Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОХРОНОМЕТРИИ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

к.т.н., руководитель лаборатории
Сырицкий Антони Борисович

Москва, 17 мая 2017 года

Актуальность работы

Методы диагностики состояния режущего инструмента

Вибродиагностика и виброакустическая диагностика

Сложности и ограничения: потери информации в многочисленных стыках

Относительная погрешность измерения: 0.01-5%

Диагностика на основе измерения силы резания

Сложности и ограничения: усложнение конструкции резца/резцедержателя, снижение жесткости технологической системы

Относительная погрешность измерения: 1-10%

Диагностика на основе измерения температуры либо термоЭДС

Сложности и ограничения: высокая стоимость, низкое быстродействие

Относительная погрешность измерения: 0.1-1%

Диагностика на основе измерения потребляемой мощности, крутящего момента

Сложности и ограничения: низкая чувствительность диагностики при чистовой обработке, низкое быстродействие

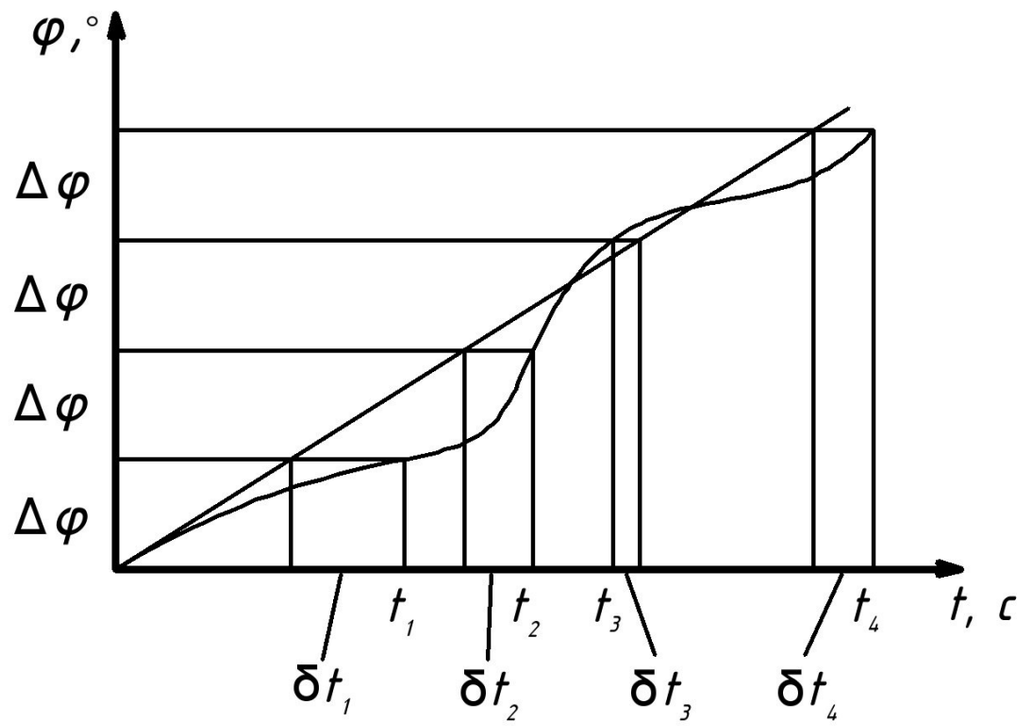
Относительная погрешность измерения: 0.1-1%

