

УДК 621.914

Д.В. Криворучко, канд. техн. наук,  
В. А. Залога, д-р техн. наук,  
С.С. Емельяненко, бакалавр,  
Сум. гос. ун-т

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЖИМА АВТОКОЛЕБАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

*Д.В. Криворучко, В.О. Залога, С.С. Емельяненко.* **Идентифікація режиму автоколивань в технологічній системі при фрезеруванні кінцевими фрезами.** Запропоновано визначення поняття стійкості процесу фрезерування кінцевими фрезами до автоколивань. Розглянуто методику ідентифікації режиму автоколивань в технологічній системі при фрезеруванні кінцевими фрезами.

*D.V. Kryvoruchko, V.O. Zaloha, S.S. Yemelyanenko.* **Free-running identification in a technological systems on end milling.** The definition of the notion of end milling process tolerance for free-running is proposed. The procedure of identifying free-running operation in a technological system on end milling is considered as well.

Процесс фрезерования концевыми фрезами находит все большее применение в современной машиностроении. Его реализация всегда сопровождается колебаниями элементов технологической системы (ТС). Всегда имеют место вынужденные колебания и автоколебания.

Вынужденные колебания возникают в результате действия внешней силы: периодического врезания зубьев фрезы в заготовку, дисбаланса частей станка и т.п. Их частота и амплитуда пропорциональны частоте и амплитуде внешней вынуждающей силы. “Толчком” для возникновения автоколебаний также является внешняя вынуждающая сила, но их частота и амплитуда определяются свойствами самой системы и не зависят от частоты и амплитуды внешней вынуждающей силы. Поэтому важно разработать критерий и методику экспериментальной идентификации режима автоколебаний при фрезеровании концевыми фрезами.

В общем случае под устойчивостью системы понимают ее способность возвращаться в исходное или близкое к нему положение после прекращения действия факторов (возбуждений), которые вывели систему из состояния начального равновесия [1]. Применительно к процессу концевой фрезерования это означает, что устойчивым к автоколебаниям процессом фрезерования является тот процесс, в котором резание каждым новым зубом не сопровождается увеличением амплитуды автоколебаний. Практика показывает, что возможен случай фрезерования, **неустойчивого** к автоколебаниям. Он имеет место, когда внутренние силы сопротивления в ТС меньше сил, порождающих автоколебания, и амплитуда этих автоколебаний возрастает до такой величины, которая обеспечивает равенство подводимой энергии внутреннему ее рассеиванию. Как правило, в этом случае амплитуда автоколебаний значительна и по величине превосходит амплитуду вынужденных колебаний.

Автоколебания в ТС при фрезеровании концевыми фрезами возникают на частотах от 150 до 1000 Гц, а иногда и до 3000 Гц.

Таким образом, критерий устойчивости процесса фрезерования концевыми фрезами к автоколебаниям целесообразно сформулировать таким образом: *процесс концевой фрезерования устойчив к автоколебаниям в том и только в том случае, если амплитуда колебаний в диапазоне частот от 150 до 3000 Гц на частотах, не кратных частоте встречи зубьев фрезы с заготовкой, не больше амплитуды колебаний на частотах, кратных частоте встречи зубьев фрезы с заготовкой.* Если критерий выполняется, можно говорить об устойчивом режиме автоколебаний, в противном случае — о неустойчивом режиме автоколебаний.

В процессе фрезерования колебательные движения совершают все элементы ТС, включая вращающуюся фрезу и шпиндель станка. В связи с этим экспериментально измерить амплитуду

колебаний всех элементов ТС и выявить из них наибольшую чрезвычайно сложно. Поэтому предлагаемый многими авторами критерий устойчивости такого сложного процесса, как процесс фрезерования концевыми фрезами, по амплитуде колебаний является весьма сложно реализуемым на практике.

Следуя идеям [2, 3], предлагается оценивать амплитуду колебаний элементов ТС по величине звукового давления, создаваемого акустическим излучением на мембрану микрофона. В этом случае амплитуда колебаний электрического напряжения на выходе микрофона пропорциональна амплитуде колебаний элементов ТС. Этот сигнал может быть легко зарегистрирован и обработан с помощью ЭВМ. В результате сформулированный критерий устойчивости процесса фрезерования концевыми фрезами к автоколебаниям может быть легко проверен экспериментально.

