

УДК 621.89

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОНЦЕВЫМИ
ФРЕЗАМИ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИКОЙ ПРОЦЕССА**

А. А. Губанова

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

anatoliya81@mail.ru

Целью работы является повышение эффективности фрезерования деталей концевыми фрезами при попутном фрезеровании за счет управления динамикой процесса на основе предложенного автором алгоритма, включающего требования к инструменту, выбору его геометрии, технологических режимов и параметров точности станка, характеризуемых кинематическими возмущениями. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что раскрыты особенности влияния динамического режима на параметры качества формируемой поверхности. На основе этого показаны пути синтеза динамической системы фрезерования, удовлетворяющей требуемому качеству поверхности.

Ключевые слова: обработка поверхности, скорость резания, жесткость фрезы, качество поверхности.

Введение. На многих предприятиях машиностроения и авиакосмической отрасли детали, имеющие сложный геометрический профиль, приходится обрабатывать на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). При этом предъявляются высокие требования к таким параметрам качества формируемой поверхности как геометрическая точность, шероховатость и волнистость. Все указанные параметры принципиально зависят от динамики фрезерования, поэтому при выборе оснастки, параметров инструмента и допустимых вариаций технологических режимов необходимо принимать ее во внимание. При управлении процессом фрезерования необходимо решать три проблемы. Первая проблема связана с определением координат переключения, при которых минимизируются приведенные затраты на изготовление партии деталей. Вторая определяется выбором траекторий движения исполнительных элементов, то есть программой ЧПУ, учитывающей влияние формообразующих движений на динамику системы. Третья проблема характеризуется минимизацией возмущений, действующих на систему

UDC 621.89

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF
MILLING WITH END-MILLING CUTTERS
BY PROCESS DYNAMICS CONTROL**

A. A. Gubanova

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

anatoliya81@mail.ru

The aim of this work is to increase the efficiency of milling by end mills at cut-down milling due to process dynamics control according to the proposed by the author algorithm, which includes requirements to the tool, the choice of its geometry, process conditions and parameters of accuracy of the machine, characterized by the kinematic perturbations. The obtained results allow the author to conclude that he has found out the features of the influence of dynamic mode on the parameters of quality of the formed surface. Based on this, the ways of synthesis of the dynamic milling system that meet the required surface quality are shown.

Keywords: surface treatment, cutting speed, milling cutter hardness, surface quality

(кинематические возмущения со стороны приводов станка, радиальные биения шпинделя, погрешность установки инструмента и пр.). На параметры качества поверхности оказывают влияние траектории каждого зуба фрезы, самостоятельные процессы в зоне резания, не связанные с этими траекториями. На параметры шероховатости оказывают влияние направления колебательных смещений. Таким образом, управление качеством характеризуется сложными взаимосвязанными процессами и свойствами взаимодействующих с обработкой подсистем. Целью данной работы является разработка метода улучшения качества поверхности при попутном фрезеровании путем оценивания предельного состояния процесса резания.

Этапы повышения эффективности процесса фрезерования. Фрезерование боковыми лезвиями концевых фрез широко распространено в общем машиностроении и авиастроении. Приведем пример детали, изготавливаемой на ПАО «Роствертол» (рис.1). Это вилка, с помощью которой крепится лонжерон к несущему винту вертолета. К внутренней поверхности вилки предъявляются высокие требования к качеству поверхности, так как параметры точности и качества поверхности влияют на долговечность узла крепления, и, следовательно, на ресурс вертолета. Данные по усталостным испытаниям узла крепления лонжерона с несущей системой вертолета с помощью вилки, выполненные в условиях ПАО «Роствертол» показывают, что снижение высоты волн с 12 до 6 мкм позволяет в 2 и более раза повысить усталостную долговечность. Это определяет требования к качеству поверхности аналогичных изделий. На усталостную долговечность оказывает влияние и шероховатость.