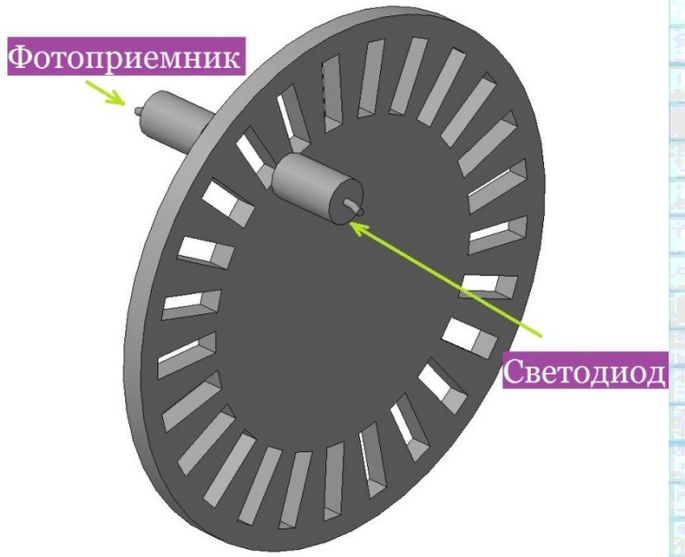
Задача создания эффективной прецизионной системы мониторинга износа токарного инструмента остается актуальной

Фазохронометрический метод анализа рабочего цикла машин и механизмов

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты

- Н.С.П. $5 \cdot 10^{-16}$ с





Измерения при фазохронометрическом подходе реализуются по двум вариантам:

