

Методы обнаружения дефектов в контуре позиционного управления станков с ЧПУ

д.т.н. Г. В. Шадский, д.т.н. В. С. Сальников, к.т.н. А. Н. Казимиров

Один из прогрессивных способов повышения эксплуатационной надежности станков заключается в диагностировании фактического состояния их элементов и организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР). При эффективном диагностировании технического состояния станков и их узлов и своевременном принятии профилактических мер затраты на ТОиР могут быть уменьшены на 20–25 %, что в рамках предприятия создает ощутимую экономию.

Одним из важнейших узлов, определяющих основные технические характеристики и технологические возможности станков, являются приводы подачи, входящие в состав контуров управления формообразующим движением (КУФД) станков с ЧПУ (рис. 1).

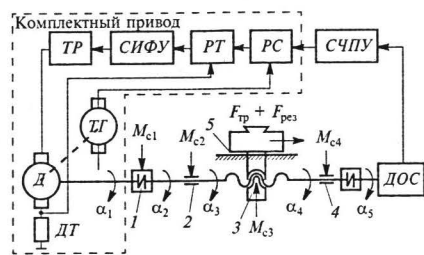


Рис. 1. Обобщенная диагностическая схема КУФД с учетом возмущений, вносимых дефектами элементов

Для целей диагностики в механическую часть КУФД необходимо включить те элементы, в которых в период эксплуатации возможно зарождение и развитие дефектов. Последние нарушают регламентные условия функционирования и приводят к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей.

К таким элементам в общем случае можно отнести: муфту 1, первую 2 и вторую 4 опоры, шариковую винтовую пару (ШВП) 3, а также направляющие с суппортом 5 и резцедержателем. Дефекты, возникающие в этих элементах, приводят к

появлению возмущающих воздействий, выражающихся в увеличении соответствующих моментов сопротивления M_{c1} , M_{c2} , M_{c3} , M_{c4} и силы трения $F_{тр}$ в направляющих.

В составе КУФД можно выделить два контура: внутренний — контур стабилизации скорости подачи суппорта и внешний — контур позиционного управления, обеспечивающий слежение за положением суппорта.

Внутренний контур реализован на основе комплектного электропривода и суппорта. Нагрузкой для привода являются соответствующие составляющие силы $F_{рез}$ резания и силы трения в подвижных соединениях. Основные элементы типового комплектного электропривода подачи [1–3]: регулятор скорости РС, регулятор тока РТ, система импульсно-фазового управления СИФУ, тиристорный регулятор ТР, электродвигатель Д, тахогенератор ТГ и датчик тока ДТ.

Во внешний контур входят: система числового программного управления (СЧПУ); комплектный привод; механизм передачи движения от вала двигателя к суппорту (муфты, опоры, ШВП и т. д.); суппорт; датчик обратной связи по положению суппорта (ДОС). Наиболее часто в качестве ДОС используют датчики вращательного типа, установленные на ходовых винтах (ХВ) [4].

К возмущающим воздействиям относится также процесс резания, влияющий на КУФД через изменение силы $F_{рез}$ резания [5].

С точки зрения влияния на функционирование кинематических связей, дефекты в подвижных соединениях (например, подшипниках) проявляются в изменении натягов или возникновении зазоров, а следовательно, в изменении сил трения.

Анализ спектральных характеристик возмущений, создаваемых дефектами подшипников в опорах и ШВП в наиболее информативном диапазоне частот, показал, что в целях упрощения математических выкладок спектральную плотность возму-

щений $S_{M_c}(\omega)$ с достаточной степенью точности можно представить в виде суммы однотипных элементарных спектров [6 и 7]:

$$S_{M_c}(\omega) = \sum_{k=1}^K \frac{(b_k \omega_{ш}/2)^2 a_k^2}{(b_k \omega_{ш}/2)^2 + (\omega - 2k \omega_{ш})^2},$$

где a_k и b_k — коэффициенты влияния дефекта на параметры k -й гармоники; K — число учитываемых гармоник; ω — частоты составляющих в спектре момента сопротивления, возникающих вследствие возмущений, обусловленных дефектами шариков; $\omega_{ш}$ — угловая скорость шариков, соответствующая заданной частоте вращения ХВ.

