

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ****Клименко Г. П., Полонников С. А.**

В работе рассматривается задача создания системы для автоматического контроля точности обработки деталей для станков с ЧПУ. Рассматриваются основные погрешности, влияющие на точность обработки, и вызывающие их причины, методы повышения точности станков с ЧПУ. Намечаются методы и средства технологического контроля, и предлагается методика построения систем автоматического контроля процесса механообработки для улучшения его точности.

В роботі розглядається задача створення системи для автоматичного контролю точності обробки деталей для верстатів з ЧПУ. Розглядаються основні похибки, що впливають на точність обробки, і викликають їх причини, методи підвищення точності верстатів з ЧПУ. Намічаються методи і засоби технологічного контролю і пропонується методика побудови систем автоматичного контролю процесу механообробки для поліпшення його точності.

In work the problem of creation of system for automatic control of accuracy of processing of details for machines with CNC is considered. Are considered the main errors influencing accuracy of processing, and the reasons causing them, methods of increase of accuracy of machines with CNC. Methods and means of technological control are outlined and the technique of creation of systems of automatic control of process of mechanoprocessing for improvement of its accuracy is offered.

Клименко Г. П.

Полонников С. А.

д-р техн. наук, проф. ДГМА

[app@dgma.donetsk.ua](mailto:app@dgma.donetsk.ua)

студент ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 629.1

Клименко Г. П., Полонников С. А.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

При проектировании и эксплуатации металлорежущего оборудования возникает необходимость повышения их точностных характеристик. Особенно это актуально применительно к горизонтально-расточным станкам. На этих станках решаются следующие задачи: высокоточная обработка заготовок различной массы, габаритов, в том числе в крайних положениях подвижных узлов – стойки, стола, шпиндельной бабки и т. д. Однако, силовые деформации и возмущающие воздействия, испытываемые узлами станка, приводят к существенному снижению точности металлорежущего оборудования и требуют разработки специальных методов обеспечения его точности.

Известны традиционные методы повышения точности [1], сводящиеся к увеличению жесткости несущих систем станков, выбору рациональной конструкции узлов, повышению качества сборки и доводки узлов, подбору смазочных материалов и так далее. Они практически достигли определенного предельного уровня влияния на точность металлорежущего оборудования. Дальнейшие шаги в этом направлении приводят к существенному удорожанию его стоимости.

Одним из наиболее перспективных путей дальнейшего повышения точности станков является оснащение их специальными системами автоматического контроля точности [2].

Целью работы – повышение точности обработки деталей на станках с ЧПУ путем разработки систем ее автоматического контроля.

Для повышения точности работы станка с ЧПУ применяются методы, основанные на измерении погрешностей и их компенсации или стабилизации [3].

Первый метод заключается в компенсации систематической составляющей погрешностей на основе информации о погрешностях станка с ЧПУ и всей технологической системы, полученной аналитическими расчетами и экспериментальными исследованиями. Это достигается путем предсказания программы управления на этапе программирования, редактированием программы в процессе эксплуатации или вводом коррекций с пульта устройства ЧПУ (радиуса, длины и положения инструмента и др.).

Применение данного метода компенсации погрешностей станка наиболее целесообразно для точных станков с ЧПУ, когда применение традиционных методов или экономически не оправдано, или уже не может обеспечить необходимую точность станка, а также в станках с ЧПУ нормальной точности при наличии значительной систематической составляющей погрешности.

При втором методе компенсация погрешностей станка с ЧПУ осуществляется на основе информации, поступающей от систем обратной связи с ИП, измеряющих погрешности станка.

Применение обратных связей усложняет станок с ЧПУ, но позволяет компенсировать не только систематическую, но и случайную составляющую погрешностей и проводить эту компенсацию непрерывно в процессе эксплуатации.

По такому методу работают адаптивные системы управления, которые позволяют компенсировать погрешности обработки, обусловленные такими случайными факторами, как колебание припуска на заготовке и твердости обрабатываемого материала, а также затупление режущего инструмента [4].

В общем виде точность обработки на станках с ЧПУ обуславливается погрешностями (рис. 1): программирования  $\Delta_{\text{ПР}}$ , наладки  $\Delta_{\text{Н}}$ , позиционирования  $\Delta_{\text{П}}$ , автоматической смены инструмента  $\Delta_{\text{И}}$ , от упругих деформаций  $\Delta_{\text{У}}$ , от геометрических неточностей  $\Delta_{\text{Г}}$ , от быстропротекающих процессов  $\Delta_{\text{Б}}$ ; от процессов средней скорости  $\Delta_{\text{С}}$ ; от медленно протекающих процессов  $\Delta_{\text{М}}$  [3].