- квантование фазы цикла по уровню с дискретизацией по времени, включая

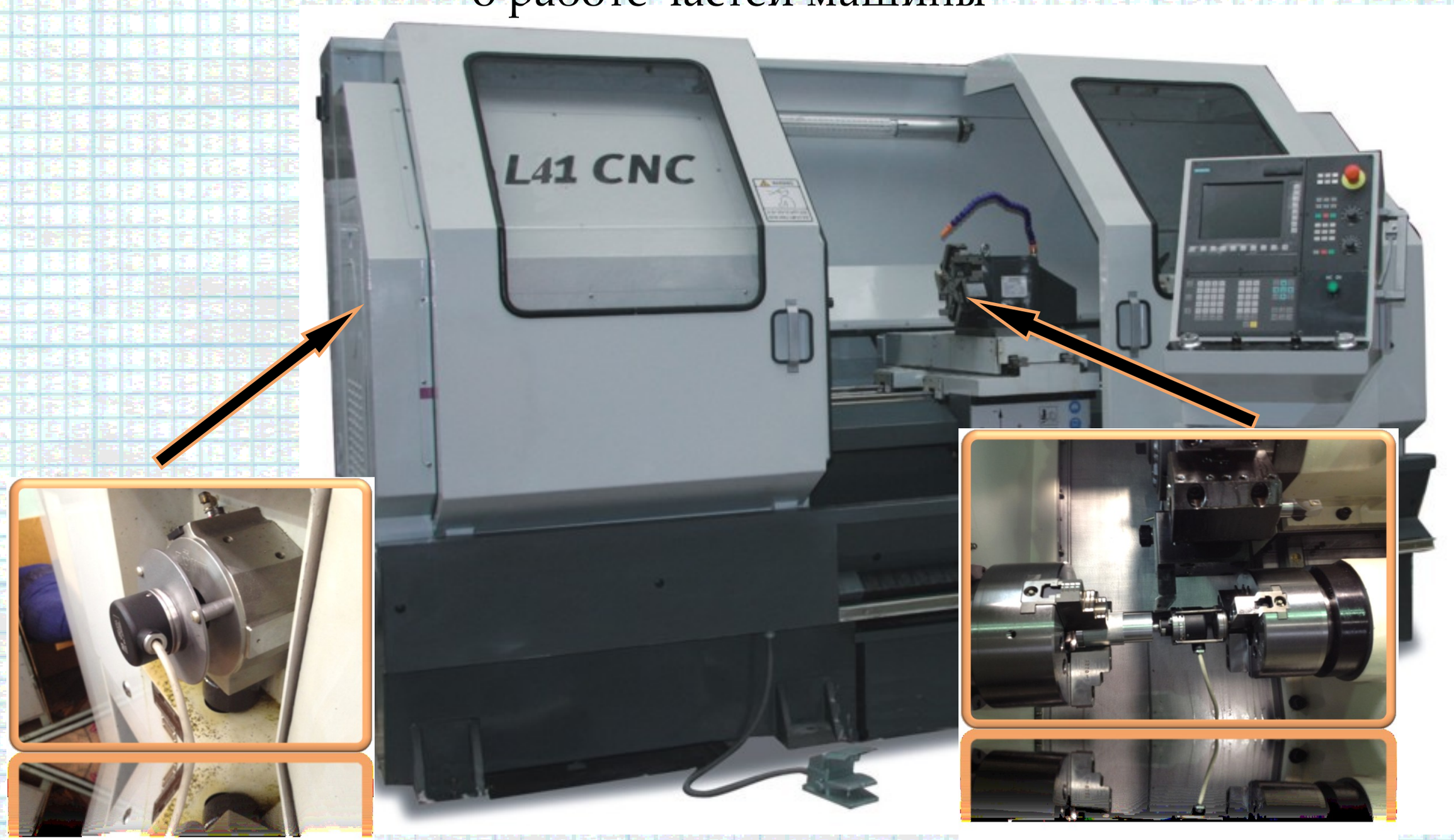
а) равномерное квантование фазы

б) регистрацию моментов достижения характерных заданных значений фазы или границ характерных этапов цикла;

- равномерное квантование времени с дискретизацией по уровню.