Параметры гармоник являются функциями размеров дефектов шариков, числа шариков, максимальной площади дефектов дорожек и сепаратора.

В рамках предложенного подхода к рассмотрению спектров возмущений примем следующие допущения.

1. Дефекты в кинематических связях сосредоточенные; они проявляются только при движении механической системы и обладают детерминированными параметрами, т. е. не изменяются в процессе движения системы.

2. Флуктуациями характера проявления дефектов при нарушении стационарности движения в трибосопряжениях можно пренебречь.

3. Любой дефект в кинематических связях проявляется в виде изменения нагрузки на выходе соответствующего звена.

4. Изменение параметров механической системы при изменении положения суппорта пренебрежимо мало.

5. На характер формообразующего движения суппорта влияют только те составляющие силы резания, которые определяют трение в направляющих суппорта и непосредственно препятствуют его движению (например, для привода продольной подачи — это тангенциальная и осевая составляющие).

6. Влияние возмущающих относительных колебаний реза на характер движения суппорта относительно мало [2 и 3].

Любой элемент механической системы с дефектом кинематической связи может быть описан уравнением в операторной форме [1, 7 и 8]:

$$\alpha_{i+1}(p) = W_{ai}(p)\alpha_i(p) - W_{Mi}(p)M_{ci}, \quad (1)$$

где α_i — угол поворота входного звена i -го элемента механической системы (см. $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ на рис. 1); $W_{ai}(p)$ и $W_{Mi}(p)$ — передаточные функции i -го элемента механической системы по входному и возмущающему воздействиям соответственно; M_{ci} — возмущающее воздействие или момент сопротивления на i -м элементе механической системы (см. $M_{c1}, \dots, M_{c4}$ на рис. 1).

В общем случае передаточные функции, входящие в выражение (1), можно представить как аperiodические звенья первого порядка, учитывающие упругие свойства и демпфирующие возможности трибосопряжений и кинематических связей [8–11].

Влияние дефекта на изменение нагрузки в кинематических связях представляет собой функцию времени t , параметров дефектов и частоты вращения задающего звена механической системы (например, для опор и ШВП таким звеном является ХВ): $M_{ci} = \Phi(\omega_{ХВ}, q_{1i}, \dots, q_{mi}, t)$, где $\omega_{ХВ}$ — угловая скорость ХВ; $q_{1i}, \dots, q_{mi}$ — геометрические параметры дефекта i -го элемента механической системы.

Очевидно, что чем больше объем информации о состоянии системы, тем более достоверно можно судить о ее работоспособности. В отличие от известных решений [10 и 11] в качестве сигналов, подвергаемых анализу при диагностировании, предложено использовать не только выходную координату — угол α_5 поворота ХВ, но и внутренние координаты состояния системы (фазовые координаты), в частности, частоту вращения ротора двигателя и потребляемый им ток. Эти сигналы дают информацию о частоте вращения задающего звена механической системы и о нагрузке, действующей в ней.

Представляется также перспективным использовать информацию о первой и второй производных по времени от угла поворота ХВ (тем более что она формируется в современных СЧПУ), и об угле поворота ротора двигателя. Сопоставление этих видов информации расширяет возможности диагностирования дефектов.

Анализ схемы КУФД (см. рис. 1) позволил получить его передаточные функции по соответствующим выходам и входам: $W_{aif}(p)$ — по углу α_5 поворота ХВ; $W_{if}(p)$ — по току I двигателя; $W_{aif}(p)$ — по частоте ω_d вращения ротора двигателя привода подачи; здесь f — возмущения, а именно, $M_{c1}(t)$ —

на муфте; $M_{c2}(t)$ — на первой опоре; $M_{c3}(t)$ — на ШВП; $M_{c4}(t)$ — на второй опоре; $F_{TP}(t)$ — в направляющих суппорта.

