

Ю. В. Идрисова, Р. Г. Кудояров, С. И. Фецак

МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИВодОВ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Предложен метод оперативной диагностики технического состояния приводов металлообрабатывающего оборудования, основанный на сравнении, формальном и логическом анализе диагностических признаков, к которым относятся: спектр внешних вибровозмущающих воздействий, возникающих в узлах приводов станка, и спектр погрешностей формы (волнистости) и шероховатости обработанной поверхности детали. *Внешние возмущающие воздействия; колебания инструмента и обрабатываемой детали; спектры отклонений формы (волнистости) и шероховатости*

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития машиностроения характеризуются повышенными требованиями к производительности оборудования, точности размеров, качеству поверхностей обрабатываемых деталей и снижению себестоимости обработки. Реализация этих требований в полном объеме сдерживается следующими факторами:

на российских машиностроительных предприятиях суммарные затраты за весь период эксплуатации металлообрабатывающих станков в четыре-пять раз превышают их первоначальную стоимость, что связано с затратами на ремонт в связи с отсутствием оперативных методов определения возникающих в них дефектов на этапе эксплуатации и технического обслуживания;

разработчики станков указывают показатели точности и производительности выпускаемого ими оборудования, которые достигаются только в отдельных операциях для конкретных обрабатываемых материалов, используемых режущих инструментов и режимов резания.

Качество поверхности изготавливаемых деталей в значительной степени зависит от технического состояния используемого оборудования. При наличии дефектов изготовления и сборки узлов оборудования происходит ухудшение таких показателей качества, как шероховатость и отклонения формы (волнистость).

Эффективность эксплуатации станочного оборудования можно существенно повысить за счет разработки и использования метода оперативной диагностики металлообрабатывающих станков с учетом динамических характеристик

оборудования, возможных погрешностей изготовления и сборки узлов оборудования, влияния дефектов изготовления и сборки узлов на погрешности формообразования поверхностей деталей. Особенно это актуально для многоцелевых станков, осуществляющих многокоординатную обработку деталей [6].

Разработка метода оперативной диагностики технического состояния металлообрабатывающего станка требует установления теоретических зависимостей численных значений спектра неровностей – шероховатости и отклонений формы (волнистости) поверхности детали от вынужденных колебаний инструмента и заготовки в процессе резания. Для оценки этих колебаний необходимы исследования динамической системы металлообрабатывающих станков с учетом значений параметров процесса резания, процессов трения в подвижных сопряжениях и дефектов изготовления и сборки узлов станка. Решение этих актуальных задач позволит на стадиях приемо-сдаточных испытаний и эксплуатации оценить техническое состояние металлообрабатывающих станков и принять оперативные меры по обеспечению необходимой точности и производительности обработки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

К дефектам изготовления и сборки узлов оборудования относят: неуравновешенность шпинделя и деталей его привода; погрешности изготовления и сборки опор качения, направляющих качения, передачи винт-гайка качения; погрешности изготовления и сборки зубчатых и ременных передач; погрешности изготовления и сборки элементов электродвигателей. Указанные дефекты вызывают вибровозмущающие

воздействия, которые сосредоточены в местах проявления этих дефектов.

Математические модели вибровозмущающих воздействий представляют собой амплитудно-частотные спектры разложения в ряд Фурье, особенностью математического описания является то, что каждому виду дефекта соответствует конкретный спектр вибровозмущающих воздействий, что может являться диагностическим признаком металлообрабатывающего оборудования.

Вибровозмущающие силы, воздействуя на упругую систему станка, приводят к колебаниям инструмента и обрабатываемой детали, что в свою очередь является причиной ухудшения качества обрабатываемой поверхности детали. Таким образом, при наличии установленных зависимостей спектра колебаний инструмента и обрабатываемой детали от спектра внешних вибровозмущающих воздействий и параметров качества обрабатываемой детали (погрешностей формы (волнистости) и шероховатости) можно определить техническое состояние приводов металлообрабатывающих станков по параметрам отклонений формы поверхности детали.