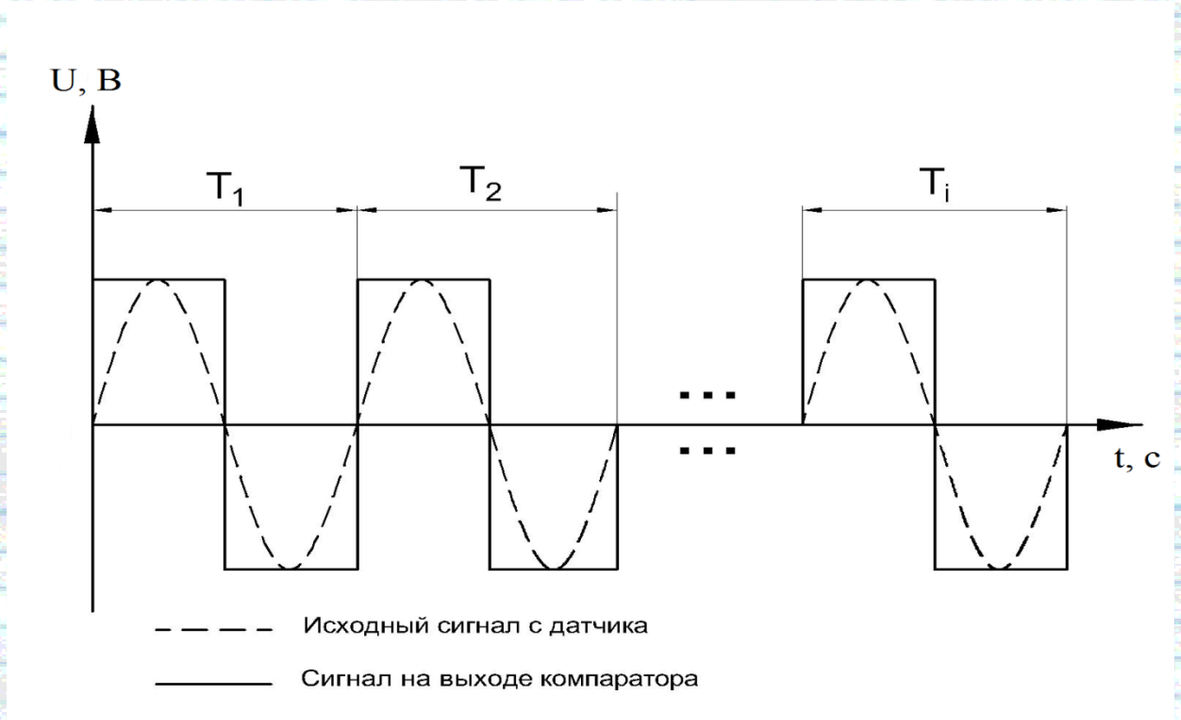
Реализация измерительной технологии

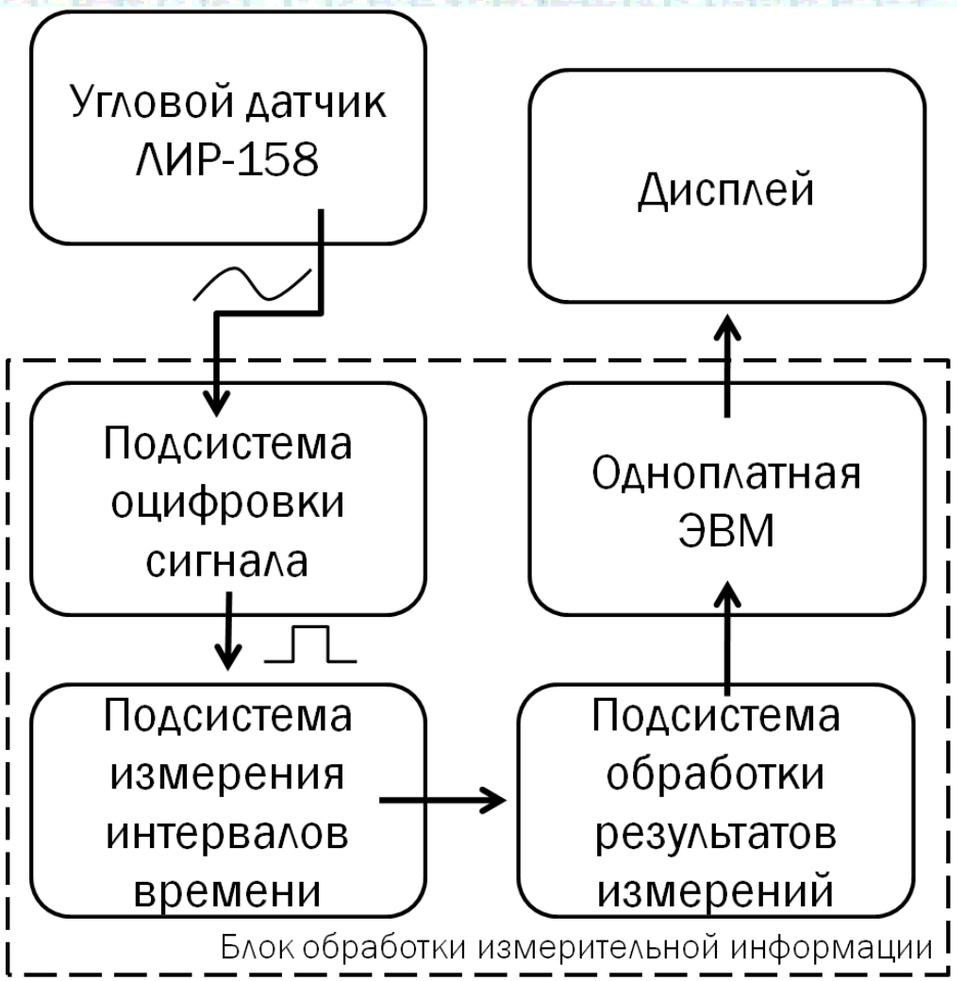
Расположение датчиков в машине обусловлено конструкцией частей циклически работающей машины, а места установки датчиков определяют с точки зрения получения наиболее полной информации о работе частей машины