Указанные передаточные функции описываются громоздкими математическими выражениями, которые представляют значительные трудности для аналитических исследований. Поэтому здесь они не приведены, но с их помощью был выполнен численный эксперимент.

Динамические процессы, протекающие в КУФД при возникновении дефектов, можно считать случайными стационарными, поскольку в большинстве случаев их статистические характеристики остаются неизменными в течение достаточно большого промежутка времени, т. е. являются установившимися. Эти процессы можно считать также периодическими, поскольку частота их изменения определяется частотой вращения выходного вала привода подачи. Для таких процессов среднее значение квадрата случайной контролируемой величины $x(t)$ является характеристикой средней интенсивности процесса и носит название мощности сигнала $x(t)$ [9 и 12].

Исследуемые процессы проявления дефектов элементов КУФД можно отнести к классу эргодических процессов [7 и 12], поскольку практически бесконечную кривую одной реализации сигнала можно разрезать на сколь угодно большое число достаточно длинных фрагментов. Поскольку рассматриваемые процессы стационарные, то, вероятно, свойства этих фрагментов одинаковы, и их можно рассматривать как множество реализаций одного и того же случайного процесса.

Для таких процессов среднее по множеству значение контролируемой величины, характеризующей процесс, с вероятностью, равной единице, равно среднему ее значению по времени. В соответствии с преобразованием Фурье следует [12]

$$\overline{x^2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_x(\omega) d\omega, \quad (2)$$

где T — период наблюдения контролируемой величины $x(t)$; $S_x(\omega)$ — спектральная плотность величины $x(t)$; ω — частоты составляющих спектра величины $x(t)$.

Как видно из выражения (2), мощность сигнала, являющаяся мерой его интенсивности, пред-

ставляет собой интеграл от его спектральной плотности, которая, в свою очередь, описывает распределение мощности сигнала по частотному спектру.

Спектральная плотность сигналов представляет большой практический интерес при исследовании случайных процессов. Она позволяет определять характер изменения случайного сигнала при прохождении им линейной части системы управления, например при фильтрации сигналов, поступающих от датчиков.

Из выражения (2) следует, что если сигнал представляет собой сумму синусоидальных сигналов с амплитудой $A_x(\omega)$, то их средние мощности пропорциональны математическим ожиданиям квадратов амплитуд и, следовательно, также пропорциональны спектральной плотности суммарного сигнала [12].

Поскольку квадраты амплитуд A_y и A_x сигналов соответственно на выходе и входе линейной системы связаны через комплексный коэффициент передачи системы $W(j\omega)$ (где $j = \sqrt{-1}$), определяемый ее передаточной функцией $W(p)$, т. е. $A_y^2 = A_x^2 |W(j\omega)|^2$, то можно записать выражение для спектральной плотности выходного сигнала:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (3)$$

где $S_y(\omega)$ и $S_x(\omega)$ — спектральные плотности сигналов соответственно на выходе и входе системы.

Из формулы (3) следует, что фазовая частотная характеристика системы не оказывает влияния на спектральную плотность выходного сигнала, но влияет на его фазу.

При обработке сигнала датчика обычно допускается воспроизводить измеряемые параметры с некоторым заранее известным постоянным запаздыванием τ , но по возможности с сохранением широкого спектра составляющих. Поэтому если входной сигнал обозначим $X(t)$, а на выходе устройства воспроизводится сигнал $Y(t) = X(t - \tau)$, то при малых значениях τ такое воспроизведение можно назвать идеальным.

