Лановой Д. А., Свинин В. М., Савилов А. В.

D. A. Lanovoy, V. M. Svinin, A. V. Savilov

ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКЕ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ ПРОГРАММНОЙ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

SELF-OSCILLATION SUPPRESSION BY THE CUTTING SPEED VARIATION METHOD WHEN END MILLING ON THE CNC MACHINE TOOL

Лановой Дмитрий Алексеевич – магистрант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: vault141@gmail.com.

Mr. Dmitriy A. Lanovoy – Master's Degree Student of the Department of Mechanical Engineering Production Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Technologies and Equipment Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: vault141@gmail.com.

Свинин Валерий Михайлович – профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: svinin_vm@mail.ru.

Mr. Valeriy M. Svinin – professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment, Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: svinin_vm@mail.ru.

Савилов Андрей Владиславович – доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиамашиностроения и транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: saw@istu.edu.

Mr. Andrey V. Savilov – associated professor of the Department of Mechanical Engineering Production Technologies and Equipment, Institute of Aircraft Construction, Mechanical Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk region, Irkutsk, 83 Lermontov str. E-mail: saw@istu.edu.

Аннотация. В данной статье рассмотрена возможность подавления автоколебаний тонкостенной детали в процессе концевой фрезеровки методом модуляции скорости резания (изменения скорости шпинделя – Spindle Speed Variation (SSV)). Дано описание метода изменения скорости шпинделя при обработке. Представлены экспериментальные данные, характеризующие возможность станка с числовым программным управлением (ЧПУ) воспроизводить модуляцию скорости резания. Приведён сравнительный анализ резания как при постоянной частоте вращения, так и при изменении скорости шпинделя.

Summary. This paper discusses the possibility of the thin-walled part vibration suppression by the Spindle Speed Variation (SSV) method when end milling. The SSV method is described when machining. Experimental data, which show the CNC machine tool opportunity to realize the cutting speed variation, are presented. The analysis of the cutting process was conducted when cutting speed is constant and variable.

Ключевые слова: автоколебания, модуляция скорости резания, фрезерование, тонкостенная деталь.

Key words: chatter, spindle speed variation, milling, thin-walled part.

УДК 621.914

Введение

В современном машиностроении находят применение высокопроизводительные современные инструменты на станках с ЧПУ, которые позволяют добиваться высоких результатов обработки любых типов материалов. Несмотря на эти достижения, одной из главных проблем при механообработке являются регенеративные автоколебания. Данный вид вибраций ведёт к ухудшению качества обрабатываемой поверхности, снижает производительность и ускоряет износ как инструмента, так и шпинделя станка. При этом сам факт внедрения прогрессивных элементов технологической системы не способствует уменьшению вибраций, а в некоторых случаях даже приводит к их росту, обусловленному более высокой частотой вращения шпинделей современных обрабатывающих центров.

Для авиационной промышленности характерно фрезерование деталей, у которых есть элементы, представляющие собой тонкие стенки и полотно. Это обусловлено ограничением веса летательного аппарата. Тонкостенные структуры существенно варьируются в зависимости от эксплуатационного характера использования. Например, сложные тонкостенные конструкции, такие как лопатки турбин, используемые в силовых (тяговых) установках, или упрощённые тонкостенные компоненты, такие как направляющий клапан, расположенный в крыле самолёта, но, вероятно, самое большое использование тонкостенных конструкций имеет место в таких авиационных деталях, как нервюры и лонжероны (основные элементы каркаса). Данные конструкции должны быть оптимизированы при обработке, так как они состоят из глубоких карманов, которые ограничены тонкими стенками [10].

Фрезерование тонкостенных частей деталей связано с различными проблемами при обработке. Одной из них является прогиб стенки при циклической односторонней обработке, что приводит к геометрическим ошибкам и ухудшению качества поверхности. Другой рассматриваемой проблемой, возникающей во время обработки, являются самовозбуждающиеся колебания инструмента, а также механические колебания обрабатываемой детали.

При концевом фрезеровании тонкостенных деталей возникают вынужденные колебания, связанные с входом и выходом зуба фрезы на обрабатываемой части заготовки, и регенеративные, возникающие со срезанием стружки по волнистому следу на поверхности резания, полученному при предыдущем проходе зуба фрезы [1].