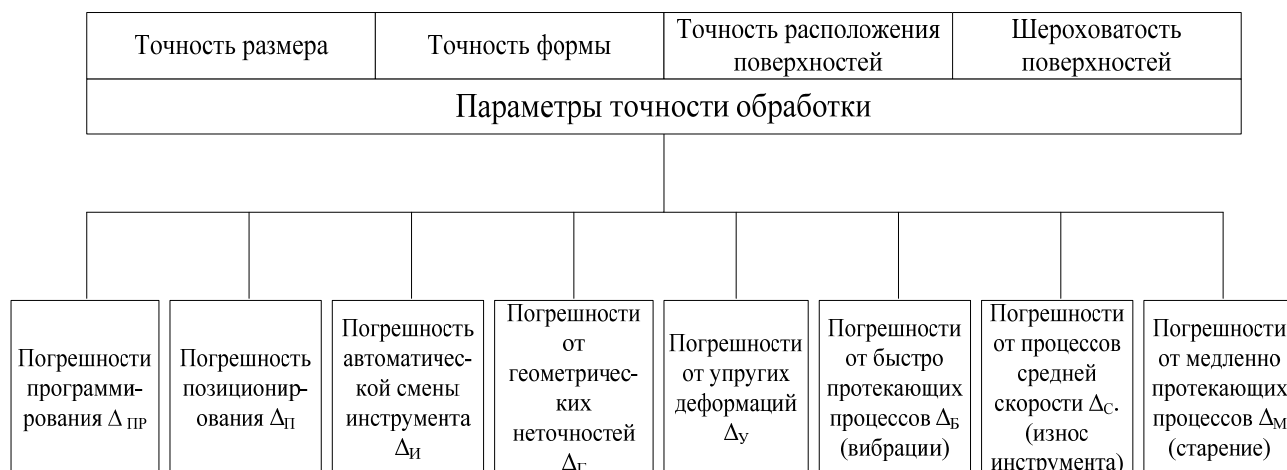


Рис. 1. Погрешности обработки на станке с ЧПУ

Диаграмма, отображающая процентное соотношение погрешностей обработки показана на рис. 2.

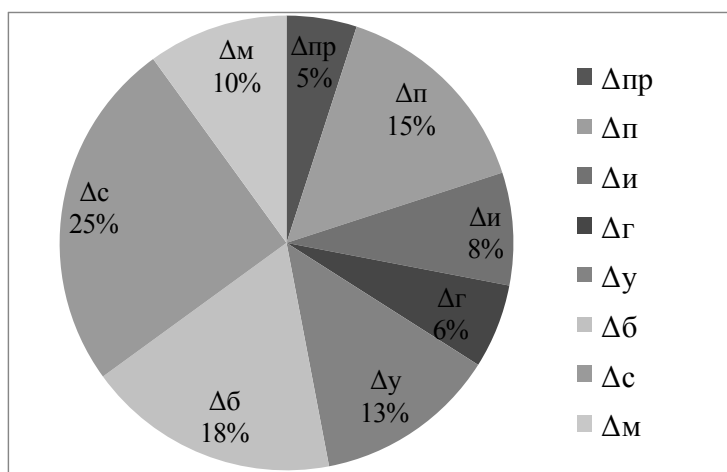


Рис. 2. Процентное соотношение погрешностей обработки

Из диаграммы видно, что на процесс обработки наибольшее влияние оказывают погрешности от процессов средней скорости, т. е. от износа инструмента.

Разработана математическая модель процесса резания и изнашивания инструментов, учитывающая силы резания, контактные нагрузки и интенсивность изнашивания инструментов.

Силы стружкообразования на прямолинейной и радиусной части режущей кромки:

$$R_{ci} = \frac{\tau_p \cdot a_i \cdot b_i}{\sin \beta_i \cdot \cos(\beta_i + \omega_i)}; \tag{1}$$

Раскладывая силы стружкообразования по соответствующим направлениям и суммируя, определяются суммарные составляющие силы резания, действующие вдоль осей координат.