Параметры колебаний инструмента и обрабатываемой детали предлагается определить с использованием комплексной динамической модели станка, учитывающей силы трения в направляющих устройствах и вибровозмущающие воздействия в приводах станка. Металлообрабатывающий станок рассматривается в виде схемы, состоящей из элементов (границей элемента служит точка приложения вибровозмущающих воздействий). Элементы представляются в виде сосредоточенных масс m_i и моментов инерции J_i , упругие связи определяются линейной c_i и угловой k_i жесткостью стыка, диссипативные связи, определяющие демпфирование колебаний, учитываются в виде линейных h_i или угловых g_i коэффициентов демпфирования в зависимости от форм колебаний. При разработке динамической модели приняты следующие допущения: внешние нагрузки являются сосредоточенными; детали, установленные на валах привода, и корпусные детали представлены в виде сосредоточенных масс; стыки элементов станка представлены в виде упруго-диссипативных связей.

Вынужденные колебания инструмента и заготовки описываются системой дифференциальных уравнений, учитывающей принцип Д'Аламбера. Для каждой i -й точки ди-

намической системы станка составлены уравнения

$$\bar{F}_i + \bar{N}_i + \bar{Q}_i = 0,$$

где F_i – действующая на эту точку активная сила, N_i – реакция в точке связи, Q_i – сила инерции, численно равная произведению массы m_i точки на ее ускорение w_i направленная противоположно этому ускорению.

Использованы характеристики трения, представленные в работах Н. А. Кочинева, Н. Г. Чикурова и др. в виде трех составляющих. К ним относятся: статическая характеристика, учитывающая граничную силу трения в момент трогания подвижной части привода; динамическая характеристика в виде «падающей» зависимости силы трения от скорости относительного движения; характеристика жидкостного трения с возрастающей зависимостью силы трения от скорости относительного движения [4].

Динамическая характеристика процесса резания является инерционной [1, 2]. При обработке металла многолезвийным инструментом передаточная функция процесса резания имеет вид:

$$W_p = \frac{P}{h} = \frac{K_p(1 - e^{-\tau p})}{T_p p + 1}, \quad (1)$$

где K_p – удельная сила резания, Н; T_p – постоянная времени стружкообразования, с; τ – величина запаздывания, зависящая от числа лезвий инструмента, $\tau = h/Z$, где h – глубина резания, мм; Z – число зубьев; p – оператор дифференцирования.

Система дифференциальных уравнений, описывающая относительные колебания инструмента и заготовки для приводов станка, состоит из n уравнений, где n – количество элементов. Для i -го элемента уравнение баланса действующих сил имеет вид:

$$m_i \ddot{l}_i + h_i \dot{l}_i + c_i l_i = \sum_i^n \bar{F}_{Bi}, \quad (2)$$

где l_i – перемещение данного узла в направлении одной из осей X , Y или Z . Левая часть каждого уравнения отражает действие внутренних сил и силы инерции в i -м узле станка, а правая часть – действие активных внешних сил F_B в i -м узле. Колебания инструмента и заготовки рассмотрены по нормали к обрабатываемой поверхности. Решение системы дифференциальных уравнений получено отдельно для каждой гармоники возмущающих сил, разложенной в ряд Фурье.

Установлено, что амплитуда относительных колебаний инструмента и обрабатываемой детали зависит от вибровозмущающих воздействий i -го узла станка и проявляется в том же частотном диапазоне (3).

$$A_{kjojo}(\Delta f) = \sqrt{\sum_s \sum_{\Delta f} (H_{kji}^2 \text{инс} + H_{kjj}^2 \text{заг})}, \quad (3)$$

где $H_{kj}^2 \text{инс}$ и $H_{kj}^2 \text{заг}$ – амплитуды k -й гармоники j -й координаты векторов виброперемещений рабочих органов станка, на которых установлены инструмент и заготовка. Полученные расчетные значения можно использовать в качестве косвенных диагностических признаков оборудования.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИВодОВ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА НА КОЛЕБАНИЯ ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния погрешностей приводов многоцелевого станка на колебания инструмента и обрабатываемой детали показаны на примере станка модели 500VS.

В соответствии с конструкцией станка разработана его расчетная схема. Динамическая система станка является замкнутой и состоит из отдельных частей: приводов подач по осям X , Y и Z , привода главного движения, несущей сис-

темы и динамической характеристики процесса резания. Связь между приводами станочной системы осуществляется с помощью направляющих качения посредством упругих и диссипативных элементов.

Приняты следующие допущения: деталь крепится на столе абсолютно жестко, соединение «инструмент – оправка шпинделя» также является жестким. Относительные перемещения инструмента и заготовки вдоль осей X , Y и Z описаны с помощью системы дифференциальных уравнений, составленных для каждого модуля станка. В соответствии с конструкцией привода и допущениями, изложенными выше, составлена его расчетная схема (рис. 1).