В любой реальной системе из-за наличия искажений и помех выходной сигнал $Y(t)$ отличается от идеального. Таким образом, в системе всегда существует погрешность $e(t)$ воспроизведения входного сигнала [12]: $e(t) = X(t - \tau) - Y(t)$.

Будем полагать, что сигнал U и помеха V представляют собой стационарные случайные процес-

сы со спектральными плотностями $S_U(\omega)$ и $S_V(\omega)$ соответственно. Задача системы состоит в передаче сигнала U по возможности без искажения, причем допустимо только изменение масштаба его представления и запаздывание $\tau = \text{const}$. В таком случае мерой величины искажений может служить средняя квадратическая погрешность.

Для линеаризованной системы КУФД можно применить принцип суперпозиции. На ее выходах формируются сигналы, соответствующие полезному сигналу и помехе. Если последние статистически независимы, то выходные величины также независимы и их взаимные корреляционные функции и спектральные плотности равны нулю. Тогда $S_y(\omega) = |W_U(j\omega)|^2 S_U(\omega) + |W_V(j\omega)|^2 S_V(\omega)$, где W_U и W_V — коэффициенты передачи соответственно сигнала и помехи.

На основании разработанных моделей и полученных передаточных функций произведено моделирование проявления дефектов элементов КУФД (см. рис. 1) в контролируемых сигналах при следующих параметрах контура позиционного управления продольной подачи токарного станка [2, 8, 9 и 10].

Коэффициенты преобразования равны: 0,49 — для PC ; 0,75 — для PT ; 10,0 — для TP ; 0,0025 рад/В — для двигателя по угловой скорости и 0,81 рад/(Н·м) — по моменту; $1,5 \cdot 10^{-6}$ м/Н — для суппорта; 0,47 В/м — для DOC ; 0,1 В·с/рад — для TF ; 1500 — для СЧПУ.

Постоянные времени PC , PT , TP , суппорта и СЧПУ равны соответственно 0,264; 0,168; 0,003; 0,3 и 0,001 с; электрическая и механическая постоянные времени двигателя составляют 0,017 и 0,1 с.

Жесткость суппорта в направлении продольной подачи $6,5 \cdot 10^7$ Н/м; шаг ХВ 0,01 м; электрическая и механическая константы двигателя 0,34 В·с/рад и 0,96 В/(Н·м); коэффициент линеаризации силы резания $1,5 \cdot 10^6$ Н·с/рад.

Элементы механической системы, в которых возможно появление дефектов, моделировали аperiodическими звеньями первого порядка с коэффициентами преобразования по углу и по возмущению, равными соответственно 1,0 и примерно 0,0002 рад/(Н·м) и постоянными времени 0,0002 с.

Исследования, проведенные с привлечением известных критериев [12], подтвердили, что рассматриваемая система с принятыми значениями параметров устойчива.

Для выбранных значений параметров построены нормированные логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) соответствующих контуров по возмущениям M_{ci} с выходами: на угол α_5 поворота ХВ $[A_{\alpha ff}(\omega)]$, ток I двигателя $[A_{Iff}(\omega)]$ и частоту вращения ротора двигателя $[A_{\omega ff}(\omega)]$; соответствующие им контролируемые сигналы обозначены U_α , U_I , U_ω . Примеры ЛАЧХ для возмущений в муфте, первой опоре и направляющих показаны на рис. 2, а, в и д.