Средние значения нормальной и касательной контактных нагрузок на задней поверхности лезвия (рис. 3):

$$q_z = \frac{\sigma_m \cdot AN + \sigma_m \cdot h_z \cdot (n+1)}{l_2}; \quad \tau_z = q_z \cdot f_{tr}, \tag{2}$$

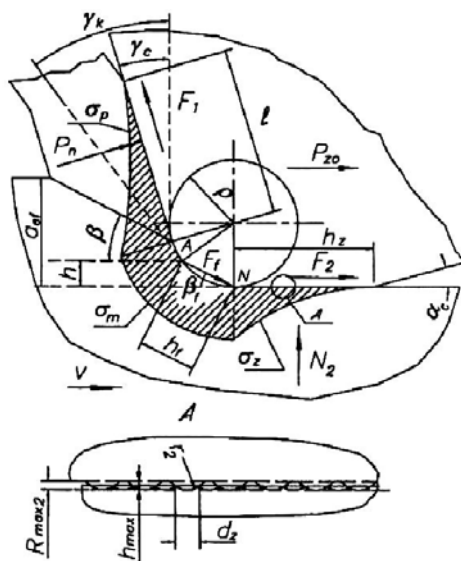


Рис. 3. Силы, контактные нагрузки и схема фрикционного контакта по задней поверхности инструмента

Интенсивность изнашивания инструментов (в направлении нормали к поверхности контакта):

$$I_{n0} = \frac{ab_2 \varepsilon^{v_2+1} R_{\max 2} n_{ca}}{(v_2 + 1) d_2 n_2}, \quad (3)$$

Рассмотрим способы определения технического состояния инструмента.

Существует много способов контроля состояния инструмента. Их можно классифицировать как: прямые (когда измеряется непосредственно кромка режущего инструмента) и косвенные (когда измеряется параметр процесса резания, который коррелирует с состоянием режущей кромки инструмента).

Прямое измерение износа и состояния режущей кромки инструмента может проводиться различными контактными (специальными измерительными щупами, весовой износ, объемный износ) и бесконтактными способами (например, с помощью оптических приборов).

К прямым методам контроля относятся: радиоактивный метод, оптический метод, пневматический метод, электромеханический метод, ультразвуковой метод.

Основным недостатком прямых методов является необходимость остановки процесса резания и сложность прогнозирования дальнейшего состояния инструмента.

Косвенные методы позволяют оценить состояние инструмента непосредственно в процессе обработки по параметрам процесса резания.

Наиболее удобными методами есть способы измерения технического состояния инструмента по вибрации ТОС и виброакустическому сигналу зоны резания. Эти способы относительно просты и не требуют сложного переоборудования ТОС, в отличие от способов измерения сил резания, температур в зоне резания и др. Они имеют хорошую информативность, помехоустойчивость и безразличны к материалу обрабатываемой детали и инструмента.

Работы по изучению зависимости виброакустического сигнала зоны резания от параметров процесса резания, проведенные ранее исследования, показывают тесную связь между износом инструмента, силами резания, вибрацией и виброакустической эмиссией зоны резания [5].

Техническая диагностика и вибродиагностика в частности основывается на корреляции между структурными параметрами и их диагностическими признаками. Структурный параметр характеризует состояние объекта диагностирования. В качестве структурного параметра для режущего инструмента можно рассматривать площадь пятна контакта задней поверхности лезвия инструмента с поверхностью резания на заготовке (рис.4, б).

А в качестве диагностического признака, реагирующего на изменение площади контактного пятна, можно использовать традиционный для вибродиагностики параметр – уровень звука в Паскалях (МПа) Азв, генерируемого и регистрируемого в процессе механобработки.

Для осуществления процедуры диагностирования необходимо получить выражение для безразмерного параметра (индикатора состояния инструмента), отслеживая величину которого можно косвенным образом оценивать степень износа инструмента (степень затупления) и определять необходимую коррекцию. Для того чтобы получить выражение для индикатора, воспользуемся балансом мощностей, имеющим место при резании.