Математическая модель, описывающая динамические процессы, протекающие в приводе, имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{z}_7 + \ddot{z}_6) + h_7(\dot{z}_7 - \dot{z}_0) + h_6(\dot{z}_6 - \dot{z}_0) + \\ + c_7(z_7 - z_0) + c_6(z_6 - z_0) = F_{вдх} + F_{в6} + F_{в7} \\ m_2(\ddot{z}_3 + \ddot{z}_1) + h_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_0 - \dot{z}_2) + h_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_0 - \\ - \dot{z}_2) + c_3(z_3 - z_0 - z_2) + c_1(z_1 - z_0 - z_2) = \\ = F_{в3} + F_{в1} + F_{в2} \\ m_2\ddot{z}_0 + h_0\dot{z}_0 + c_0z_0 = P_z \\ m_4(\ddot{z}_8 + \ddot{z}_9 + \ddot{z}_2) + h_8(\dot{z}_8 - \dot{z}_0) + h_9(\dot{z}_9 - \\ - \dot{z}_0) + h_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1 - \dot{z}_3) + c_8(z_8 - z_0) + \\ + c_9(z_9 - z_0) + c_2(z_2 - z_1 - z_3) = \\ = F_{в8} + F_{в9} + F_{в2}. \end{aligned} \quad (4)$$

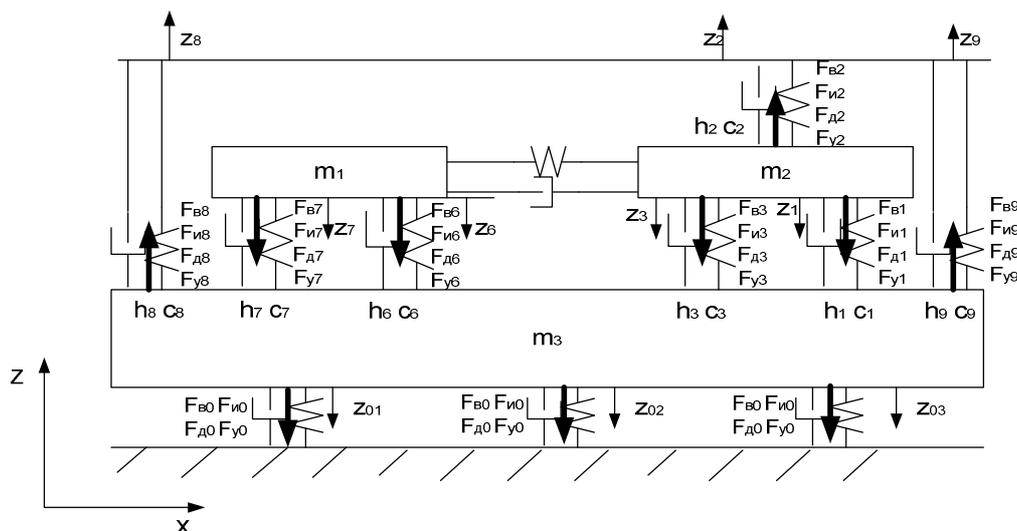


Рис. 1. Расчетная схема привода подач по оси X : $F_{дi}$ – вектор сил демпфирования; F_{yi} – вектор сил упругости; $F_{иi}$ – вектор сил инерции; $F_{ви}$ – вектор сил вибровозмущающих воздействий; c_i – коэффициент упругости; m_i – сосредоточенная масса; h_i – коэффициент демпфирования; Z_i – перемещение узлов под действием внешних сил; i – номер узла согласно расчетной схеме

Математическая модель относительного перемещения инструмента и обрабатываемой детали исследована в среде MATLAB 7.3. Результаты математического моделирования для различных видов обработки показывают, что расчетные «суммарные» характеристики зависят от работы всех приводов, участвующих в формировании детали.

С использованием разработанной динамической модели произведена оценка влияния погрешностей изготовления и сборки узлов приводов многоцелевого станка на относительные колебания инструмента и заготовки на холостом ходу.

