

решений не дают требуемой точности результатов.

Проведенные классификация существующих методов расчета прогнозируемых параметров динамических систем и численный сравнительный расчет их эффективности показали, что точность расчета амплитуд нагрузок, полученных аналитическим методом и приближенным (Рунге–Кутта) с экспериментом, выше на 12...15 % в пользу аналитического.

Из проведенного анализа результатов расчета дисперсий нагружения трансмиссии транспортной машины следует, что дисперсия нагрузочного режима при случайном воздействии дорожных неровностей на автомобиль выше, нежели при периодическом.

Результаты получены при исследовании колебаний узлов трансмиссии автомобилей МАЗ-6422 с рессорной и пневматической подвесками.

*Рецензент докт. техн. наук,
проф. ИСАЕВИЧ Л. А.*

УДК 621.9.02

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Докт. техн. наук, проф. ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э.,
канд. техн. наук, доц. КОРНИЕВИЧ М. А.*

*Зеленогурский университет (Республика Польша),
Белорусская государственная политехническая академия*

Высокая стоимость современного машиностроительного производства способствует широкому использованию автоматизированных технологий. Одним из факторов, определяющих их развитие, является автоматический контроль рабочего состояния режущих инструментов, наиболее эффективный способ которого – их мониторинг (непрерывный контроль).

Все методы контроля текущей работоспособности режущего инструмента можно условно разделить на методы прямого контроля, основанные на регистрации износа инструмента, и косвенного, использующие физические явления, которые сопровождают процессы резания и изнашивания инструмента.

Для прямого контроля могут применяться следующие разновидности устройств.

Оптические устройства. Для оценки длины стержневых режущих инструментов (сверл, метчиков) используются сравнительно простые конструкции со встроенными фотоэлементами. Если инструмент находится между источником излучения и датчиком и перекрывает зону излучения,

то это сигнализирует о его исправности. Контроль осуществляется либо после каждого рабочего хода, либо в перерывах между обработкой деталей.

Развитие оптических систем позволило создать устройства для измерения износа инструмента в тот момент, когда он не находится в контакте с заготовкой. Действие таких устройств основано на том, что площадка износа лучше, чем остальные поверхности инструмента, отражает световые лучи. Изменения в интенсивности отраженного светового излучения, попадающего через оптическую систему на светочувствительный элемент, свидетельствуют об износе инструмента [1].

Разновидностью оптических устройств являются телевизионные камеры с системами распознавания образов, с помощью которых можно оценивать как износ, так и сколы режущих кромок.

Высокими точностью измерения (до 1 мкм) и технологическими возможностями обладают лазерные устройства [2]. Они позволяют обнаружить либо поломку инструмента, либо его ис-

правность, а также измерить геометрию режущей кромки. Лазерные устройства могут использоваться для контроля как одного, так и одновременно нескольких инструментов, например в многошпиндельных сверлильных головках.

Контактные устройства обеспечивают контроль за инструментами в процессе работы с помощью датчиков касания или измерительных зондов. В момент контакта измерительного наконечника зонда с измеряемым объектом он изменяет положение, в результате разрывается электрическая цепь (возникает импульс). По мере движения зонда генерируется целая серия таких импульсов, что позволяет после обработки сигналов определить координаты точек контакта. Погрешность измерения координат при использовании в зонде пьезоэлектрических преобразователей составляет 0,5 мкм и менее [3].

Индукционные устройства. Их действие базируется на принципе взаимодействия сердечника с магнитной катушкой, они достаточно дешевы и универсальны. В простейшем случае такие устройства используются для проверки наличия инструмента на станке (есть инструмент либо его нет) и подсчета инструментов. Так, в кондукторной плите агрегатного станка могут быть установлены индукционные катушки, которые в начале рабочего хода проверяют наличие комплекта сверл (возможная поломка в ходе обработки предыдущей детали), а при выходе сверла контролируют, не осталось ли оно в детали (поломка) [4].