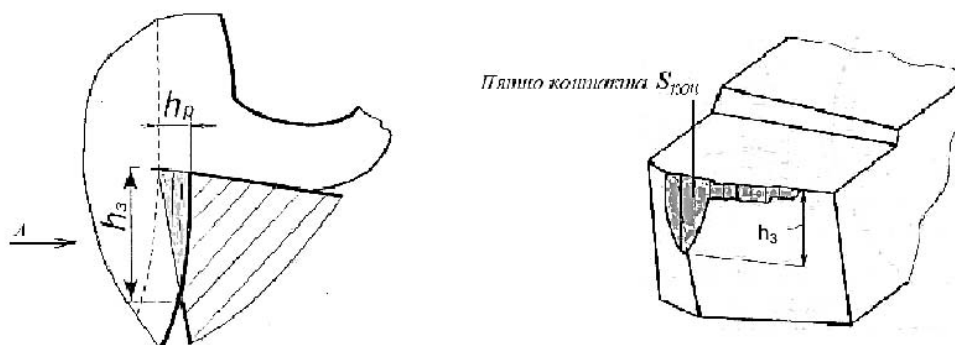


Рис. 4. Схема взаимодействия обрабатываемой заготовки с лезвием инструмента и его износ: а – схема износа резца в радиальном направлении и по задней поверхности; б – пятно контакта (износа) инструмента

На генерацию звука тратится мощность  $W_{ЗВ}$ , составляющая определённую часть мощности станка  $W_{СТ}$ , при этом, естественно, основная часть его мощности расходуется на процесс обработки материала  $W_{ОБР}$ . Строго говоря, на собственно процесс обработки, тратится только часть мощности  $W_{ОБР}$ , которую можно назвать полезной частью мощности ( $W_{РЕЗ}$ ) и которая определяется, как и у любой другой машины, величиной коэффициента её полезного действия  $\eta$ .

В данном случае для станка

$$W_{РЕЗ} = \eta \cdot W_{ОБР}. \quad (4)$$

При этом наблюдается следующий баланс мощностей:

$$W_{СТ} = W_{ОБР} + W_{ЗВ}, \quad (5)$$

Выражение (2) с учётом (1) можно переписать следующим образом:

$$W_{СТ} = \frac{W_{РЕЗ}}{\eta} + W_{ЗВ}. \quad (6)$$

Мощность, расходуемую на резание, можно определить из следующего выражения

$$W_{РЕЗ} = P_z V \quad (7)$$

где  $P_z$  и  $V$ , м/с – соответственно касательная составляющая силы резания и скорость резания.

Для гармонического акустического излучения средняя удельная мощность звука равна [6]:

$$W_{ЗВ} = 0,5 \cdot P_{ЗВ} \cdot V_{ЗВ}, \quad (8)$$

где  $P_{ЗВ}$  и  $V_{ЗВ}$  – амплитуды давления и колебательной скорости звуковой волны, создаваемой колеблющейся (излучающей) поверхностью инструмента.

Так как скорость звука в воздухе – величина постоянная ( $V_{зв} = 331$  м/с), то мощность, расходуемая на генерацию звука, как следует из (8), изменяется прямо пропорционально изменению амплитуды звукового давления  $P_{зв}$ . То же самое при условии постоянства скорости резания согласно (7), можно сказать и о мощности, затрачиваемой на обработку заготовки. Интенсивность (амплитуда) звуковой волны  $A_{зв}$  так же прямо пропорциональна амплитуде звукового давления [6], т. е.

$$A_{зв} : P_{зв} \quad (9)$$

Сила резания зависит от величины разрушающего напряжения  $\sigma_{раз}$  ( $\sigma_{раз} = \sigma_{в}$ ) и от площади пятна контакта лезвия с заготовкой  $S_{кон}$  (рис. 1, б).

$$P_{рез} = \sigma_{раз} \cdot S_{кон} \quad (10)$$

С учетом выражений (7), (8) и (10) соотношение (6) преобразуется к следующему виду:

$$W_{ст} = \frac{\sigma_{раз} \cdot S_{кон} \cdot V}{\eta} + 0,5 \cdot P_{зв} \cdot V_{зв} \quad (11)$$

Разрешим выражение (8) относительно звукового давления

$$P_{зв} = \frac{2}{V_{зв}} \cdot W_{ст} - \frac{2 \cdot \sigma_{раз} \cdot S_{кон} \cdot V}{\eta \cdot V_{зв}} \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что величина звукового давления, а согласно (9) и величина звукового сигнала  $A_{зв}$  для заданных условий обработки линейно зависят от площади контактного пятна  $S_{кон}$ . Причём по мере роста площади пятна контакта уровень звукового давления падает, т. к. уменьшаемое (первый член разности) в (12) – постоянная величина  $\left( \frac{2}{V_{зв}} \cdot W_{ст} = const \right)$ . Задачей является получение индикатора состояния инструмента в безраз-