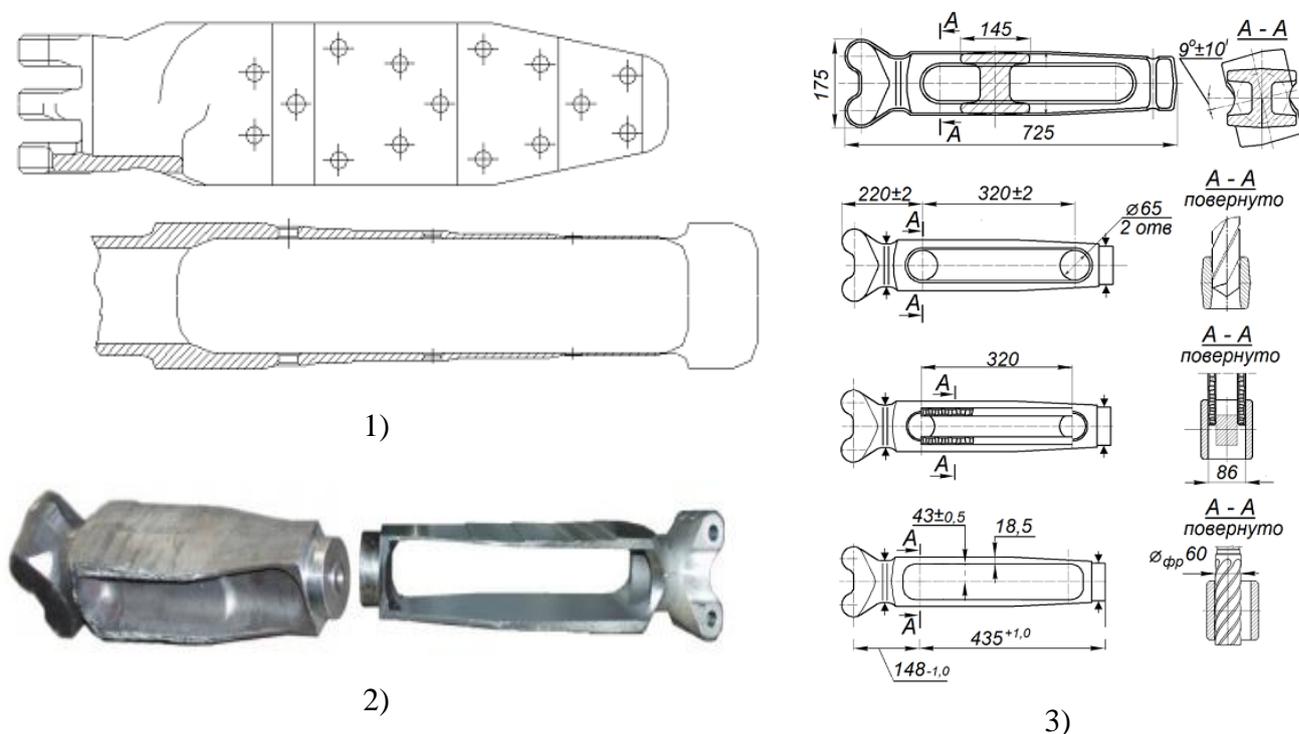


Рис. 1. Пример детали: 1 — эскиз; 2 — фото заготовки; 3 — операционные эскизы обработки наконечника лопасти несущего винта

Выполненные исследования позволили сформулировать эффективный алгоритм выбора и настройки процесса контурного фрезерования концевыми фрезами при обработке деталей, ширина обрабатываемой поверхности которых превышает диаметр фрезы. Этот случай относится к

обработке большой номенклатуры деталей на предприятиях авиационной промышленности. Пример эскиза такой детали приведен на рис. 1, эскиз технологической наладки — на рис. 2. Значения жесткости даны по средней линии детали. На рис. 3 представлены только диагональные элементы матрицы. Обеспечение качества деталей, имеющих тонкие и мало жесткие стенки, есть многофакторная проблема. Ее решение включает несколько этапов [3,4].