В качестве примера рассмотрим реализацию методики для идентификации режима автоколебательного процесса в технологической системе при фрезеровании концевыми фрезами на вертикально-фрезерном станке модели 6Р13Ф3 с системой ЧПУ 2С42 (рис. 1).

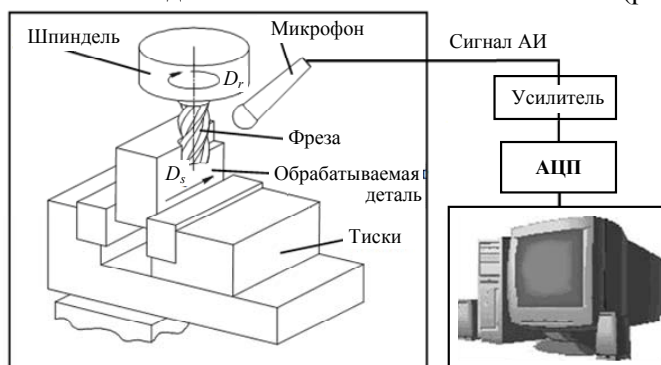


Рис. 1. Экспериментальная установка для регистрации сигнала АИ процесса КФ

Система регистрации акустического излучения включала в себя приемник звуковых волн (микрофон), помещенный в непосредственной близости с зоной обработки, усилитель, АЦП, ЭВМ с процессором Celeron 1700. Использовались встроенные в материнскую плату ЭВМ усилитель звукового сигнала и АЦП. Для получения достоверных данных необходимо использовать высококачественный микрофон, например, группы конденсаторных электретных микрофонов [2]. Поэтому в качестве приемника сигнала АИ использовался микрофон фирмы SHURE модели С606 (рис. 2).

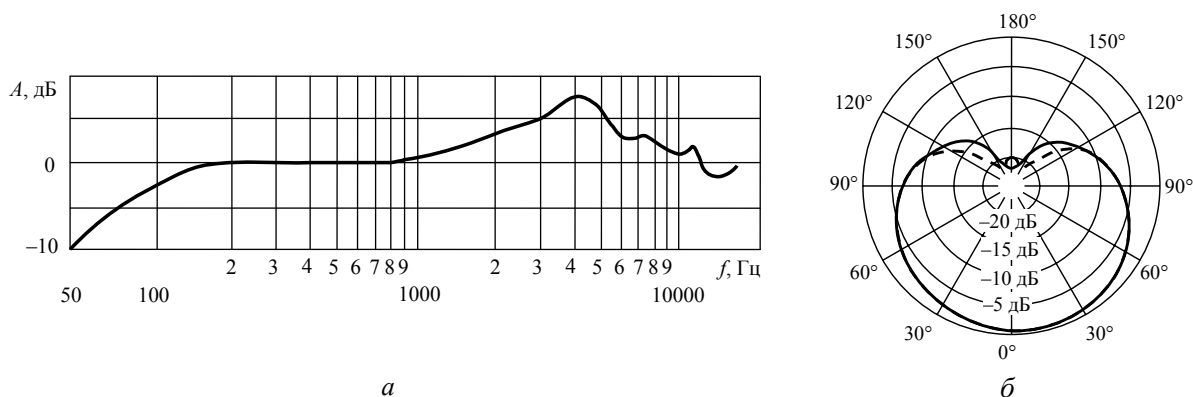


Рис. 2. Характеристики микрофона фирмы SHURE модели С606: амплитудно-частотная характеристика (а) и диаграмма направленности микрофона (б): ———— 500 Гц, - - - - - 6400 Гц

Оцифровка сигнала АИ осуществлялась с частотой дискретизации  $f_d = 44100$  Гц с помощью программы Sound Forge 7.0. Регистрация АИ процесса фрезерования в установившемся режиме осуществлялась в период времени, не менее  $T = 10 \cdot T_W$  [4], где  $T_W$  — длительность од-

ного окна сигнала в данной реализации. Размер окна согласно рекомендациям должен удовлетворять условию  $T_W \geq 3T_{\max}$ , где  $T_{\max}$  — период самой низкой частоты сигнала, подлежащего регистрации [4]. При фрезеровании концевой фрезой этот период равен периоду вращения фрезы  $T_{\max} = 1/n$ , где  $n$  — частота вращения фрезы, Гц.