Во многих случаях приходится ограничивать режимы резания при этом типе обработки либо применять различные способы подавления автоколебаний. На данный момент существует достаточное количество способов подавления автоколебаний, реализуемых от конструкторского метода до программного.

Основным способом борьбы с вибрациями является увеличение жёсткости закрепления инструмента и обрабатываемой детали. Однако в некоторых случаях такой способ не даёт требуемых результатов ввиду высокой собственной податливости инструмента или детали. В некоторых случаях предлагается размещать на податливой детали демпфирующие устройства, функцией которых является рассеяние колебательной энергии системы. Однако данный способ не применим в случае необходимости гашения вибраций вращающегося инструмента или детали при её односторонней обработке (так как на поверхности может не остаться достаточно места для размещения демпфирующих устройств) [3].

В современном машиностроении применяются следующие наиболее сложные способы подавления автоколебаний при обработке:

- а) изменение шага режущих зубьев инструмента;
- б) изменение углов режущих кромок;
- в) применение математического моделирования или модального анализа, построение диаграмм устойчивого резания [6];
- г) установка в конструкцию станков датчиков активного гашения вибраций со следящими системами;
- д) модуляция скорости резания как при помощи механического воздействия, так и при программном обеспечении на станке с ЧПУ.

Последний способ является одним из новых направлений подавления регенеративных колебаний в заготовке при обработке. Он представляет собой периодическое изменение частоты вращения шпинделя во времени (Spindle Speed Variation – SSV). Эффективность этого способа гашения автоколебаний была подтверждена многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных учёных [2; 4; 7; 8; 9; 11; 12; 13], а также компаниями Siemens [14] и HaaS Automation [15]. К тому же данный метод по сравнению с другими способами наиболее экономически выгоден и прост в реализации.

Для массового применения этот метод ещё недостаточно изучен, в частности, отсутствуют рекомендации по выбору рациональных значений частоты и глубины модуляций. Поэтому изучение возможностей современных станков с ЧПУ для модуляции скорости резания и исследование её эффективности по подавлению автоколебаний представляет актуальную задачу современного машиностроения.

Таким образом, целью данной статьи является подавление автоколебаний при концевом фрезеровании на станке с ЧПУ методом модуляции скорости резания, а также анализ полученных результатов и их сравнение с постоянной скоростью обработки, сопровождающейся регенеративными колебаниями.

Данный способ подавления автоколебаний реализуется с помощью программного кода на станке с ЧПУ и работает по определённому закону. Как показано в работе [7], для подавления регенеративных колебаний необходимо принудительно сбивать фазу автоколебаний относительно вибрационного следа на поверхности резания. Для этого нужно, чтобы скорость резания на одном и том же участке детали при последующих проходах значительно различалась. При этом относительная частота модуляции скорости резания за один оборот заготовки или инструмента должна быть равна половине количества зубьев инструмента. К примеру, для двухперьевого сверла относительная частота модуляции должна равняться одной модуляции за оборот, а для концевой четырёхзубой фрезы – двум модуляциям за оборот (см. рис. 1).

Рис. 1. Закон модулирования скорости резания при фрезеровании четырёхзубой фрезой при частоте модуляции (f_{mod}), равной двум

Современные станки уже имеют в системе управления ЧПУ данную функцию SSV. Для примера можно привести компанию HaaS [15]. Данные станки со встроенной модуляцией стоят намного дороже стандартных аналогов. Если же на станке встроенная функция SSV отсутствует, то её можно реализовать программно.

Исследователи из Японии [12] рассматривали концевое фрезерование с SSV как процесс, который должен компенсировать сопротивление резанию для достижения высоких частот вращения шпинделя. В данном случае они рассматривали изменение частоты вращения шпинделя по треугольному закону, модулируя и реализуя её на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ. Их исследование позволяет повысить производительность обработки с помощью разработанной си-

стемы управления. Так как сопротивление резанию пропорционально толщине стружки, ими было выяснено, что оно зависит от угловой скорости привода станка. Была предложена специальная система управления, оснащённая контроллером с обратной связью. Данный контроллер получил название Perfect Tracking Control (PTC). Метод SSV с высокой частотой вращения шпинделя рассматривался этими исследователями в виде математической модели. В дальнейшем они планируют реализовать этот метод в процессе резания. Таким образом, была подтверждена эффективность способа SSV, осуществляемого с помощью разработанной ими системы управления.