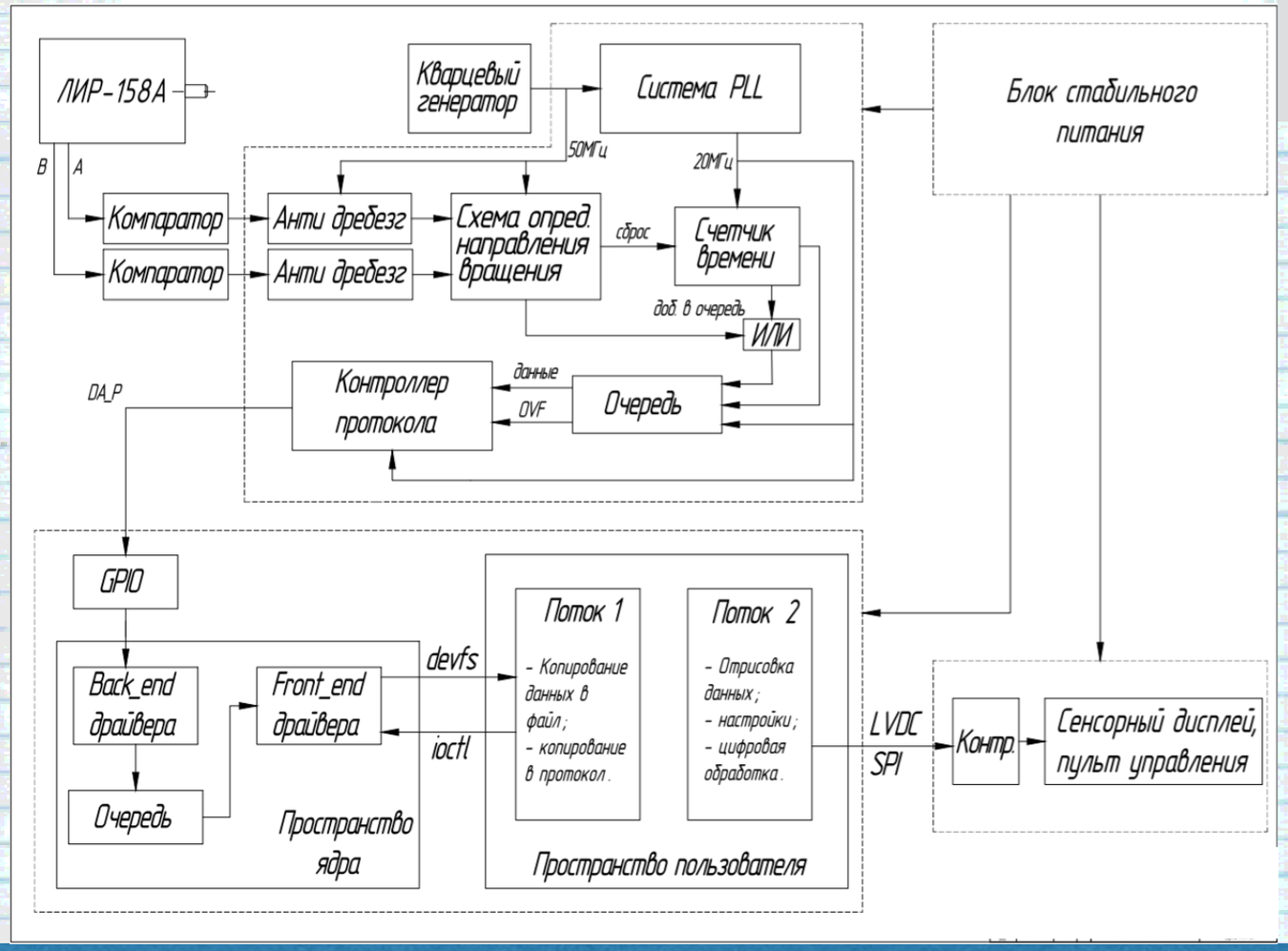


Реализация системы

Метрологические требования к системе	
Допускаемая относительная погрешность измерения	$5 \cdot 10^{-3}$ %
Класс точности первичных преобразователей, не ниже	5 класс
Допускаемое отклонение выдачи измерительной информации от реального времени, не более	10 мкс