мерном виде, изменяющемся от нуля до единицы, поэтому размерные параметры  $W_{ст}$ ,  $V_{зв}$ ,  $\sigma_{раз}$ ,  $V$ ,  $\eta$  следует исключить. С этой целью вначале определим разности между исходным значением звукового давления  $P_{зв}^{ИСХ}$ , измеренным в начале процесса обработки, и его величинами, зарегистрированными в определенные два момента контроля состояния инструмента: 1) в любой текущий момент времени  $P_{зв}^{ТЕК}$ ; 2) в момент, предшествующий снятию изношенного инструмента  $P_{зв}^{ИЗН}$  (к моменту исчерпания его стойкости). Аналогичную процедуру выполним и для пятна контакта, определив  $S_{кон}^{ИСХ}$ ,  $S_{кон}^{ТЕК}$  и  $S_{кон}^{ИЗН}$ . На следующем этапе определим отношение этих разностей.

Тогда разности давлений:

$$P_{зв}^{ИСХ} - P_{зв}^{ИЗН} = \left( S_{кон}^{ИЗН} - S_{кон}^{ИСХ} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{раз} \cdot V}{\eta \cdot V_{зв}}, \quad (13)$$

$$P_{зв}^{ИСХ} - P_{зв}^{ТЕК} = \left( S_{кон}^{ТЕК} - S_{кон}^{ИСХ} \right) \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{раз} \cdot V}{\eta \cdot V_{зв}}, \quad (14)$$

Отношение разностей

$$\frac{P_{зв}^{ИСХ} - P_{зв}^{ТЕК}}{P_{зв}^{ИСХ} - P_{зв}^{ИЗН}} = \frac{S_{кон}^{ТЕК} - S_{кон}^{ИСХ}}{S_{кон}^{ИЗН} - S_{кон}^{ИСХ}} \quad (15)$$

С учётом (9) выражение (15) запишется в следующем виде

$$\frac{A_{зв}^{ИСХ} - A_{зв}^{ТЕК}}{A_{зв}^{ИСХ} - A_{зв}^{ИЗН}} = \frac{S_{кон}^{ТЕК} - S_{кон}^{ИСХ}}{S_{кон}^{ИЗН} - S_{кон}^{ИСХ}} \quad (16)$$

Выражение, стоящее в правой части равенства (16), изменяется от нуля до единицы и характеризует степень затупления инструмента в процессе его эксплуатации. Соответственно выражение, расположенное в левой части, является диагностическим признаком

процесса деградации режущих свойств инструмента. Поменяв эти части равенства местами и обозначив правую часть через  $\Delta S_{ОТН}$ , получим формулу, связывающую структурный параметр инструмента  $\Delta S_{ОТН}$  с его диагностическим признаком:

$$\Delta S_{ОТН} = \frac{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ТЕК}}{A_{3B}^{ИСХ} - A_{3B}^{ИЗН}}. \quad (17)$$

Для аппроксимации характера изменения уровня звука по мере износа инструмента использовалась функция (18), т. к. её график описывает общеизвестную кривую износа режущего инструмента [7].

$$A_{3B} = A_{3B}^{ИСХ} + \alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ} \left( \frac{t - t_{ИСХ}}{T_{СМЕН} - t} \right)^{\beta}, \quad (18)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – соответственно коэффициент и показатель степени, определяемые в процессе аппроксимации результатов контроля уровня звука, генерируемого процессом резания;  $T_{СМЕН}$ , мин – длительность процесса резания до замены изношенного инструмента;  $t_{ИСХ}$ ,  $t$ , мин – наработка инструмента соответственно на исходный и текущий моменты времени.

Функция (18) описывает общеизвестную кривую износа режущего инструмента [7].

Произведение  $\alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ}$  характеризует разность между текущим и минимальным уровнями звука по отношению к исходному:

$$\alpha \cdot A_{3B}^{ИСХ} = A_{3B}^{ТЕК} - A_{3B}^{МІН}. \quad (19)$$

С учётом (18) и (19) выражение (17) примет следующий вид:

$$\Delta S_{ОТН} = \frac{(t - t_{ИСХ})^{\beta}}{(t - t_{ИСХ})^{\beta} + (T_{СМЕН} - t_{ИСХ})^{\beta}}, \quad (20)$$

где  $\Delta S_{ОТН} = \frac{S_{КОН}^{ТЕК} - S_{КОН}^{ИСХ}}{S_{КОН}^{ИЗН} - S_{КОН}^{ИСХ}}$ .