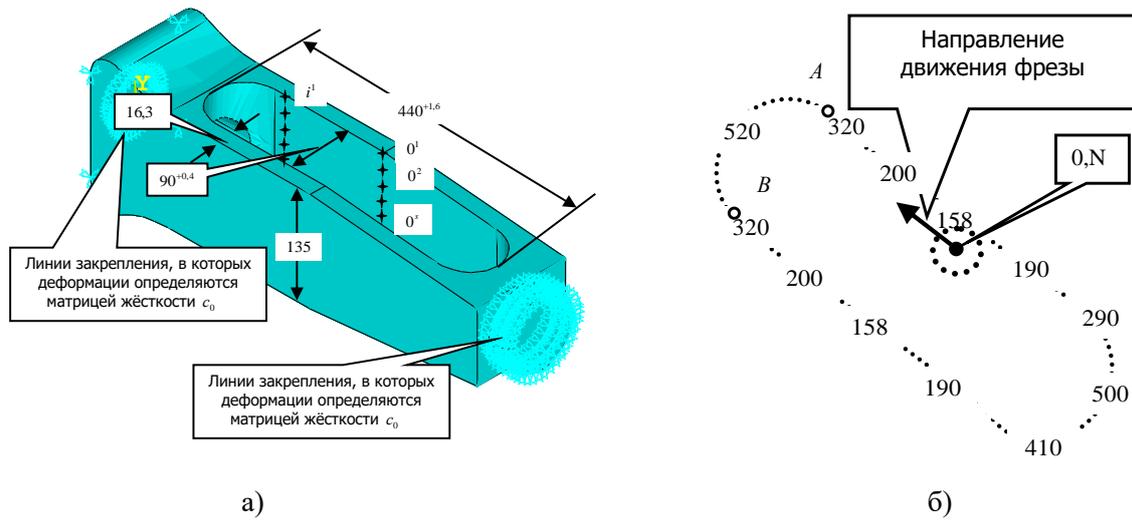


Рис. 2. Эскиз заготовки при обработке внутренней поверхности (а) и пример распределения коэффициента жёсткости (кг/мм) в направлении, нормальном к образующей (б) (наконечник лопасти 8АТ-270-25 на рис.1)

Первый этап — выбор стратегии обработки. Здесь возможны два варианта. Первый вариант связан с последовательными проходами для обработки верхней части заготовки, затем последующей части, как показано на рис. 4. Это области «1», «2» и «3».

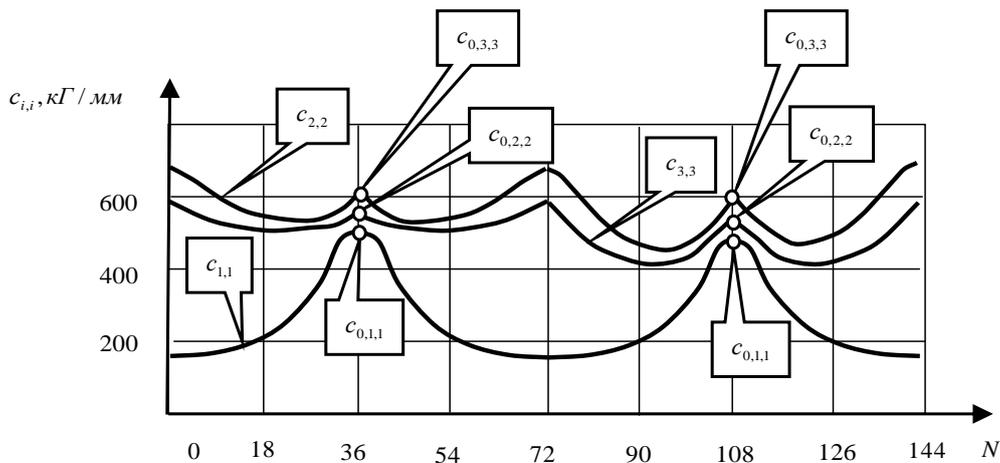


Рис. 3. Изменения диагональных элементов матрицы жёсткости заготовки, материал 40ХН2МА