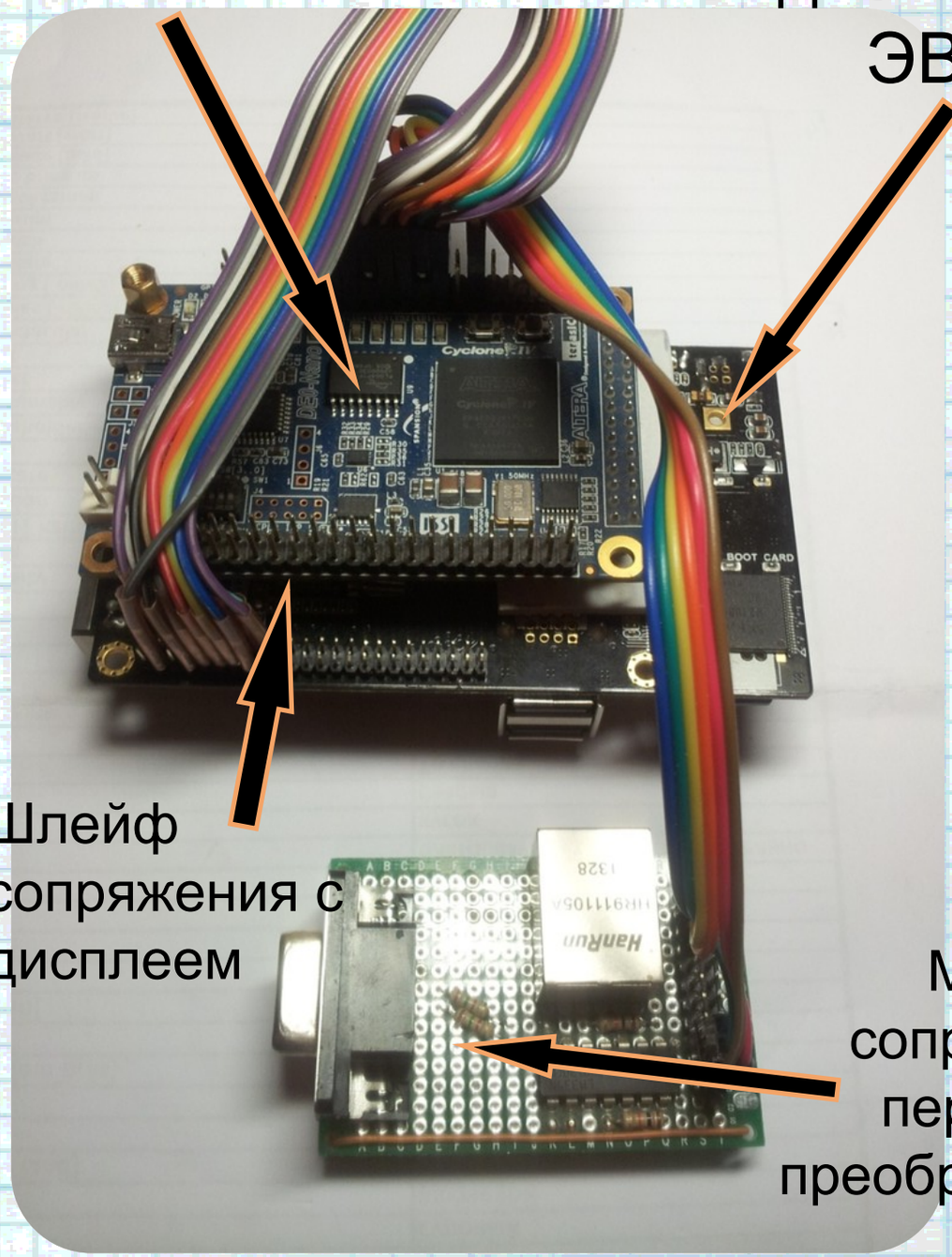




Блок обработки измерительной информации

ПЛИС

Одноплатная ЭВМ



Шлейф сопряжения с дисплеем

Модуль сопряжения с первичным преобразователем

Угол между соседними штрихами на измерительном лимбе:

$$\alpha = \frac{2\pi}{N_M} = \frac{2\pi}{5000} = 0{,}00125\ \text{рад} = 260''$$

где N_M - количество штрихов на измерительном лимбе.