Соотношение (20) представляет собой выражение для индикатора износа инструмента  $\Delta S_{ОТН}$ . Он согласно (20) изменяется от нуля (при  $t = t_{ИСХ}$ ) до единицы (при  $t = T_{СМЕН}$ ) и позволяет определять степень изменения площади контактного пятна инструмента и тем самым косвенно оценить степень его износа.

Исходя из вышесказанного, очевидно, что необходимо создание системы, не только определения аварийного состояния инструмента, но и определяющей его износ, что даст возможность корректировать размерную настройку инструмента для обеспечения необходимой точности обработки.

Практическая реализация такой системы при современном развитии техники не представляет больших трудностей и, в основном, касается создания алгоритма, методики и программного обеспечения для обработки получаемого сигнала в реальном времени.

Для аппаратного обеспечения системы диагностики необходимо дополнить систему ЧПУ следующими устройствами (на рис. 5 показаны штриховой линией): вибрационным или виброакустическим датчиком – для измерения диагностируемого параметра, предварительным усилителем и фильтром сигнала – для выделения информативной составляющей вибросигнала, аналогово-цифровым преобразователем – для преобразования аналогового сигнала в цифровой для дальнейшей его обработки и анализа.

Для построения такой системы диагностики, в первую очередь, необходимо создание методики, алгоритма и программного обеспечения. Также необходимо создание подпрограммы для системы ЧПУ, которая бы производила анализ состояния инструмента и коррекцию размерной настройки инструмента автоматически в зависимости от его износа.

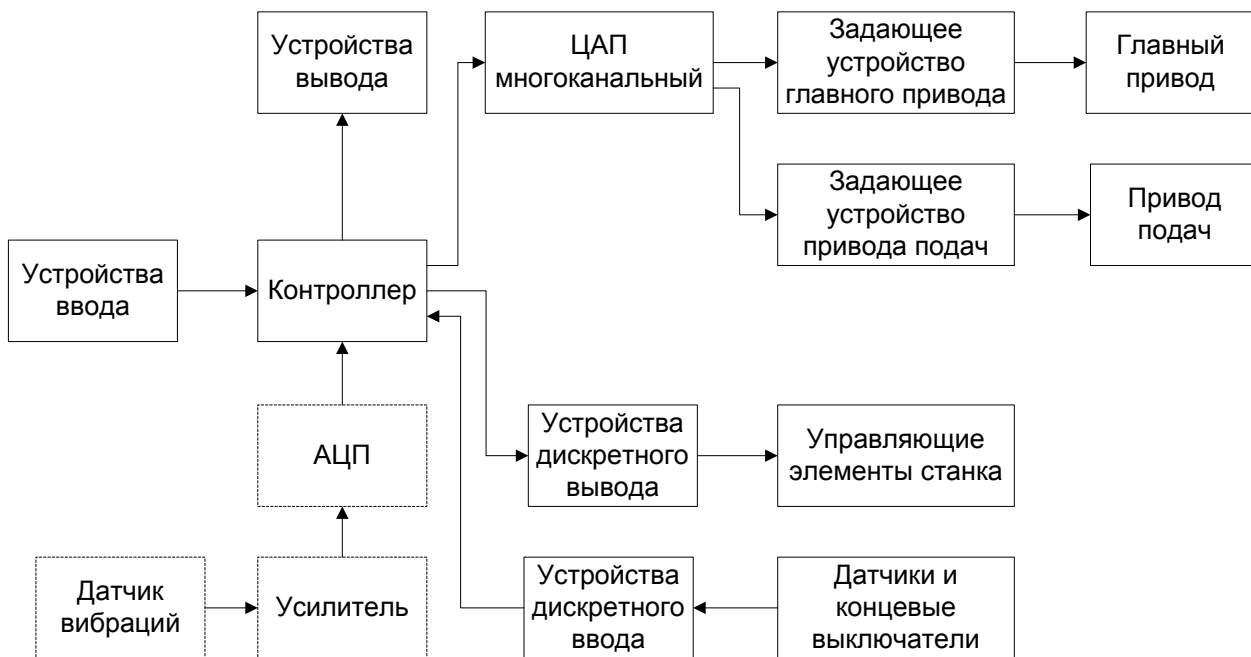


Рис. 5. Блок-схема устройства ЧПУ типа CNC с элементами системы диагностики режущего инструмента

Такая система и подпрограмма может работать следующим образом. При запуске в обработку партии из  $n$  деталей включается подпрограмма (рис.6).