Получаемый в опытах сигнал включает в себя пять технологических этапов (рис. 3): включение шпинделя; врезание фрезы в обрабатываемую заготовку; фрезерование заготовки в установившихся условиях; выход фрезы из заготовки; останов шпинделя. Наибольший интерес представляет этап фрезерования заготовки в установившихся условиях. Поэтому данные именно об этом этапе были выделены из общего набора данных.

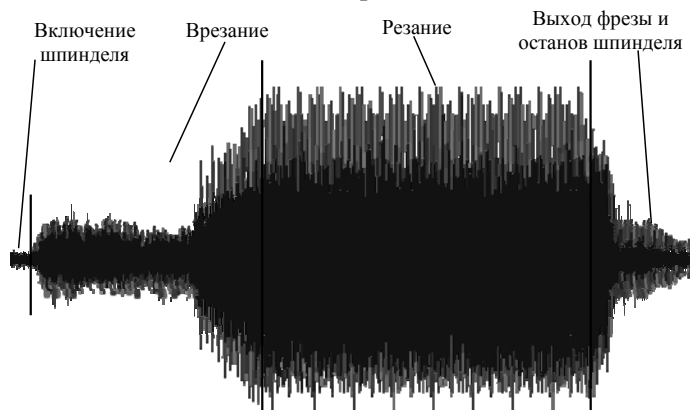


Рис. 3. Сигнал АИ процесса концевой фрезерования

Оценка амплитуд колебаний на каждой частоте может быть выполнена с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5]. Вместе с тем, из-за наличия множества шумов, присутствующих в сигнале АИ процесса концевой фрезерования, по полученному спектру трудно судить о превалирующей гармонике в сигнале и ее амплитуде (рис. 4, а). Уменьшить шумы возможно заданием более широких интервалов на оси частот при построении спектра. Однако, как показали опыты, это приводит к потере информации об амплитуде колебаний на частотах менее 100 Гц.

Более эффективным является способ построения спектра методом MUSIC (Multiple Signal Classification), позволяющий определить частоты и уровни (амплитуд или мощностей) основных гармонических составляющих сигнала в диапазоне частот от 0 до  $0,5 f_a$  (рис. 4, б). В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала [5]. Спектр, полученный методом MUSIC с помощью MATLAB 6.5 при количестве выделяемых гармоник, равном 5, наглядно показывает преимущества метода MUSIC по сравнению с БПФ с точки зрения выделения главных гармоник и фильтрации шумов. В отличие от БПФ в спектре, полученном методом MUSIC, гармоники в области низких частот (до 100 Гц) не пропадают, а концентрируются в один пик около частоты, равной 0 Гц. Это позволяет достоверно сравнивать амплитуды вынужденных колебаний и автоколебаний при небольшом количестве главных гармоник.

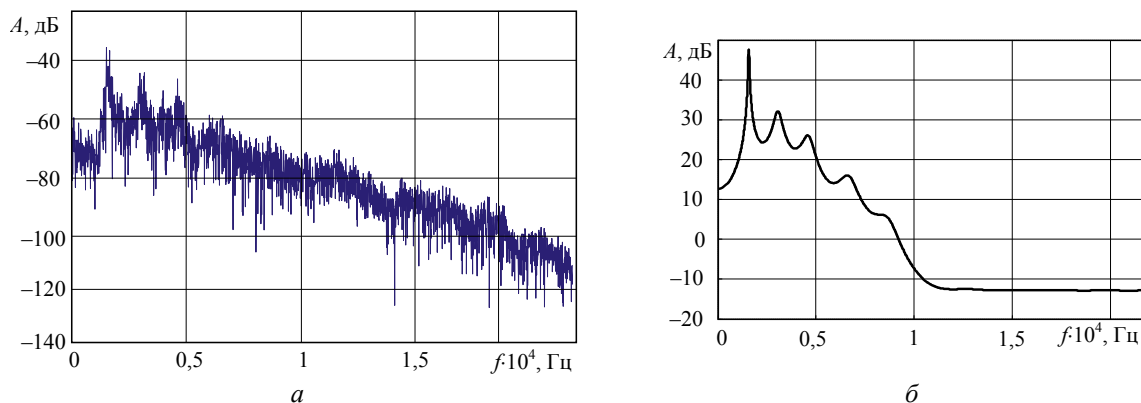


Рис. 4. Спектры сигнала АИ, полученные методом БПФ (а) и методом MUSIC (б) при  $n=2000$  об/мин,  $t=15$  мм,  $b=40$  мм,  $S_z=0.08$  мм,  $D_{фр}=40$  мм