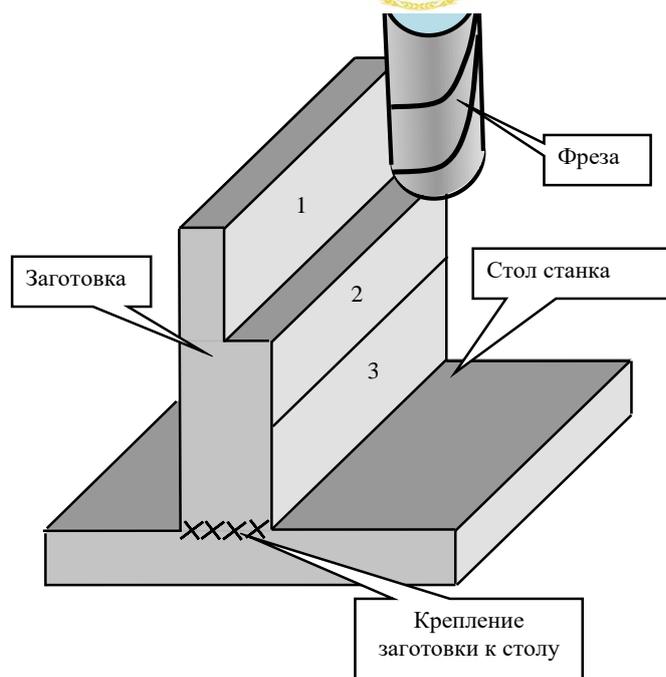


Рис. 4 Схема первой стратегии обработки тонкостенной заготовки

В данном случае нижняя часть за счет повышенной жесткости заготовки уменьшает жесткость обрабатываемой части детали. Однако на линии сопряжения последовательных проходов (границы областей «1», «2», «3») всегда образуется неровность, которая приводит к погрешности формы. Кроме этого эффективность применения такой стратегии существенно снижается. Второй вариант связан с обработкой сразу всей поверхности. Он более производительен, но приводит к вышеуказанным погрешностям. По этой причине необходимо оставлять припуск для дополнительных чистовых проходов. Рассмотрим вторую стратегию, как более производительную, но сложную в анализе и синтезе [5].

Второй этап — выбор станка. Для фрезерования поверхности, ширина которой больше диаметра фрезы, желательно выбрать станок с пятикоординатным контурным управлением. Это обусловлено необходимостью компенсации погрешности изгибных деформаций фрезы. Кроме этого, для компенсации зависимости жесткости детали вдоль траектории движения по образующей формируемой поверхности необходимо обеспечивать неизменное отношение силы к суммарной приведенной жесткости в направлении, нормальном к образующей. Для этого, как возможная стратегия обработки, рассматривается программное управление скоростью движения стола по направлению формируемой образующей.

Третий этап — диагностирование кинематических возмущений станка в единстве оценивания амплитуды радиальных биений шпинделя и вариаций скоростей подачи движения стола. Для оценивания кинематических возмущений можно воспользоваться методикой, изложенной в работах [1,2]. Она основана на обработке информации от датчиков обратной связи по положению стола, которыми снабжены практически все станки с ЧПУ с контурным управлением. Характеристики кинематических возмущений, представленные, например, автокорреляционными функциями, характеризуют предельно достижимую точность обработки на конкретном станке.

Четвертый этап — выбор инструмента. При выборе инструмента необходимо принимать во внимание следующие особенности.

1) Число зубьев (шаг между зубьями фрезы), с учетом угла наклона режущих лезвий, должно обеспечивать непрерывность процесса без перекрытия контактов. Диаметр фрезы выбирается на основе компромисса между желанием его увеличить для обеспечения повышенной жесткости и необходимостью формирования поверхности на участках ее искривления (на участке «А-В» на рис. 2 б).

2) Необходимо обеспечить геометрическую точность режущих лезвий фрезы. В описываемом случае точность радиуса режущих лезвий должна быть в два-три раза выше требуемой точности поверхности. Необходимо учитывать, что при фрезеровании, в отличие от точения, формируемая поверхность непосредственно определяется всей геометрией каждого зуба по оси вращения инструмента.

3) При заточке зубьев фрезы необходимо выбирать, по возможности, передний угол режущего клина не менее 12° – 15° . В этом случае при движении инструмента ориентация силы имеет проекцию, практически совпадающую с направлением движения фрезы. Тогда на участках формообразования будет минимальное отклонение инструмента от идеальной траектории.

4) Угол наклона зубьев фрезы необходимо выбирать таким, чтобы осевая составляющая силы, как отмечено ранее, имела направление в сторону стола, на котором закреплена обрабатываемая заготовка. В описанном случае — это фреза с правой ориентацией наклона зубьев.