Пневматические устройства. В таких устройствах для контроля используются перепады давления в сети сжатого воздуха. Например, в стенках кондукторной втулки напротив друг друга располагают два канала, к которым подводится сжатый воздух [5], давление в них устанавливается регуляторами: в одном оно выше, чем в другом. Если инструмент цел, значит каналы разобщены и давление в трубопроводе, присоединенном к датчику, недостаточное для его срабатывания. При неисправном инструменте каналы сообщаются, давление в них выравнивается и срабатывает датчик давления.

Устройства, основанные на контроле времени прохождения ультразвуковых волн через твердое тело. Для контроля используется время прохождения расстояния от измеритель-

ной головки через новый и изношенный инструменты до поверхности детали и обратно [1]. При неизношенном инструменте ультразвук проходит определенное расстояние за соответствующее время. При образовании площадки износа путь и время прохождения сигнала сокращаются, что регистрируется электронной аппаратурой и позволяет определить величину износа.

Косвенные методы мониторинга режущих инструментов основаны на контроле с помощью соответствующих устройств изменений уровня сил резания, мощности, температуры и других физических характеристик процесса резания в результате износа или поломки инструмента.

Устройства контроля времени работы инструмента. Принцип действия таких устройств достаточно прост. Перед началом очередного цикла обработки система сравнивает реальное время, отработанное инструментом, с постоянной величиной, занесенной в память компьютера, и определяет, имеется ли запас стойкости для обработки еще одной детали. Если нет, то подается команда заменить инструмент на находящийся во вспомогательном магазине.

Устройства, основанные на контроле уровня сил и мощности резания. Известно, что с возрастанием износа инструмента увеличиваются уровень сил и мощности, необходимых на резание [1]. Поэтому как непосредственно силы резания, так и производные от них (мощность, крутящий момент на шпинделе, сила тока в двигателе главного движения или движения подачи) можно использовать в качестве источника диагностического сигнала.

Действие устройств контроля мощности резания основано на измерениях силы тока и напряжения в двигателе главного движения или движения подачи [6, 7]. Такие устройства весьма просты, дешевы, не требуют изменений в конструкции станка. Однако надежность их работы зависит от соотношения мощности резания и номинальной мощности двигателя. Если оно невелико, достоверность мониторинга резко снижается. Кроме того, такие устройства регистрируют изменения сил, связанные с возрастанием износа инструмента, со значительным опозданием во времени, что не позволяет вовремя отреагировать на катастрофический износ и поломки инст-

румента. Это привело к практически полному отказу от их применения.

Более эффективно работают устройства для измерения уровня сил резания. Широкое распространение получили подшипники с тензометрическими датчиками, наклеенными в канавке на их наружном кольце [8]. Прохождение шарика (ролика) под датчиком вызывает локальные деформации кольца. Датчик подключен к тензометрическому мосту и генерирует сигналы переменной частоты, зависящей от частоты вращения вала и количества шариков в обойме подшипника. Амплитуда сигналов пропорциональна действию внешних и внутренних (возникших в результате предварительного натяга) сил (рис. 1).

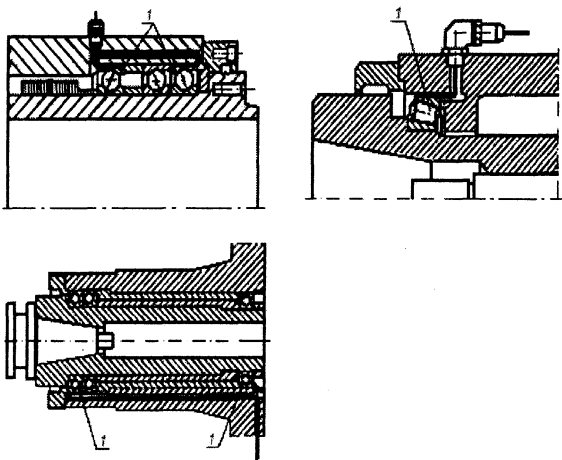


Рис. 1. Схемы установки тензометрических подшипников в шпиндельных узлах: 1 – датчики

Для измерения силы подачи можно использовать тензометрическое устройство, представляющее собой обойму для опорных подшипников. Тензометрические элементы, наклеенные на внутреннее кольцо обоймы, защищены от действия СОЖ, масла и т. д. [9]. Пружинящие кольца с наклеенными на них тензометрическими датчиками используют для измерения главной силы резания, монтируя их под основанием револьверной головки [10].