В публикации [9] рассматривается работа SSV с синусоидальным изменением частоты вращения шпинделя при торцевом фрезеровании (SSSV – Sinusoidal Spindle Speed Variation). Авторами были проведены два исследования: симуляция SSV и экспериментальная обработка. Для проведения экспериментальных испытаний, основанных на SSSV, было встроено программное обеспечение (ПО) в станок с ЧПУ. Это сделали с целью показать техническую эффективность SSSV, направленную как на низкие, так и высокие частоты вращения шпинделя. В итоге было обнаружено, что этот метод не подходит для подавления автоколебаний при высокоскоростной обработке сплавов с низкой твёрдостью и для общего торцевого фрезерования твёрдых материалов. Был сделан вывод, что данный метод будет эффективен для операций черновой обработки материалов с низкой обрабатываемостью (титан, нержавеющая сталь и т. д.) или в случаях, когда вибрации создаются менее жёстким зажимным устройством. Исследователями было отмечено, что SSV может обеспечить более значительный эффект при точении. В будущем ими планируется провести исследования по динамической устойчивости привода шпинделя и наблюдение за энергопотреблением при обработке методом SSV.

В статье [8] рассматривали SSV при синусоидальном и треугольном законах изменения частоты вращения шпинделя при высоких скоростях. Было установлено, что при одинаковых параметрах SSV синусоидальная модуляция более эффективна, чем треугольная из-за инерционных нагрузок. Было показано, что процесс фрезерования предпочтительнее стабилизировать за счёт увеличения амплитуды изменения скорости вращения шпинделя, в то время как частота изменения самой скорости не оказывает существенного влияния на динамическое поведение технологической системы. Построены диаграммы стабильного резания для прогнозирования максимально возможной скорости резания. Экспериментально проверены прогнозы модели, основанные на методологии, предложенной в данном исследовании. Опытным путём доказано, что обрабатываемость деталей, оцениваемая по шероховатости обработанной поверхности, улучшается при использовании метода SSV.

Авторы статьи [11] предложили общий метод анализа устойчивости и оптимизации параметров в процессе резания с применением SSV. Здесь с помощью рядов Фурье изменение скорости вращения шпинделя во времени при различных параметрах объединены в одну структуру. Затем временная задержка выводится неявно и рассчитывается эффективно с использованием точного алгоритма на основе обычных дифференциальных уравнений. После включения унифицированной скорости вращения шпинделя и временной задержки в динамическую модель для анализа стабильности процессов фрезерования с переменной скоростью вращения шпинделя применяется метод многоступенчатого численного интегрирования по теории Флоке. По сравнению с другими методами, такими как метод полудискретизации и метод численного интегрирования с постоянным шагом, предлагаемый метод имеет следующие преимущества: высокую вычислительную точность и эффективность. Созданы специальные трёхмерные карты многоступенчатого численного интегрирования для того, чтобы сравнить различные случаи модуляции частоты вращения шпинделя с определением уже оптимизированных параметров модуляции. В предлагаемом способе различные варианты модуляции частоты вращения шпинделя сравниваются в объединённой структуре: синусоидальная модуляция может обеспечить более высокую стабильность производительности, тогда как треугольная модуляция допускает большие параметры модуляции.

Для предсказания вибраций при фрезеровании с SSV предложено рассматривать её как изменение частоты вращения шпинделя методом коллокаций Чебышева [13]. По мнению авторов, такой подход позволяет получить более высокую точность предсказания вибраций за короткий

промежуток времени. Разработанный метод был основан на преобразовании координат из временного в угловой домен для получения набора дифференциальных уравнений задержки с её фиксацией, представляющей процесс фрезерования. Данный метод был выполнен для условий реального промышленного производства.