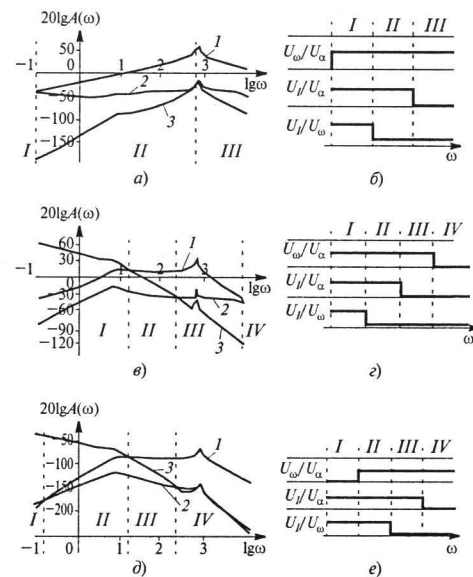


Рис. 2. Нормированные ЛАЧХ системы по возмущению на муфте (а), на первой опоре (б) и в направляющих (д), а также соотношения амплитудных составляющих контролируемых сигналов (соответственно б, г и е): 1 — ЛАЧХ $A_{\alpha ff}(\omega)$; 2 — ЛАЧХ $A_{Iff}(\omega)$; 3 — ЛАЧХ $A_{\omega ff}(\omega)$

На основании анализа полученных результатов на ЛАЧХ выделены частотные области (окна) I—IV, в которых наблюдается проявление дефекта. Границы этих областей определяются точками пересечения ЛАЧХ по рассматриваемым каналам наблюдения. В каждом окне находим соотношение амплитудных составляющих сигналов по соответствующим каналам измерения (рис. 2, б, г и е).

Из рис. 2 видно, что характеристики сигналов по выбранным каналам измерения при наличии

дефекта (возмущающего воздействия) различных элементов привода подачи отличаются друг от друга. Следовательно, изменяя подачу в заданных пределах и наблюдая характер изменения амплитуды сигналов в каналах измерения при переходе из одного окна в другое, можно с большой долей вероятности установить место дефекта.

На основании предложенного подхода проведено моделирование спектральных характеристик дефектов в подшипниках типа SKF 22228, установленных в первой опоре, при изменении скорости продольной подачи ($s_0 = 0,05 \div 0,2$ мм/об), частоте вращения шпинделя 800 об/мин и глубине резания 2 мм.

В результате получены линейчатые диаграммы спектральной плотности мощности сигналов, воспроизводящих возмущения, вызываемые дефектами в первой опоре при $s_0 = 0,1$ мм/об (рис. 3). Здесь приведены нормированные значения спектральной плотности $S^*(\omega) = S(\omega) \cdot 10^7$. Первая линия ($\omega = 2,5$ с⁻¹) соответствует дефектам, связанным, например, с проскальзыванием неподвижного кольца подшипника.

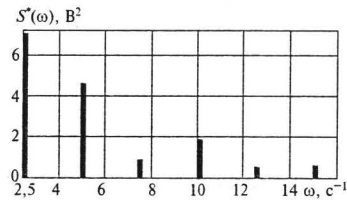


Рис. 3. Линейчатый спектр возмущений, вызванных дефектами в первой опоре

Для более детального анализа выбрана оптимальная гармоника по соотношению сигнал—шум: $\omega_6 \approx 42\pi s_0/h$, где n — частота вращения шпинделя; h — шаг ХВ.

Характер изменения нормированных значений $S^*(\omega)$ спектральной плотности сигналов, воспроизводящих возмущения, вызываемые дефектами, при различной подаче, а следовательно, в разных окнах наблюдения показан на рис. 4.

Из графиков видно, что при изменении подачи амплитудные составляющие спектра перераспределяются по разным каналам измерения. Максимум спектральной плотности смещается в область более высоких частот. При переходе из одного ок-