Относительная погрешность изготовления диска:

$$\Delta = \frac{30''}{260''} = 0{,}115 = 11{,}5\%$$

Погрешность измерения интервала времени для n=1000 об/мин:

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi n} = \frac{0{,}00015}{2\pi \cdot 1000} = 2{,}38 \cdot 10^{-8}\ \text{с}$$

где φ - предел допускаемого значения погрешности измерения угловых перемещений, рад;
ω - угловая частота вращения шпинделя станка, рад/с.
Относительная погрешность:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{t_{ном}} \cdot 100\% = \frac{2{,}38 \cdot 10^{-8}}{1{,}2 \cdot 10^{-5}} = 1{,}98 \cdot 10^{-3}\ \%$$

где $t_{ном}$ - номинальная длительность интервала времени, с.

Погрешность, вносимая муфтой датчика:

$$\Delta t_M = \frac{\theta}{\omega} = \frac{\theta}{2\pi n} = \frac{0{,}000097}{2\pi \cdot 1000} = 1{,}54 \cdot 10^{-8}\ \text{с}$$

Где θ - погрешность передачи вращения муфтой, рад;
Относительная погрешность:

$$\delta t_M = \frac{\Delta t_M}{t_{ном}} \cdot 100\% = \frac{1{,}54 \cdot 10^{-8}}{1{,}2 \cdot 10^{-5}} = 1{,}28 \cdot 10^{-3}\ \%$$

Погрешность преобразования сигнала в компараторе:

$$\delta t_K = \frac{\Delta t_K}{t_{ном}} \cdot 100\% = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{1{,}2 \cdot 10^{-5}} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ \%$$

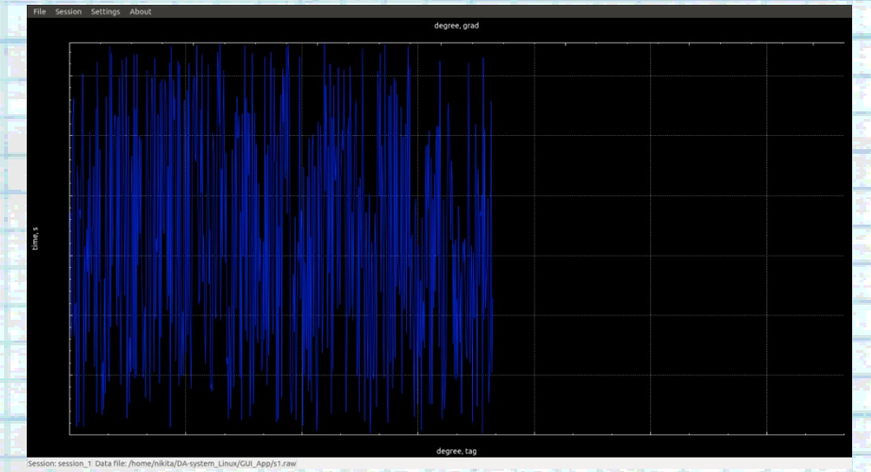
где Δt_K – крутизна фронта сигнала на выходе компаратора, с.

Оценка границы относительной погрешности измерений δ:

$$\delta = K\sqrt{\sum_1^i \delta_i^2}$$

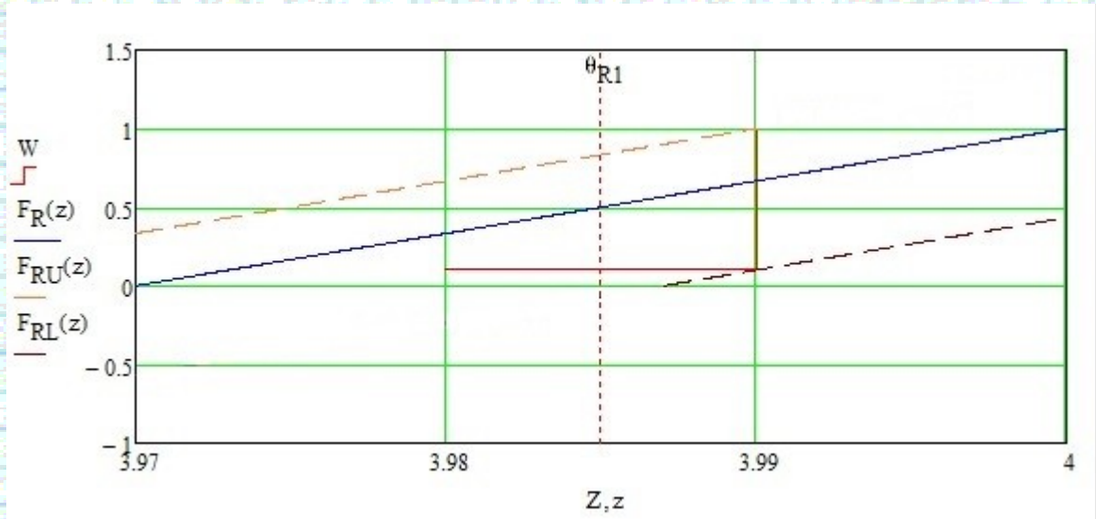
где K=1,2 для оценок границ погрешности измерений наиболее важных параметров;
δ_i - оценка границы i-й составляющей относительной погрешности измерений.