Весьма перспективно использование для контроля за силами резания пьезоэлектрических датчиков. Принцип их действия основан на известном физическом явлении, когда на поверхности некоторых диэлектриков (например, кристаллов кварца) в результате механической деформации генерируется электрический заряд.

Датчик крепится к корпусной детали, резцедержателю или другому элементу станка, в которых под действием сил резания возникают механические деформации. В месте размещения таких датчиков не должны действовать дополнительные возмущающие силы, а возникающие деформации должны непосредственно зависеть от измеряемой силы резания. Датчик крепится к деформируемой поверхности винтом и измеряет силу в месте контакта поверхности с пьезоэлектрическим элементом [11].

Наряду с одиночными пьезоэлектрическими датчиками используются также плиты (рис. 2), в которые встроено от одного до четырех датчиков (табл. 1, 2). Как правило, такие плиты устанавливаются между основанием револьверной головки и поперечным суппортом станка.

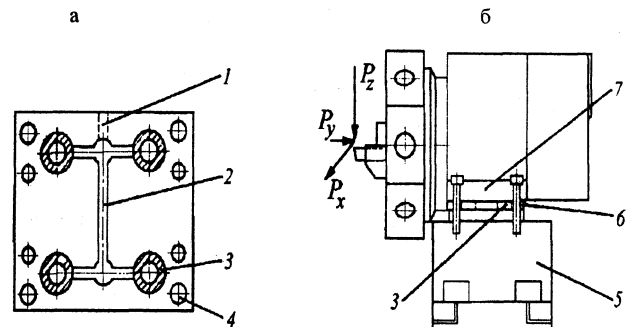


Рис. 2. Измерительная плита на основе комплекта пьезоэлектрических элементов: а – продольный разрез; б – схема установки на станке; 1 – соединительный кабель; 2 – каналы для кабеля; 3 – пьезоэлектрические элементы; 4 – отверстия под крепежные винты; 5 – поперечный суппорт; 6 – измерительная плита; 7 – основание револьверной головки

Таблица 1

Размеры пьезоэлектрических плит FS-4000 фирмы «Sandvik Coromant» для использования на токарных станках [12]

Тип датчика	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Число единичных элементов в плите
FS-4001	185	130	12	4
FS-4002	210	138	15	
FS-4003	250	150	18	
FS-4004	310	190	24	
FS-4005	390	220	30	
FS-4006	470	285	36	

Таблица 2

Размеры пьезоэлектрических плит типа FS-4100 фирмы «Sandvik Coromant» для использования на сверлильных станках [13]

Тип датчика	Площадь, см ²	Толщина, мм	Число единичных элементов в плите
FS-4101	< 200	15	1
FS-4102	< 300	15	
FS-4103	< 400	18	
FS-4104	< 600	18	
FS-4105	< 900	18	
FS-4106	< 1300	24	

Пьезоэлектрические датчики, имеющие вид колец (табл. 3), располагаются как снаружи, так и между деталями. Пьезоэлектрические датчики типа «штифт» могут использоваться для мониторинга сил резания и деформаций узлов станка путем установки снаружи и внутри контролируемых деталей. Они имеют весьма малые габариты (диаметр 9...10 мм) и достаточно высокую чувствительность (минимальное поперечное сечение стружки до 0,3 мм²).