Помимо рассмотренных, были выполнены работы по модулированию скорости резания при концевом фрезеровании [2, 4]. Например, была разработана программа, которая модулировала скорость вращения шпинделя по синусоидальному гармоническому закону. Выводом данной публикации является то, что программа эффективно справляется с поставленной задачей подавления автоколебаний. Однако в ней отсутствуют рекомендации по использованию данного метода.

Краткий обзор рассмотренных выше работ показывает, что метод SSV завоевывает популярность как надёжное средство повышения динамической устойчивости процессов лезвийной механической обработки. Но его широкому промышленному внедрению препятствует отсутствие рекомендаций по выбору частоты и глубины модуляции скорости резания, которые могут быть полностью отработаны системой ЧПУ станка из-за инерционности шпинделя и заготовки. Кроме того, в литературных источниках отсутствуют сведения о требуемых значениях параметров модуляции для надёжного подавления возникающих в технологической системе автоколебаний в зависимости от их уровня. В этой связи представленная статья посвящена изучению возможностей реализации модуляции скорости резания системой ЧПУ станка и оценке степени гашения автоколебаний при концевом фрезеровании.

Оборудование и методы

Исследование проводили на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели DMG DMC 635V. Для измерения сил резания применяли динамометрическую платформу Kistler 9253B23. Вибрации измеряли лазерным виброметром Polytec OFV-505 и обрабатывали в модуле Sounds and Vibrations National Instruments. Профилометр Form Talysurf 200 был использован для определения качества обработанной поверхности. В качестве режущего инструмента была выбрана концевая монолитная твердосплавная четырёхзубая фреза диаметром 16 мм с углом наклона винтовой канавки 46° , передним углом 15° , задним углом 12° и длиной рабочей части 38 мм. При назначении режимов резания учитывали, что выбранный инструмент предназначен для фрезерования труднообрабатываемых материалов [6].

При проведении опытов по модулированию скорости при фрезеровании было выполнено 6 проходов фрезы по заготовке. Ширина фрезерования составила 20 мм, радиальная глубина резания – 0,5 мм. Заход фрезы при обработке в заготовку осуществляли по радиусу 2 мм.

Был проведён эксперимент по фактической отработке глубины модуляции и определению силовых нагрузок, возникающих в процессе выполнения программы при частоте вращения шпинделя 800 об/мин с различной глубиной модуляции, которую изменяли от 0 до 5 % с шагом в 1 %, и относительной частотой модуляции 0,25 мод/об; 0,5 мод/об; 1 мод/об и 2 мод/об.

Для реализации SSV на станке с ЧПУ в нашей работе было использовано ПО модулирования скорости резания для токарных станков компании Siemens [14]. На основе этого ПО была разработана специальная программа для фрезерного станка с ЧПУ. Данная программа представляет собой изменение частоты вращения шпинделя по таймеру.

Подавление вибраций на заготовке может быть достигнуто изменением постоянной скорости. Для этого программно изменяется заданное значение частоты вращения шпинделя. Таким образом, установленное значение частоты вращения шпинделя колеблется между верхней и нижней границами установленной скорости модулирования в период определённого времени.

Процесс модулирования скорости резания имеет определённые настроечные параметры: относительную частоту и глубину модуляции. Относительной частотой модуляции называется количество изменений частоты вращения шпинделя за один его оборот. Глубина, или амплитуда модуляции представляет собой величину, равную половине разницы между двумя крайними значениями частоты вращения шпинделя. Данный параметр чаще всего указывают в процентах от номинальной (средней) скорости резания.

Главным фактором при подавлении вибраций является динамика шпинделя и масса инструмента. Ввиду отсутствия методики, параметры модулирования (глубина модуляции, относительная частота модуляции) находятся экспериментально для используемого инструмента и материала.

При отработке модуляции необходимо находить её рациональные параметры. Желаемое поведение вращения шпинделя показано на рис. 2. Постоянное колебание частоты вращения шпинделя происходит по синусоидальному закону.