Расчет для многоцелевого станка модели 500VS проведен для варианта работы привода главного движения с частотой вращения шпинделя 12000 мин^{-1} (200 Гц) и 2800 мин^{-1} (46,7 Гц) и приводов станка с заданной подачей 5000 мм/мин при шаге винта 8 мм (10,4 Гц)

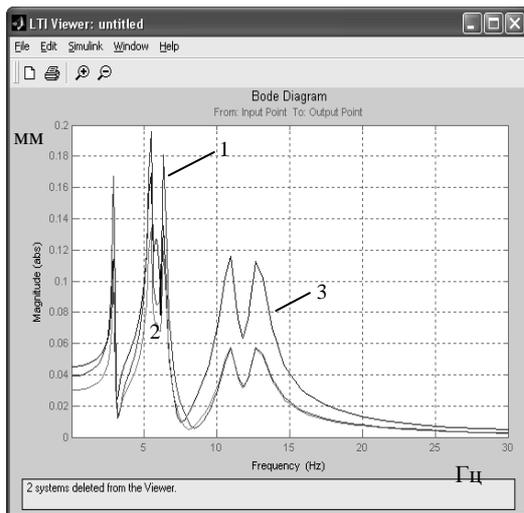


Рис. 2. Относительные колебания инструмента и обрабатываемой детали с учетом дефектов в приводах подачи:
1 – привод по оси X; 2 – привод по оси Y;
3 – привод по оси Z

Выявлено, что наибольшее влияние на увеличение амплитуды колебаний инструмента и обрабатываемой детали оказывают дефекты опор приводов подачи и передачи винт-гайка качения привода вертикального перемещения по осям X и Z (рис. 2).

Экспериментальные исследования проводились с целью подтверждения математической модели колебаний инструмента и обрабатываемой детали. Измерения (измерялись величины виброперемещений в контрольных точках при-

водов) проведены в соответствии с методикой измерения, описанной В. Н. Барковым.

Для определения колебаний инструмента и обрабатываемой детали станка модели 500VS проводились измерения виброперемещений по трем осям X, Y и Z.

Значения амплитуд и частот колебаний инструмента и заготовки на холостом ходу получены для подачи $S_m = 5000 \text{ мм/мин}$ и частоты вращения шпинделя $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$ на холостом ходу. В таблице представлены расчетные и экспериментальные значения частот колебаний инструмента и заготовки.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных результатов показывает, что частоты, полученные расчетным методом, в диапазоне от 28 до 103 Гц адекватны экспериментальным значениям частот с погрешностью не более 6 %.

Сравнительный анализ результатов исследования

Резонансные частоты, полученные расчетным способом, Гц	Резонансные частоты, полученные экспериментально, Гц	Относительная погрешность, %
13,4	12	10,4
27,7	28	1,08
54,4	51	6,25
75	79	5,33
107	103	3,73
130	132	1,53

Исследования влияния погрешностей изготовления элементов станка проводились при работе вертикального привода подачи (ось Z) на быстром ходу (скорость 40 м/мин). Вибрации измерялись для станка, оснащенного системой линейного перемещения фирмы BOSCH REXROTH, по нормали к направлению перемещения. В результате сравнения частот и амплитуд вибросигнала с расчетными значениями на передаче винт-гайка качения обнаружен дефект дорожки винта. Этот дефект передачи винт-гайка качения влияет только на огибающую вибросигнала колебаний инструмента и обрабатываемой детали. Причиной такого поведения характеристики является компоновка привода (с двумя параллельными передачами винт-гайка), которая приводит к тому, что вибровозмущения, возникающие в передачах привода, находятся в противофазе.

На величину амплитуды колебаний инструмента и обрабатываемой детали существенное влияние оказывает сила резания.

Таким образом, при проведении теоретических и экспериментальных исследований были выявлены причины возникновения вибровозмущающих воздействий в системе «станок – инструмент – деталь» и подтверждена связь изменения амплитуды колебаний инструмента и обрабатываемой детали и вибровозмущающих сил в одном частотном диапазоне.

МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИВодОВ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА

Расчет параметров качества (отклонений формы (волнистости) и шероховатости) обработанной поверхности, предусматривает: составление функции формообразования и установление системы идеальных связей, описывающих номинальную обработанную поверхность на многоцелевом станке с использованием метода вариационного исчисления.