Таблица 3

Характеристики пьезоэлектрических датчиков типа 9000 (кольцо) фирмы «Kistler» [14]

Тип	Максимальное измеряемое усилие, кН	Жесткость, кН/мкм	Размеры, мм		
			внутренний диаметр	наружный диаметр	высота
9001	7,5	1	4,1	10	6,5
9011A	15	1,8	6,5	14,5	8
9021A	35	3,5	10,5	22,5	10
9031A	60	6	13	28,5	11
9041A	90	7,5	17	34,5	12
9051A	120	9	21	40,5	13
9061A	200	14	26,5	52,5	15
9071A	400	26	40,5	75,5	17
9081A	650	30	40,5	100	22
9091A	1200	65	66	145	27

В большинстве случаев устройства для контроля сил резания и крутящих моментов сориентированы на выявление момента катастрофического износа. В зависимости от уровня электронной поддержки можно контролировать как статическую составляющую, так и совместно статическую и динамическую силы, возникающие в результате колебательных процессов в зоне резания [10].

Новейшими тенденциями в развитии устройств контроля уровня сил резания являются:

- появление так называемых «интеллектуальных» датчиков;
- передача первичных сигналов без проводов;
- использование новых методов измерения;
- создание датчиков для регистрации, наряду с силой, других характеристик процесса резания.

На рис. 3 показан пример конструкции «интеллектуального» устройства, встроенного в инструментальную оправку для крепления сверл и метчиков. Оно включает комплект тензометрических датчиков, первичный усилитель сигнала, аналого-цифровой преобразователь и микропроцессор, которые размещены в корпусе оправки. В комплект входят также радиопередатчик и приемник сигналов. Устройство может контролировать крутящий момент или осевую силу.

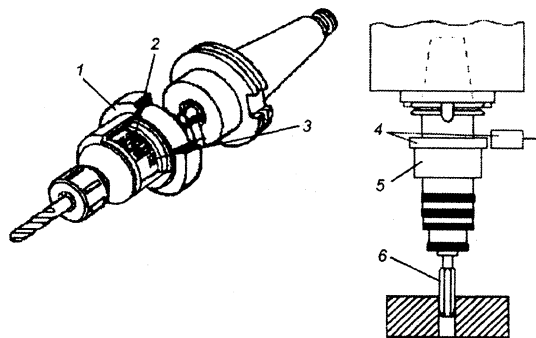


Рис. 3. Оправка с датчиками, обеспечивающая передачу сигнала без проводов [16]: 1, 4 – устройство для передачи первичных сигналов; 2 – устройство для первичной обработки сигнала с аналого-цифровым преобразователем; 3 – тензометрические датчики; 5 – оправка; 6 – режущий инструмент

Более широкие технологические возможности и надежность в эксплуатации имеют комбинированные датчики, которые позволяют контролировать, например, уровень сил резания и акустическую эмиссию [19].

Устройства, основанные на контроле уровня колебаний, возникающих в процессе резания. Известно, что в процессе резания генерируются колебания различных частот и амплитуд, которые в значительной степени зависят от состояния режущих лезвий. Колебания в диапазоне звуковых и околосвуковых частот регистрируются с помощью датчиков ускорения, как пра-

вило, пьезоэлектрических. Исследования показывают, что по мере затупления инструмента возрастает энергия (амплитуда) высокочастотных колебаний. Объектом контроля в этом случае служит соотношение между энергиями высоко- и низкочастотных колебаний, устанавливаемое путем измерения их интенсивности или звукового давления в определенном диапазоне частот. При принятии решения об использовании колебаний для контроля состояния инструмента следует учитывать, что иногда на изменения спектра звуковых и прочих видов колебаний существенное влияние оказывают непосредственно изменения режимов резания. В этом случае необходимо, во-первых, выделить составляющую амплитуды, генерируемую в результате изменения режима резания, а затем идентифицировать оставшуюся часть сигнала.

Практика свидетельствует, что более достоверную информацию обеспечивает измерение не непосредственно амплитуд колебаний, а соотношений между амплитудами в том или ином направлении действия сил по мере износа инструмента. Установлено, что такие соотношения в значительной степени зависят от выбранного для контроля направления колебаний [10].