5) Рекомендуемые значения геометрических параметров фрезы при обработке материала.

Пятый этап — выбор технологических режимов и управления.

При обработке детали, у которой параметры жесткости остаются неизменными, величина подачи на зуб при обработке стали 40ХН2МА зависит от требований к качеству формируемой поверхности. Выше показано, что показатель шероховатости поверхности учитывает кинематическую характеристику, возрастающую при увеличении подачи; траекторию, зависящую от формируемых притягивающих множеств и самостоятельные процессы в зоне резания. По мере развития износа инструмента соотношение между ними изменяется. На начальном этапе основной вклад имеет кинематическая составляющая. Затем существенно возрастает влияние самостоятельных процессов в зоне резания. Образующая траектория зависит от параметров динамической системы и эволюционно изменяющихся параметров динамической связи. Кроме этого, необходимо учитывать, что при подаче на зуб меньшей, чем $0,01$ – $0,02$ мм, может наблюдаться увеличение шероховатости за счет возможного перескока траектории движения инструмента. При этом волнистость может увеличиваться еще больше. Поэтому, строго говоря, для обеспечения неизменных значений высоты микронеровностей необходимо изменять величину подачи при обработке одного типоразмера деталей.

При обработке детали, у которой изменяются параметры жесткости вдоль траектории движения инструмента, желательно при построении программы установить промежуточные узловые точки для интерполяции траектории, обеспечивающей малые вариации отношения силы к значению жесткости в направлениях, нормальных к обрабатываемой поверхности.

При обработке участков поверхности, на которых изменяется направление движения стола (рис. 2б участок «А-В»), дополнительно необходимо учитывать изменение угла контакта фрезы с заготовкой, который влияет на силы резания, и, следовательно, на упругие деформации и всю динамику системы.

Скорость резания выбирается из условий обеспечения устойчивости траекторий. Как известно [1], с одной стороны при увеличении скорости возрастает запас устойчивости, с другой — при увеличении частоты вращения инструмента, возможно параметрическое самовозбуждение

системы. Теоретические и экспериментальные исследования [3,5] показывают, что для потери устойчивости в системе достаточно незначительного увеличения частоты вращения шпинделя и скорости резания. Так как динамическая характеристика процесса резания зависит от износа инструмента и точности геометрии инструмента, значит, существует оптимальное значение скорости, при которой одновременно отсутствуют параметрические самовозбуждения и система устойчива.

На скорость резания накладываются ограничения, обусловленные отсутствием биений в деформационных смещениях инструмента на участках формообразования инструмента.

Учитывая вышеперечисленное, можно утверждать, что динамика процесса фрезерования определяется параметрами динамических подсистем, взаимодействующих с процессом обработки, технологическими режимами и геометрией инструмента. Принципиально возможно изменять все эти характеристики для обеспечения требуемых показателей качества формируемой поверхности.

Приведем пример эффективности управления процессом на примере обработки внутренней поверхности вилки крепления лонжерона к несущей системе вертолета. Исходные технологические параметры, положенные в основу построения программы ЧПУ на чистовых проходах, следующие: подача на зуб — 0,02 мм; скорость резания — 0,8 м/с; величина технологического припуска — 2,5 мм. Использовалась четырехзубая фреза из Р6М5 диаметром 60,0 мм с углом наклона зуба 35°. После динамического анализа и экспериментальной проверки установлено, что частота вращения шпинделя, при которой отсутствует параметрическое самовозбуждение, лежит ниже 500 Гц. Кроме этого, согласно диаграмме устойчивости, система теряет устойчивость при скорости, меньшей 0,8 м/с. На основе этого установлено значение скорости безвибрационного фрезерования в пределах (0,8–1,4) м/с. При подаче на зуб меньше 0,01 мм, возрастает нестационарность формирования микрорельефа. В связи с этим определены следующие рациональные режимы: скорость резания 1,2 м/с (соответствует частоте вращения шпинделя 400 об/мин); величина подачи на зуб — 0,04 мм. Для уменьшения вариаций сил число зубьев увеличено до 6. При таком режиме после одного прохода улучшились характеристики качества формируемой поверхности (рис. 5). В результате, при чистовой обработке внутренней поверхности для получения требуемого качества, удалось уменьшить число проходов при обработке с трех до одного. Кроме этого для фиксирования наступления предельного состояния процесса фрезерования были апробированы системы диагностирования на основе измерения шума процесса с помощью измерительного микрофона.