При построении линий пересечения поверхностей, выделяющих реальную обрабатываемую поверхность, определены параметры неровностей, образующихся на поверхности детали – высота гребня и глубина впадины волны в j -м сечении детали, с использованием выражений:

$$\Delta \tilde{y}_{ij}^{bn} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \frac{4A_{yi}R}{S_z^2} \sin(k_j^{P_{mj}} \varphi_i + \alpha_i), \quad (5)$$

$$\Delta \tilde{y}_{ij}^r = \Delta \tilde{y}_{ij}^{bn} + \frac{1}{2} (\tilde{Q}_{1,2}^j)^2,$$

где $k_j^{P_{mj}} = (P_{mj} - 1) + \frac{j-1}{N}$; P_{mj} – номер полного оборота фрезы, N – число сечений поверхности, Q_u угол между двумя соседними следами в искомой точке пересечения, A_y – амплитуда нормальных вынужденных колебаний инструмента и заготовки.

Установленные закономерности позволяют получить ожидаемый профиль в поперечном сечении поверхности детали, параметры которого являются косвенными (дополнительными) диагностическими признаками.

Метод оперативной оценки технического состояния металлообрабатывающих станков предложено базировать на сравнении фактического спектра неровностей обработанной детали с эталонным спектром, полученным экспериментально, что позволяет своевременно выявить наличие параметрического отказа оборудования. Структура метода приведена на рис. 3.

Эталонный спектр определяет допустимый уровень амплитуд и диапазон частот, соответствующих допуску погрешностям формы (волнистости) и шероховатости обработанной поверхности детали.

При идентификации источника отказа с его диагностическим признаком необходимо провести ранжирование по частотным диапазонам эталонного спектра причин параметрических отказов и их видам (погрешность формы (волнистость), шероховатость). Поиск причины отказа проводится в определенном частотном диапазоне путем идентификации частоты возмущения с доминирующей частотой, вызывающей отказ в данном частотном диапазоне.

Под расчетным спектром понимается спектр шероховатости и отклонений формы – волнистости (неровностей) поверхности, полученный при соблюдении технических условий на точность изготовления и сборки узлов и элементов приводов металлообрабатывающего станка.

В соответствии с разработанным алгоритмом оперативной диагностики станка (рис. 3, выделенные блоки) проведены диагностические исследования технического состояния многоцелевых станков. Оценка технического состояния на примере станка мод. 500VS проведена по качеству обработанных поверхностей детали (материал СЧ-20). В соответствии с ГОСТ 25443-82 при обработке детали "пирамида" осуществлена проверка на точность изготавливаемого оборудования. Обработка детали производилась с помощью концевой фрезы на режиме: глубина резания $t = 0,1$ мм, подача $S = 200$ мм/мин, частота вращения шпинделя 600 мин^{-1} .

Получены следующие результаты:

измеренные отклонения формы (волнистость) и шероховатость поверхности детали (рис. 4) превышают допустимые значения, обозначенные горизонтальными линиями.

определены эталонный спектр отклонений формы (волнистость) и шероховатость поверхности детали и расчетный спектр рис. 5 (1 и 2). Отклонения формы (волнистость) и шероховатость поверхности детали, приведенная на рис. 7, определяется кривой 3 на рис. 5. С помощью данных (рис. 3) и соотношения $f_i/n = f_n$, где f_i – частота возникновения относительных колебаний инструмента и заготовки, f_n – частота проявления отклонений формы (волнистости) и шероховатости поверхности, n – зубцовая частота вращения инструмента, определена $f_i = 75$ Гц.



Рис. 3. Алгоритм оперативной диагностики приводов подач металлообрабатывающего станка

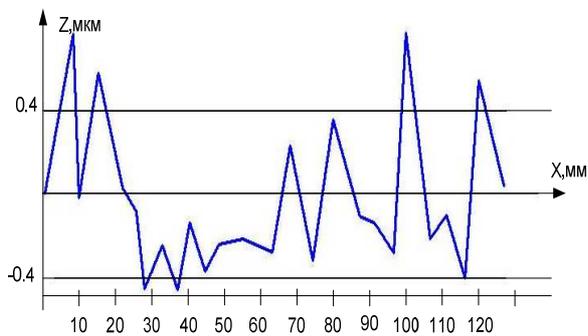


Рис. 4. Отклонения формы (волнистость) и шероховатость поверхности при обработке поверхности детали в плоскости XOZ

Полученный частотный спектр соответствует погрешностям изготовления дорожек винта привода подач вертикального перемещения и привода подач продольного перемещения. Для однозначного определения дефекта узла в данном случае необходимо дополнительное диагностирование станка.