Устройства, основанные на измерении акустической эмиссии. Под акустической эмиссией понимают процесс расхождения волн, возникающих в материале из-за освобождения его энергии упругости в ходе деформации, разрушения или структурно-фазовых превращений. К источникам возникновения акустической эмиссии в процессе резания относятся: микротрещины в обрабатываемом материале; зоны трения, пластических деформаций и разрушения; зоны ломания стружки и ее контакта с поверхностями инструмента и детали [20]. К ним следует добавить участки износа инструмента, места образования выкрашиваний и сколов, а также прочие зоны, в которых возможно выделение механической (коробки скоростей и подач, ходовые винты и т. п.) или электромагнитной (реле, контакторы и др.) энергии.

Энергия акустической эмиссии расходуется в обрабатываемом материале аналогично ультразвуковым волнам, подвергаясь отражениям и всевозможным изменениям. Поэтому для использования сигнала необходимы тщательная электронная поддержка, фильтрация и т. д.

Встречаются два основных типа сигналов:

постоянный с малой амплитудой, генерированный в результате пластических деформаций обрабатываемого материала и трения на контактных площадках;

импульсный значительной амплитуды, связанный с образованием микротрещин в инструменте, стружке и поверхностном слое детали.

Первый тип характерен для обработки материалов, дающих сливную стружку. Его амплитуда увеличивается при возрастании износа задней поверхности инструмента и скорости резания. Второй тип сигналов характерен для обработки хрупких материалов. В этом случае импульс, возникший в результате скалывания элемента стружки, накладывается на сигнал первого типа, генерируемый в ходе процессов трения и изнашивания. Для регистрации сигналов могут использоваться индукционные [20, 21], пленочные [21] и другие датчики.

Устройства, основанные на измерении температуры и термоЭДС. В качестве контролируемых параметров в таких устройствах используются:

температура сходящей стружки, которая определяется с помощью оптико-электронного устройства, сфокусированного на зону стружкообразования;

изменение электрического сопротивления цепи, в которую входит режущий инструмент;

термоЭДС, которая регистрируется с помощью естественной термопары;

смещение верхней границы скоростей наростообразования [1] (в данном случае используется явление резкого изменения полной ЭДС резания при исчезновении нароста).

Например, при контроле электрического сопротивления цепи в зоне резания на задней поверхности резца между слоями диэлектрика наносится тонкая пленка проводника, имеющая заданные параметры электрического сопротивления. При обработке детали на резце образуется площадка износа и уменьшается сопротивление пленки. Фиксируя изменения силы тока, проходящего через пленку, можно определить износ.

Устройства, основанные на измерении размерной точности детали и шероховатости обработанной поверхности. Известно, что возрастание износа инструмента связано с потерей размерной точности обработки и резким возрастанием шероховатости обработанной поверхно-

сти детали [1]. Это означает, что по реальным размерам точно обработанной поверхности и ее шероховатости можно судить о работоспособности инструмента. Контроль размеров в этом случае производится с помощью измерительных зондов, контроль шероховатости – с помощью датчиков различных принципов действия.

Устройства, основанные на контроле формы стружки, позволяют регистрировать ее изменения по мере износа инструмента, как правило, токарного резца. Контроль можно обеспечить, фиксируя инфракрасное излучение из зоны обработки. Его интенсивность будет зависеть от количества находящейся там разогретой стружки. Аналогичным образом действуют и камеры тепловизоров. Изображение с камеры делится компьютером на участки с одинаковой интенсивностью теплового излучения, что позволяет определить характер образующейся в данный момент стружки [22]. Для контроля ее формы можно использовать также контактные датчики. Они устанавливаются на передней поверхности инструмента и позволяют по мере износа резца регистрировать изменения условий стружкообразования (радиуса кривизны стружки, направления ее схода и т. д.).

Информация, полученная с помощью устройств мониторинга инструментов, поступает в компьютерную систему станка, где подвергается анализу и сравнению с существующей базой данных о возможных состояниях инструментов. Окончательная диагностика осуществляется компьютером на основе, например, метода нейронных сетей [10].