Метод оценивания качества поверхности с помощью измерительного микрофона. Для оценивания виброакустического шума использовался измерительный микрофон NTI DL 1 фирмы Сони, имеющий диапазон равномерной характеристики преобразования 10 Гц–12 кГц. В этом частотном диапазоне неравномерность характеристики не превышает 10 дБ, чувствительность равна 1,0 мВ/Па. Таким микрофоном снабжен станок MB-46VAE на котором проводились эксперименты в условиях лаборатории «Южного центра модернизации машиностроения ДГТУ». Программное обеспечение, используемое на станке, позволяет вычислять автоспектр мощности звукового излучения, но не оценивать состояние процесса резания и качество изготовления деталей.

Мощность звукового излучения зависит от вибрационной активности всех элементов станка. Однако главным источником звукового излучения является процесс резания, который излучает звуковые волны через механизм колебаний поверхностей инструмента и обрабатываемой заготовки. Без процесса резания звуковое излучение имеет ограниченную мощность и частотный

состав колебаний является низкочастотным. Он не превышает (5–10) Гц. При резании частотный состав акустического шума доходит до (5,0–10,0) кГц.

На рис. 5 представлена функция когерентности между колебательными ускорениями $a(t)$ и звуковым давлением, вычисляемая по формуле:

$$(k_{a,p})^2(\omega) = \frac{|S_{a,h}(j\omega)|^2}{S_a(\omega)S_h(\omega)} \quad (1)$$

где $S_{a,h}(j\omega)$ — взаимный спектр $a(t)$ и $h(t)$; $S_a(\omega), S_h(\omega)$ — автоспектры траектории формообразующих движений $a(t)$ и функции профиля поверхности $h(t)$.

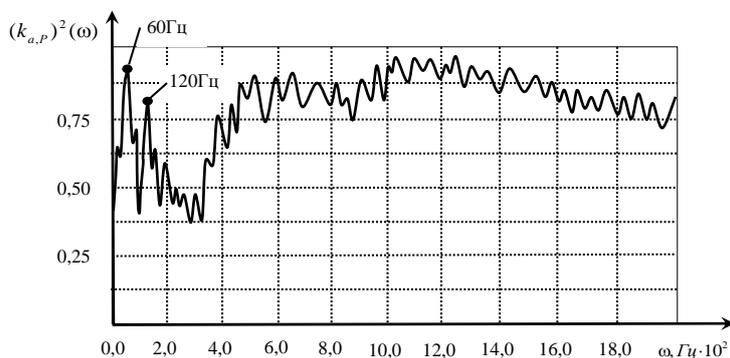


Рис. 5 Пример функции когерентности $(k_{a,p})^2(\omega)$

Функция соответствует фрезерованию шестизубой фрезой диаметром 30мм со скоростью резания 1,8 м/с. В этом случае частота следования импульсов от контактов зубьев равна 60Гц. В низкочастотной области функция когерентности резко возрастает на дискретном множестве частот равных или кратных частоте стационарных периодических деформаций, обусловленных периодами следования контактов зубьев фрезы. В нашем случае — это частота 60Гц. Функция показывает обусловленность акустического шума, измеренного микрофоном, колебательными ускорениями поверхности заготовки. Она показывает, что в частотной области (0,6–2,0) кГц акустический шум, в основном, определяется колебаниями заготовки, но не узлов станка. Кроме этого, анализ сигнала показывает, что в высокочастотной области за счет колебаний, обусловленных стационарными периодическими деформациями, наблюдается амплитудная модуляция акустического шума. В связи с этим для построения информационной модели можно использовать два основных признака. Первый основан на оценке \aleph_1 , получаемый на основе операции скалярного перемножения сигнала с выхода микрофона и опорного сигнала с частотой периодических установившихся стационарных деформаций.

$$\aleph_1 = \int_0^T p(t) \sin(\Omega_0 t) d\Omega_0 t, \quad (2)$$

где Ω_0 — частота стационарных периодических деформационных смещений, обусловленная периодическими процессами последовательной обработки каждым зубом.