Доверительный интервал получаемого спектра АИ определяется неравенством [8]

$$\frac{kA(f)}{\chi^2_{k;\alpha/2}} < A(f) < \frac{kA(f)}{\chi^2_{k;1-\alpha/2}},$$

где  $k$  — число степеней свободы (количество окон);

$\chi^2_{k;\alpha/2}$ ,  $\chi^2_{k;1-\alpha/2}$  — Хи-квадрат распределения соответственно нижней и верхней границы доверительного интервала при малой вероятности ( $\alpha=5\%$ ) и числе степеней свободы  $k=10$  ( $\chi^2_{k;\alpha/2} = 20,48$ ,  $\chi^2_{k;1-\alpha/2} = 3,25$ ).

Рассмотрим некоторые результаты проведенных опытов. Анализ сигнала, зарегистрированного при выключенном шпинделе станка, показал, что его амплитудный спектр не имеет явно выраженных главных гармоник (рис. 5, а). Небольшие возмущения, по-видимому, связаны с посторонними шумами в цехе.

При включении вращательного движения шпинделя станка происходит рост амплитуды колебаний как на низких, так на высоких частотах, что связано с работой коробки скоростей станка (рис. 5, б). Расчеты показали, что большинство из этих частот кратны частотам зацепления зубьев шестерен в коробке скоростей. Следовательно, при анализе процесса фрезерования они не должны приниматься во внимание.

При фрезеровании амплитуда главных гармоник может возрасти как на низких частотах порядка 20...130 Гц (рис. 5, в), так и на высоких частотах 1,5...5 кГц (рис. 5, г). В первом случае преобладают колебания с частотами, кратными частотам вынужденных колебаний, связанных с периодическим врезанием зубьев в заготовку. Во втором случае преобладают автоколебания, амплитуда которых превосходит амплитуду вынужденных колебаний, а частоты определяются свойствами самой ТС.

Если следовать критерию устойчивости процесса фрезерования концевыми фрезами к автоколебаниям, то в случае условий на рисунке 5, г следует говорить о потере процессом фрезерования устойчивости и реализации неустойчивого режима автоколебаний. В подтверждение данного предположения и говорит тот факт, что в указанных условиях фрезерования резко возрастает амплитуда колебаний в ТС, появляется характерный высокочастотный “писк”, а на поверхности резания остаются следы вибраций. В рассмотренном примере частота этих колебаний составила 1723 Гц, что соответствует главной гармонике на спектре и подтверждает правильность разработанной методики.