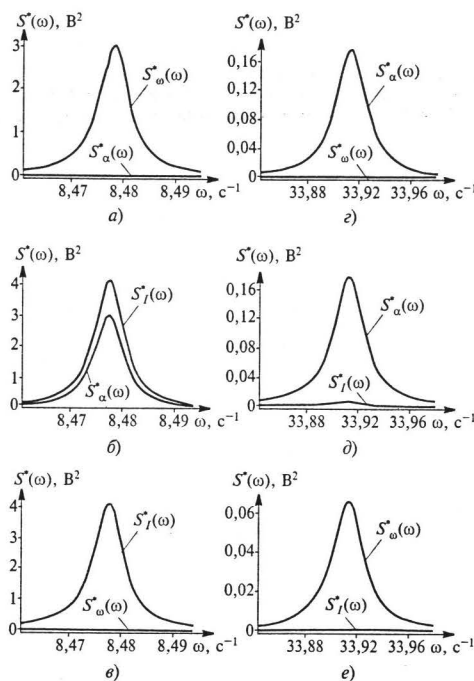


Рис. 4. Спектральные характеристики шестой гармоники при возмущении, вызванном дефектами в первой опоре: а, б, в — при $s_0 = 0,05$ мм/об; г, д, е — при $s_0 = 0,2$ мм/об; а и г — соотношение U_ω/U_a ; б и д — соотношение U_f/U_a ; в и е — соотношение U_f/U_ω

на наблюдения в другое изменяется соотношение амплитуд контролируемых сигналов, что подтверждает данные, приведенные на рис. 2, б, г и е.

Таким образом, анализ ЛАЧХ каналов измерения КУФД по углу поворота ХВ, частоте вращения ротора двигателя и потребляемому им току позволил выделить характерные окна наблюдения. Они легли в основу предложенного метода локализации дефектов, заключающегося в целенаправленном изменении подачи в направлении прохождения всех окон наблюдения.

Закономерное изменение спектральной плотности сигналов, воспроизводящих возмущения, вызываемые дефектами, при переходе из одного окна в другое позволяет определить принадлежность дефекта одному из элементов исследуемого

объекта и идентифицировать его параметры, например число дефектных шариков в подшипнике или степень повреждения поверхностей качения.

Исследования, которым посвящена данная статья, выполнены при финансовой поддержке РФФИ.

Список литературы

1. Сальников В. С., Чечуга О. В. Влияние характеристик привода подачи на характер движения суппорта // Изв. ТулГУ. Сер. Машиностроение. — Тула: ТулГУ, 2000. — Вып. 6 (спец.). — С. 124—125.
2. Чечуга О. В. Анализ движения суппорта в современных станках // Лучшие научные работы студентов и молодых ученых технологического факультета: Сб. статей / Под ред. Г. Г. Дубенского — Тула: ТулГУ, 2000. — С. 89—92.
3. Чечуга О. В., Сальников В. С. Возникновение колебаний в процессе резания // Автоматизация и информатизация в машиностроении: Сб. трудов 2-й междунар. электрон. науч.-техн. конф. — Тула: Гриф и К, 2001. — С. 146—150.
4. Пуш В. Э., Пигерт Р., Сосонкин В. Л. Автоматические станочные системы. — М.: Машиностроение, 1982. — 319 с.
5. Кулинов В. А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.
6. Казимиров А. Н., Золотых С. Ф. Моделирование и идентификация диагностических ситуаций механических узлов металлорежущих станков // Изв. ТулГУ. Сер. Технологическая системотехника. — Тула: ТулГУ, 2006. — Вып. 6. — С. 19—22.
7. Казимиров А. Н., Шадский Г. В., Сальников В. С. Моделирование проявления дефектов в подвижных соединениях технологического оборудования // Изв. ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. — Тула: ТулГУ, 2006. — Вып. 2. — С. 178—186.
8. Вейц В. Л., Довдощанский В. К., Чиряев В. И. Вынужденные колебания в металлорежущих станках. — М.: Машгиз, 1959. — 288 с.
9. Андронов А. А., Витт А. А., Хайсен С. Э. Теория колебаний. — М.: Физматгиз, 1959. — 915 с.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
11. Кумабэ Д. Вибрационное резание. — М.: Машиностроение, 1985. — 124 с.
12. Иванов В. А., Чемоданов Б. К., Медведев В. С. Математические основы теории автоматического регулирования. — М.: Высш. школа, 1971. — Т. 1. — 366 с.

“Библиотека Машиностроителя”
www.lib-bkm.ru