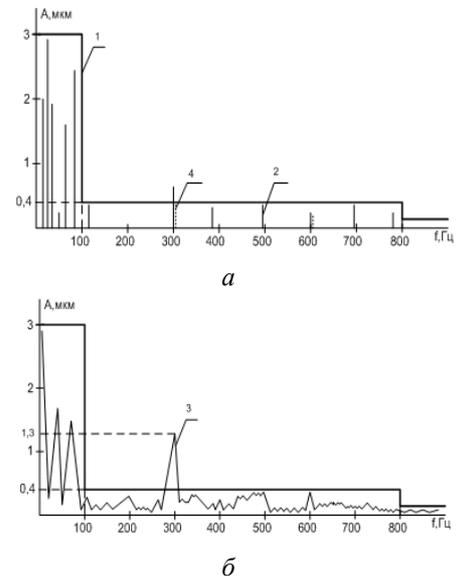


Рис. 5. Отклонения формы (волнистости) и шероховатости обработанных поверхностей детали: *а* – определение характерных частот эталонного спектра с учетом расчетных спектров; *б* – фактический спектр: *1* – допустимые уровни амплитуд в диапазонах частот эталонного спектра, *2* – расчетный спектр, *3* – фактический спектр, *4* – амплитуда гармоники спектра, учитываемая при корректировке технических условий

При обработке детали в плоскости XOY , когда привод подач по оси Z не работает, целесообразно провести анализ влияния погрешностей в приводе подач по оси X . Установлено, что отклонения формы (волнистость) и шероховатость рассматриваемой поверхности не превышают допустимые значения (рис. 6).

Следовательно, дефект, порождающий погрешность поверхности, находится в приводе вертикального перемещения и принадлежит передаче винт-гайка качения. Учитывая компоновку станка, в данном случае целесообразно ужесточить требования к сборке привода вертикального перемещения.

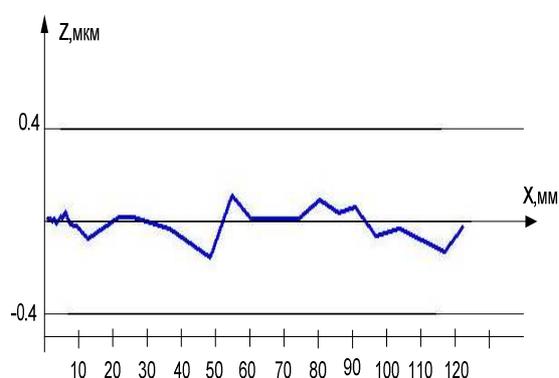


Рис. 6. Отклонения формы (волнистость) и шероховатость поверхности при обработке поверхности детали в плоскости XOY

ВЫВОДЫ

Оценка технического состояния металлообрабатывающего станка методом контроля, основанным на анализе неровностей поверхностей детали, вызванных относительными колебаниями инструмента и заготовки, является информативной и эффективной, так как возмущающие силы возникают непосредственно в месте появления дефекта вибросигнал содержит максимальный объем диагностической информации. Разработанный метод позволяет определить источники дефектов в приводах станка при его кратковременной остановке и минимальной разборке, а также разработать мероприятия по их устранению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение. 1967. 359 с.
2. **Санкин Ю. Н.** Динамика несущих систем металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 94 с.
3. **Перевертайло Ю. В., Кудояров Р. Г., Фецак С. И.** Определение параметрических отказов станочного оборудования // СТИН. 2007. № 11. С. 9–13.
4. **Перевертайло Ю. В., Кудояров Р. Г., Фецак С. И.** Влияние сил трения, действующих в приводе станка, на характер исполнительного движения // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, №1 (34). С. 128–134.
5. **Идрисова Ю. В., Фецак С. И.** Вибродиагностика линейного привода подач многоцелевого станка, основанная на определении внешних возмущающих воздействий // Вестник РГАТА. 2011. № 2 (21). С. 120–126.
6. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Оперативная диагностика при металлообработке – проблемы и задачи // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 3. С. 14–18.

ОБ АВТОРАХ

Идрисова Юлия Валерьевна, ст. преп. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инженер по автоматизации (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. динамики и диагностики металлообрабатывающих станков.

Кудояров Ринат Габдулхакович, проф. той же каф. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию механической и физико-технической обработки (защ. в УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. разработки мехатронных станочных систем.

Фецак Сергей Игоревич, доц. той же каф. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1985). Канд. техн. наук по технологиям и оборудованию механической и физико-технической обработки (защ. в ЭНИМСе, 1990). Иссл. в обл. динамики мехатронных станочных систем.