Второй формируется с помощью высокочастотной составляющей сигнала и выделения из нее огибающей \aleph_2 . Тогда параметры \aleph_1 и \aleph_2 , отсчитываемые в относительных единицах к интегральному значению акустического шума, характеризуют информационное пространство,

которое можно разбить на классы по уровню высоты микронеровностей. На рис. 6 приведен пример разбиения информационного пространства на два класса по критерию достижения системы предельного состояния. Данные соответствуют обработке стали 40ХН2МА концевыми фрезами $\varnothing 30,0$ мм с числом зубьев $k=6$, длина режущей части $L_p=145$ мм. Материал режущей части фрезы — Р9К5, угол наклона винтовой канавки $\omega=35^\circ$

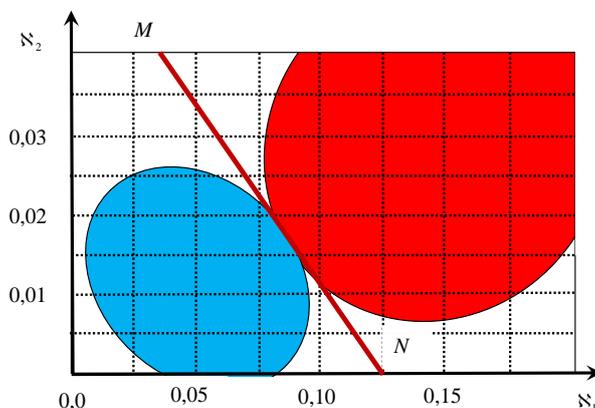


Рис. 6. Пример разбиения информационного пространства при оценивании предельного состояния на основе использования измерительного микрофона

Выводы. Предложенный алгоритм (этапы) обеспечивает повышение качества поверхности при фрезеровании концевыми фрезами. Он включает требования к инструменту, выбору его геометрии, технологическим режимам параметров точности станка. В общем случае проблема улучшения микрорельефа формируемой поверхности решается с помощью метода, основанного на использовании сведений об акустическом шуме, измеренном микрофоном, с последующей обработкой информации. Предложенный метод позволяет в процессе резания оценивать предельные состояния процесса для получения информации о замене инструмента и его переналадки.

Достигнуты следующие параметры качества при обработке наконечника лопасти несущего винта: скорость резания — 1,2 м/с (соответствует частоте вращения шпинделя 400 об/мин); величина подачи на зуб — 0,04 мм. Для уменьшения вариаций сил число зубьев увеличено до 6. В результате после одного прохода фрезы удалось улучшить характеристики качества формируемой поверхности.

Разработанные рекомендации по выбору параметров инструмента и технологических режимов обработки, а также метод для контроля критического состояния процесса могут быть приняты к внедрению в реальных условиях на предприятиях авиационной промышленности.

Библиографический список

1. Заковоротный, В. Л. Особенности формирования притягивающих многообразий в окрестности стационарных траекторий попутного фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — № 3 (86). — С.23–38.
2. Губанова, А. А. Виброакустическая диагностика фрезерования концевыми фрезами / А. А. Губанова, Н. Н. Черненко // Юбилейная конференция студентов и молодых ученых, посвященная 85-летию ДГТУ [Электронный ресурс] : сб. трудов. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С.5089–5091.



3. Заковоротный, В. Л. Определение оптимальных траекторий при обработке с учётом эволюции процесса резания / В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, А. А. Губанова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 3 (78). — С.5–12.

4. Заковоротный, В. Л. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы/ В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : сб. трудов VI междунар. науч.-практ. конф. — 2014. — С.51–70.

5. Заковоротный, В. Л. Определение оптимальных координат переключения циклов обработки в эволюционной динамической системе резания/ В. Л. Заковоротный, В. П. Лапшин, А. А. Губанова // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2014. — № 4 (179). — С.59–63.