Рис. 2. Идеальная кривая отработки модуляции

На рис. 3 показано, как изменяется частота вращения шпинделя с очень большим временным коэффициентом. Частота вращения шпинделя кратковременно задерживается на верхнем или нижнем предельном значении, что приводит к преждевременному износу инструмента или же к снижению качества обработанной поверхности. Данный тип модуляции можно использовать, если задержка скорости в верхней и нижней частях составляет миллисекунды.

Рис. 3. Неблагоприятная отработка модуляции

Частоту модуляции, с которой проводили обработку поверхностей при фрезеровании, выбирали исходя из данных работы [7], согласно которой при фрезеровании наилучшей относительной частотой модуляции будет величина, равная двум.

Для концевое фрезерования заготовками являются тонкостенные пластины из незакалённой стали 20 с твёрдостью 110 HB и размерами 120x100x6 мм, закреплённые в тисках с вылетом 80 мм и шириной 100 мм (см. рис. 4).

Предварительно был проведён модальный анализ инструментальной наладки в шпинделе станка при помощи аппаратно-программного комплекса CutPro. Методика построения лепестковых диаграмм устойчивости технологической системы при резании подробно описана в работе [5].

На основании этой диаграммы были выбраны неблагоприятные, находящиеся на границе устойчивости, параметры режимов резания, которые сопровождаются вибрациями при обработке (см. рис. 5).

Рис. 4. Экспериментальная установка для модуляции частоты вращения шпинделя при концевом фрезеровании

Рис. 5. Диаграмма областей стабильного резания для концевой фрезеровки

По результатам модального анализа были выбраны следующие режимы резания: частота вращения шпинделя $n=816$ об/мин при подаче $f=0,05$ мм/зуб.

Результаты и обсуждение

Одной из задач исследования было определение поведения станка по отработке назначенных параметров модуляции. При проведении опытов было установлено, что модуляция скорости резания вызывает дополнительные нагрузки на шпиндель (см. рис. 6).

Рис. 6. Дополнительные нагрузки на шпинделе при модуляции

Это обусловлено динамикой шпинделя, а именно его инерционностью. Данная ситуация проявляется при увеличении частоты вращения шпинделя и относительной частоты модуляции. При этом станок в некоторых случаях пытается модулировать большую частоту вращения шпинделя, что вызывает дополнительные нагрузки и неполную отработку номинальной глубины модуляции.

По результатам эксперимента был построен график фактических отработок модуляции при частоте вращения шпинделя 800 об/мин (см. рис. 7).

Рис. 7. График фактической отработки глубины модуляции при частоте вращения шпинделя 800 об/мин при относительных частотах модуляции: 1 – 0,5 мод/об; 2 – 1 мод/об; 3 – 1,5 мод/об

На графике (см. рис. 7) изображены фактические отработки глубин модуляции на частоте вращения шпинделя 800 об/мин. Можно видеть, что при увеличении параметра относительной частоты модуляции значение фактической отработки модуляции значительно уменьшается. К тому же глубина модуляции имеет определённый предел, дальше которого модуляция при заданных параметрах не выполняется. Например, для частоты вращения шпинделя 800 об/мин и при номинальной глубине модуляции в 20 % и относительной частоте в 1 мод/об фактическая глубина составила 5 %, то есть при дальнейшем увеличении глубины модуляции фактическое значение данного параметра меняться не будет. Теоретические глубины модуляции выбраны исходя из нагрузки, возникающей на шпинделе станка. Таким образом, при частоте вращения 800 об/мин шпиндель не испытывает нагрузок выше 50 % во всём диапазоне модуляции.

Следующей частью проведения опытов является определение возможностей станка к реализации модуляции (см. рис. 8). Кривыми линиями обозначены относительные частоты модуляции согласно формуле $f = \frac{f_{\text{mod}} \cdot n}{60}$, где f_{mod} – относительные частоты, мод/об; n – частота вращения шпинделя, об/мин.

Данная диаграмма определяет величину глубины модуляции, которую станок будет обрабатывать в полной мере без искажения. Максимальную отработку модуляции выбирали исходя из меньших нагрузок на шпиндель и корректной отработки графического сервиса Servo Trace системы ЧПУ, в котором визуально отображается динамика шпинделя.

