты X, Y и Z для рассматриваемых систем берутся соответственно в текущий момент времени t или в момент $t-\tau_{k-1}$ (τ_k – время запаздывания k -го резца, зависящее от углового шага и угловой скорости вращения фрезы).

В каждый момент времени производили перерасчет изменения площади сечения срезаемого слоя в результате взаимных деформаций взаимодействующих подсистем. Данные, определяющие закон изменения толщины и ширины сечения срезаемого слоя на k -м резце $a_k(t), b_k(t)$ и обусловленные настройкой технологической системы, рассчитывали по методике определения составляющих силы резания. В связи с тем, что на составляющие силы резания при обработке древесины существенное влияние оказывают ориентация движения подачи по отношению к направлению волокон, влажность и некоторые другие характеристики материала. Эмпирические коэффициенты удельных сил резания целесообразно выбирать в форме эмпирических моделей по результатам статистической обработки экспериментальных данных.

Решение системы уравнений (3) осуществлено методом Рунге – Кутты. Выходными данными являются относительные и абсолютные виброперемещения, виброскорости систем заготовки и инструмента, составляющие силы резания, вычисленные в предположении, что система является абсолютно жесткой, и с учетом деформаций. С целью качественного сравнения различных схем обработки предусмотрен анализ во временной (в функции угла поворота фрезы) и частотной областях. Для анализа колебательного процесса в частотной области была реализована стандартная процедура дискретного преобразования Фурье на основе быстрых алгоритмов.

На основе построенных моделей были разработаны алгоритмы расчета и программы, реализующие эти алгоритмы.

Предложенные модель и методику расчета использовали при проектировании и разработке типоразмерного ряда цилиндрических дереворежущих фрез с увеличенным числом резцов, выполняемых по заданию администрации Архангельской области (рис. 5).

Разработанная модель апробирована при проектировании ряда металлорежущих инструментов: торцевой фрезы, трехступенчатой трехсторонней фрезы, резцовой головки для подрезки фасок труб и корончатой фрезы для обработки плавниковых труб.

Предложенный подход эффективен не только для различных видов фрезерования древесины, но и при проектировании операций пиления круглыми пилами, а также при обработке фасонных поверхностей в условиях переменных дуги резания и ширины стружки по длине режущей кромки любым многолезвийным инструментом.

Таким образом, при заданной кинематике обработки именно нахождение оптимальных вида, типа и конструкции инструмента, наряду с управлением схемой резания, позволяет оптимизировать распределение деформаций при обработке, обеспечивать точность формообразования и производительность обработки.

Предложенная модель в перспективе дает возможность решать вопросы, связанные с качеством обработанных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малегин В.И. Диагностические методы надежности обеспечения составного инструмента для ГАП // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – № 1. – С. 110–116.

2. Малегин В.И. Пути решения инструментального обеспечения надежности технологических процессов // Машиностроение. – 1993. – № 2. – С. 84–89. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Севмашвтуз
Поступила 28.05.01

V.I. Malygin, L.V. Kremleva

Technique of Calculating Dynamic Parameters of Wood Milling Process Taking into Account Kinematic Instability of Technological System

Mathematical model and calculation procedure for vibration parameters under milling are suggested that allow optimizing construction of cutters at the stage of tool designing and its choice under the technological process development.

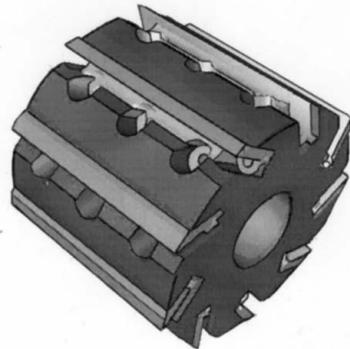


Рис. 5. Дереворежущая фреза с увеличенным числом режущих элементов