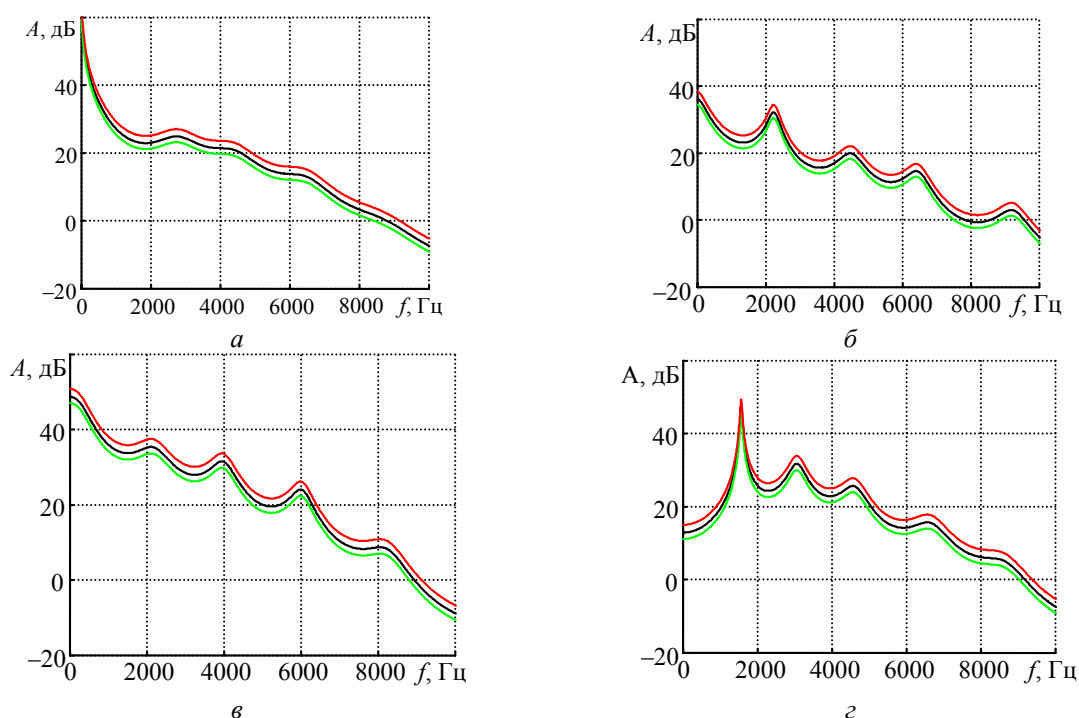


Рис. 5. Спектры сигналов АИ при выключенном шпинделе (а); работающем шпинделе при  $n=1250$  об/мин (б); резании при  $n=2000$  об/мин,  $t=15$  мм,  $b=20$  мм  $S_z=0,08$  мм,  $D_{fp}=40$  мм (в); резании при  $n=2000$  об/мин,  $t=15$  мм,  $b=40$  мм  $S_z=0,08$  мм,  $D_{fp}=40$  мм (з)

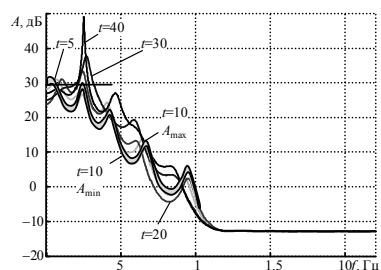


Рис. 6. Влияние глубины фрезерования на спектр АИ и устойчивость процесса

Следует отметить, что для большей статистической корректности необходимо выполнять идентификацию режима автоколебаний по верхней и нижней границам доверительного интервала спектров АИ. В связи с этим может возникнуть неопределенность в оценке устойчивости процесса фрезерования в случае, если оценки окажутся различны. В этом случае полагаем, что процесс фрезерования находится на границе устойчивости к автоколебаниям, т.е. реализуется режим автоколебаний на границе устойчивости (рис. 6). Из графика видно, что при глубине фрезерования  $t=10$  мм доверительный интервал спектра в области низких частот пересекает доверительный интервал спектра в области высоких частот.

Проведенные исследования показали, что разработанная методика обладает хорошей чувствительностью. Так, например, на рисунке 6 видно, что при увеличении глубины фрезерова-

ния возрастает амплитуда в диапазоне частот автоколебаний по сравнению с диапазоном частот вынужденных колебаний, что свидетельствует об изменении колебательного режима из устойчивого к автоколебаниям при  $t = 5$  мм до неустойчивого при  $t = 20$  мм и более (см. таблицу).

*Зависимость колебательного режима от глубины фрезерования*

Глубина фрезерования, мм	Режим автоколебаний
5	устойчивый
10	на границе устойчивости
20	неустойчивый
30	неустойчивый
40	неустойчивый

Исходя из предложенного, можно сделать следующие выводы:

— сформулированный критерий устойчивости процесса фрезерования концевыми фрезами к автоколебаниям позволяет идентифицировать режим автоколебаний с помощью бесконтактного метода по сигналу АИ;

— разработана методика приема, преобразования, регистрации и обработки АИ процесса концевой фрезерования. С целью выявления главных гармоник и исключения шумов предложено определять амплитудный спектр сигнала АИ методом MUSIC (Multiple Signal Classification);

— показана связь между спектром сигнала АИ и режимом автоколебаний. Выявлены для рассмотренного примера диапазоны частот спектра сигнала АИ вынужденных колебаний (20...130 Гц) и автоколебаний (1500...5000 Гц) ТС.

#### **Литература**

1. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування. — К.: Либідь, 1997. — 544 с.
2. Зинченко Р. Н. Повышение эффективности точения за счет диагностики изнашивания инструмента по акустическому излучению: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. — Харьков, 2005. — 149 с.
3. Schmitz T. L. Chatter recognition by a statistical evaluation of the synchronously sampled audio signal // J. of Sound and Vibration. — 2003. — Вып. 3. — Т. 262. — С. 721 — 730.
4. Чеголин П.М. Методы, алгоритмы и программы статического анализа / Чеголин П.М., Пойда В.Н.; Под ред. Н. Ломако. — Минск: Наука и техника, 1971. — 224 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учеб. для вузов. — 2-е изд. — М.: Питер, 2007. — 751 с.

Поступила в редакцию 19 марта 2008 г.