Например, при абсолютной частоте модуляции в диапазоне 0,4...1,67 Гц и частоте вращения шпинделя 1500 оборотов в минуту максимальная отработка глубины модуляции скорости резания составила 100 %, а при 2000 оборотах – 70 % и так далее.

Рис. 8. График зависимости максимальной глубины модуляции от частоты вращения шпинделя

По результатам опытов был построен график возможности привода станка обрабатывать модуляцию частоты вращения шпинделя (см. рис. 9). График показывает зависимость абсолютной частоты модуляции, выраженной в герцах, от частоты вращения шпинделя.

Рис. 9. График возможности привода станка обрабатывать модуляцию: 1 – 100 %-я обработка модуляции; 2 – 50 %-я обработка модуляции; 3 – 10 %-я обработка модуляции

Так, например, при частоте вращения шпинделя в 1500 об/мин максимальная обработка частоты модуляции составляет 1,67 Гц, а при 200 об/мин максимальная обрабатываемая частота модуляции составит 10 Гц.

Согласно рекомендациям [7] относительная частота модуляции скорости резания за один оборот фрезы должна быть равна половинному количеству зубьев инструмента. Отсюда следует, что при обработке параметров программного обеспечения, которые приведены выше, относительная частота модуляции, равная двум, при количестве зубьев концевой фрезы 4 не будет обрабатываться. Следовательно, необходимо выбирать относительную частоту модуляции за оборот, близкую к значению 2. В итоге была принята относительная частота модуляции в 1 мод/об, а для расширения данных эксперимента и подтверждения теоретических положений работы [7] – 0,5 мод/об; 0,25 мод/об.

После того как были проведены опыты при всех возможных значениях обрабатываемых параметров, было установлено, что при глубине модуляции 5 % и выше станок начинает некорректно обрабатывать заданную подачу, постепенно выходя на самоторможение. Данная ситуация отрицательно влияет как на сам станок, так и на инструмент. В итоге было поставлено условие: глубина модуляции не должна превышать 5 %.

Вторая серия опытов показала возможности гашения автоколебаний путём модуляции частоты вращения шпинделя уже при резании.

При резании без модуляции амплитуда автоколебаний составляет 3,2 мкм (см. рис. 11). На обработанной поверхности отчётливо видны следы колебаний (см. рис. 10). При 1 мод/об и дальнейшем увеличении глубины модуляции амплитуда автоколебаний уменьшается, что отражается на качестве обработанной поверхности. Минимальные виброперемещения наблюдаются при глубине модуляции в 3 %, амплитуда автоколебаний при которой составляет 0,14 мкм.

Рис. 10. Вид обработанных поверхностей при концевом фрезеровании с глубиной модуляции:
1 – $A=0$ %; 2 – $A=1$ %; 3 – $A=2$ %; 4 – $A=3$ %; 5 – $A=4$ %; 6 – $A=5$ %

При дальнейшем увеличении глубины модуляции до 5 %, как указывалось выше, наблюдается самоторможение подачи, что приводит к некорректной отработке модуляции скорости резания. Это приводит к образованию «зарезов» на обрабатываемой поверхности, увеличению виброперемещений и сил резания.

Рис. 11. График зависимости виброперемещений от глубины модуляции:
1 – 1 мод/об; 2 – 0,5 мод/об; 3 – 0,25 мод/об

Согласно графику зависимости амплитуды автоколебаний от глубины модуляции наиболее подходящей относительной частотой является 1 мод/об, так как данная частота наиболее близка к частоте 2 мод/об, которая уже не отрабатывается из-за динамики шпинделя. При относительной частоте модуляции 1 мод/об постепенно увеличивается динамическая устойчивость технологической системы, повышая при этом глубину модуляции до 4 %, что и можно заметить при построении графика зависимости, где наблюдается плавное понижение амплитуды автоколебаний. В остальных случаях наблюдаются резкие скачки измеряемого параметра, так как сам метод модулирования скорости резания имеет как положительное, так и отрицательное влияние на обработку.