По итогам анализа подается сигнал на исполнительные механизмы станка с целью смены инструмента, коррекции режимов обработки или положения инструмента. Использование систем мониторинга режущих инструментов позволяет существенно сократить поток их отказов, повысить качество обработки, надежность и производительность работы гибкого автоматизированного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания: Физические и тепловые процессы в технологических системах. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 512 с.

2. Материалы каталогов фирмы «Blum»: Lasersystemzur WerkzeugEinstellung und Brochkontrolle, 1999.
3. Материалы каталогов фирмы «Renishaw».
4. Материалы каталогов фирмы «Euchner».
5. Режущий инструмент и инструментальное обеспечение автоматизированного производства / Е. Э. Фельдштейн, М. Л. Еременко, М. А. Корниев и др.; Под ред. Е. Э. Фельдштейна. – Мн.: Выш. шк., 1993. – 424 с.
6. Jemielniak K., Kosmol J. Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania – stan aktywny i kierunki rozwoju // Mechanik. – 1996. – № 10. – S. 429–437.
7. Honczarenko J. Elastyczna automatyzacja wytwarzania: Obrabiarki i systemy obróbkowe. – Warszawa: WNT, 2001. – 486 s.
8. Материалы каталогов фирмы «Promess»: Messsysteme für die Produktionstechnik.
9. Материалы каталогов фирмы «Sandvik Coromant»: Tool monitoring System. Feed Force Sensors.
10. Monitorowanie ostrza skrawającego. Metody konwencjonalne i sieci neuronowe / Z. Adamczyk, K. Jemielniak, J. Kosmol, A. Sokołowski; Pod red. J. Kosmola. – Warszawa: WNT, 1996. – 244 s.
11. Schneider H. P. Ausfälle und Störungen minimieren // Industrie Anzeiger Extra, NC-Technik. – 1989. – S. 11.
12. Материалы каталогов фирмы «Sandvik Coromant»: Tool monitoring System. Multi-channel Tool Monitor Unit.
13. Материалы каталогов фирмы «Sandvik Coromant»: Tool monitoring System. Single-channel Tool Monitor Unit.
14. Материалы каталогов фирмы «Kistler»: Messen mit Kristallen.
15. Материалы каталогов фирмы «Prometec»: Werkzeug- und Prozessüberwachung zur Erkennung von Werkzeugbruch, Werkzeugverschleiss, Maschinenkollisionen.
16. Материалы каталогов фирмы «Prometec»: Kraftsensoren zur Werkzeug- und Prozessüberwachung.
17. Tonshoff H. K., Brinksmeier E., Husen H. Berührungslose Messung des dynamischen Bearbeitungsmoments zur Überwachung chanken rotierender Werkzeuge // Elektrotechnik und Informationstechnik. – 1991. – V. 108. – № 6. – S. 252–257.
18. Cutting Force Sensing in Milling Process / H. Aoyama, H. Ohzeki, A. Mashine, J. Takashita // Conf. «Monitoring of Machining and Forming Processes». – 1995. – P. 319–333.
19. Tool Condition Monitoring (NCM) – The status of research and Industrial Application / G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki et. al. // CIRP Annals. – 1995. – Vol. 44. – № 2. – P. 541–568.
20. Autonomous turning operation planning with predicting tool wear and surface roughness / T. Marsumura, T. Obikawa, T. Shirakashi, E. Usui // Trans. of the ASME. – 1993. – Vol. XXI. – P. 359–366.
21. König W., Kettler G. Research of Tool Condition Monitoring in Europe – State of the Art. And Future Prospects // Proc. Third Meeting of the CIRP Working Group on TCM. – Paris. – 1994. – P. 8–29.
22. Widota A. Diagnostyka obrabiarek i procesu obróbki oraz jej zastosowanie w ASO // Mechanik. – 1988. – № 4. – S. 171–182.

Рецензент докт. техн. наук,
проф. КАНЕ М. М.