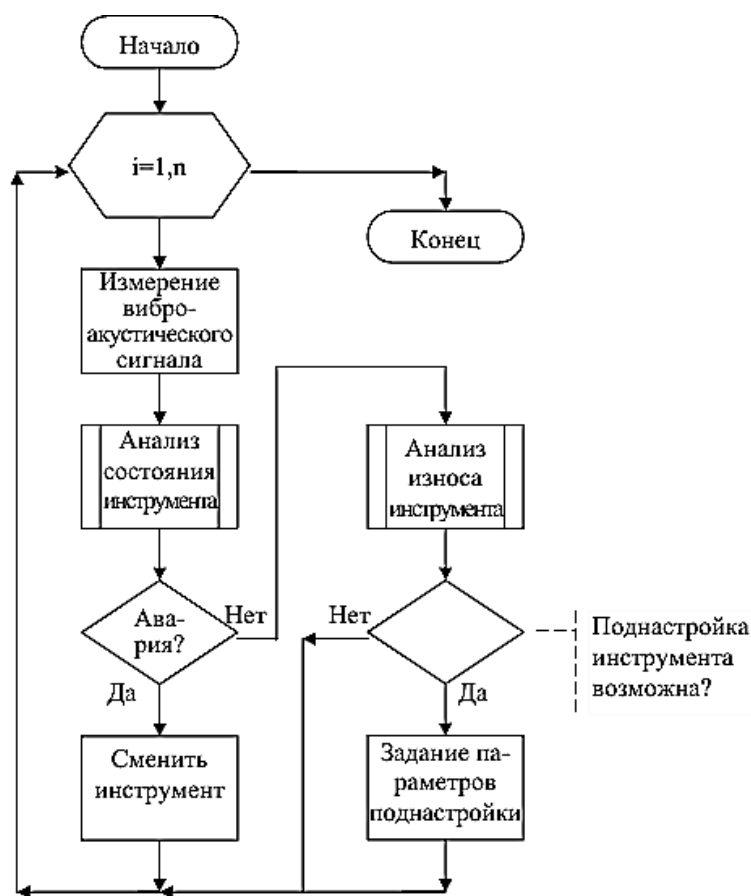


Рис. 6. Алгоритм подпрограммы автоматического диагностирования состояния режущего инструмента



В процессе резания происходит измерение виброакустической эмиссии и по ней производится анализ состояния инструмента и, в случае его поломки, формируется команда для его смены и передается в систему ЧПУ. После окончания обработки анализируется износ режущей кромки инструмента и, если это возможно (т.е. он достиг величины, на которую поднастройка инструмента ещё возможна), происходит формирование команды для коррекции размерной настройки инструмента для обработки следующей детали.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, основная задача при разработке систем автоматического контроля точности обработки деталей состоит в создании методики оценки состояния инструмента при обработке, выделении информативного участка вибросигнала, корректировке режимов резания и/или замене инструмента в случае необходимости путем разработки программного обеспечения. Создание таких систем позволит значительно повысить качество обрабатываемых деталей, надежность и производительность процесса механообработки.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дальский А. М. *Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин* / А. М. Дальский – М. : Машиностроение, 1975. – 224 с.
2. Базров Б. М. *Методы повышения точности обработки деталей типа тел вращения посредством адаптивного управления*. / Б. М. Базаров – Станки и инструмент, 1973.
3. Проникова А. С. *Точность и надежность станков с числовым программным управлением.* / под ред. А. С. Проникова. – М. : Машиностроение, 1982. – 256 с.
4. Базров Б. М. *Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков.* / Б. М. Базаров – М. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
5. *Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов* / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков – М. : Наука, 1984. – 120 с..
6. *Акустика: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп.* / А. П. Ефимов, А. В. Никонов, М. А. Сапожков, В. И. Шоров; под ред. М. А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1989. – 336 с.
7. *Основи теорії різання матеріалів: шідручник* / М. П. Мазур, М. Внуков, В. Л. Доброскоков, В. О. Залоза, Ю. К. Новосолов, Ф. Я. Якубов. – Львів : Новий Свгг-2000, 2010. – 422 с.