Выводы

1. Обработка с модулированной скоростью резания является одним из наиболее перспективных путей уменьшения автоколебаний, повышения производительности механообработки и эксплуатационных характеристик готовых изделий.
2. Реальный фрезерный станок не может полностью отработать некоторые заданные параметры модуляции из-за инерционности шпинделя. Это иллюстрируют графики отработки параметров модуляции на исследуемых частотах вращения шпинделя.
3. Оптимальными параметрами модуляции для исследованной технологической системы являются относительная частота модуляции $f_{\text{mod}}=1$ и глубина модуляции $A=4\%$, которые позволили добиться уменьшения амплитуды колебаний заготовки на частотах автоколебаний почти в 11,5 раза.
4. Рассмотренный метод подавления автоколебаний недостаточно изучен и требует дальнейших исследований для определения рекомендуемых параметров модуляции как при работе на разных режимах резания, так и при обработке большого спектра заготовок с разными размерами и типами материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурахманов, А. У. Анализ причин возникновения автоколебаний при механической обработке резанием / А. У. Абдурахманов, Э. Ш. Джемилов // Таврический научный обозреватель. – 2016. – № 5(10) – 2016. – С. 252-257.
2. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей / Ю. Н. Внуков, В. В. Натальчишин, А. И. Гермашев, М. В. Кучугуров, С. И. Дядя // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – № 3(72) – С. 12-17.
3. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в режиме реального времени / И. И. Иванов, С. А. Воронов, С. М. Николаев, В. А. Куць // Наука и образование (МГТУ имени Н. Э. Баумана). – 2017. – № 3. – С. 1-16.
4. Особенности реализации возможностей управления приводами станков на базе стойки чпу siemens / М. В. Кучугуров, А. И. Гермашев, С. И. Дядя, А. В. Пирожок // Високітехнології в машинобудуванні. – 2015. – Випуск 1(25). – С. 80-87.
5. Савилов, А. В. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа / А. В. Савилов, А. С. Пярых, С. А. Тимофеев // Наука и технологии в промышленности. – 2013. – № 1-2. – С. 42-46.
6. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов / А. В. Савилов, Д. С. Никулин, Е. П. Николаева, А. Е. Родыгина // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 6(77). – С. 26-33.
7. Свинин, В. М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний / В. М. Свинин // Вестник Самарского ГТУ. Технические науки. – 2006. – № 41. – С. 135-142.
8. Anandkumar Telang Analysis of Spindle Speed for Maximum Chatter Doubling of High Frequency Milling Spindle / Anandkumar Telang // International Journal on Emerging Technologies. – 2015. – Vol. – 6(2). – P. 51-56.
9. Chatter avoidance method for milling process based on sinusoidal spindle speed variation method: simulation and experimental results, in: 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations / I. Bediaga, I. Egaña, J. Munoa, M. Zatarain, Ln Lopez de Lacalle. – Reggio Calabria, Italy, 2007. – P. 379-384.

10. Miroslav Piska On the Advanced Milling Technology of Thin-Walled Parts for Aerospace Industry / Miroslav Piska, Petra Ohnistova // Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2017. – P. 113-139.
11. Stability Analysis of Milling Processes With Periodic Spindle Speed Variation Via the Variable-Step Numerical Integration Method / Jinbo Niu, Ye Ding, LiMin Zhu, Han Ding // Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME. – 2016. – Vol. 138. – P. 1-11.
12. High – Frequency – Variation Speed Control of Spindle Motor for Chatter Vibration Suppression in NC Machine Tools / T. Ishibashi, H. Fujimoto, Sh. Ishii, K. Yamamoto, Yu. Terada // American Control Conference (ACC). – Portland, Oregon, USA, 2014. – № 4-6. – P. 2172-2177.
13. Efficient evaluation of process stability in milling with Spindle Speed Variation by using the Chebyshev Collocation Method / G. Totis, P. Albertelli, M. Sortino, M. Monno // Journal of Sound and Vibration 333. – 2014. – P. 646-668.
14. SINUMERIK 828D, 840D sl: Avoiding vibration in slewing gear pieces [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.industry.siemens.com>.
15. Spindle Speed Variation – Stop chatter during CNC turning [Электронный ресурс]. – Haas Automation. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=kR6KUsh-jg4>.