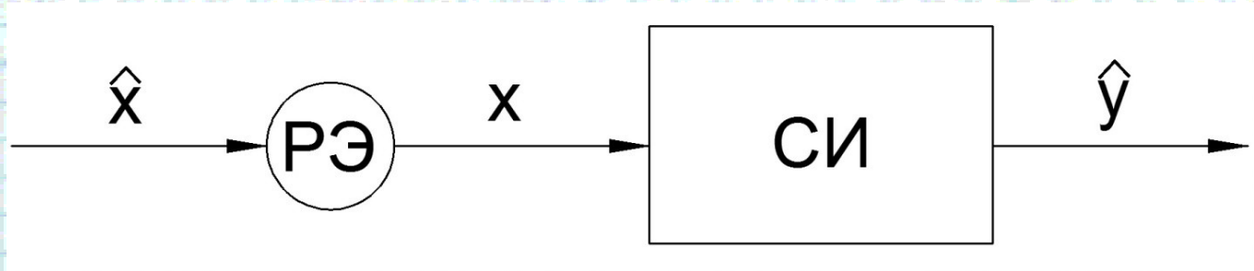
$$\delta = 1{,}2\sqrt{(1{,}98 \cdot 10^{-3})^2 + (1{,}28 \cdot 10^{-3})^2 + (2{,}5 \cdot 10^{-3})^2} = 3{,}43 \cdot 10^{-3}\ \%$$



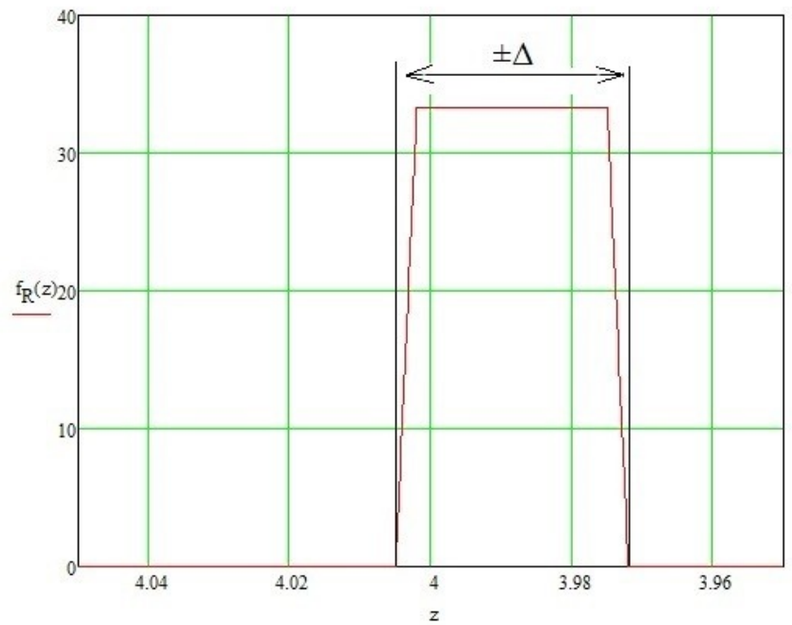
Принтскрин бета-версии прикладного ПО

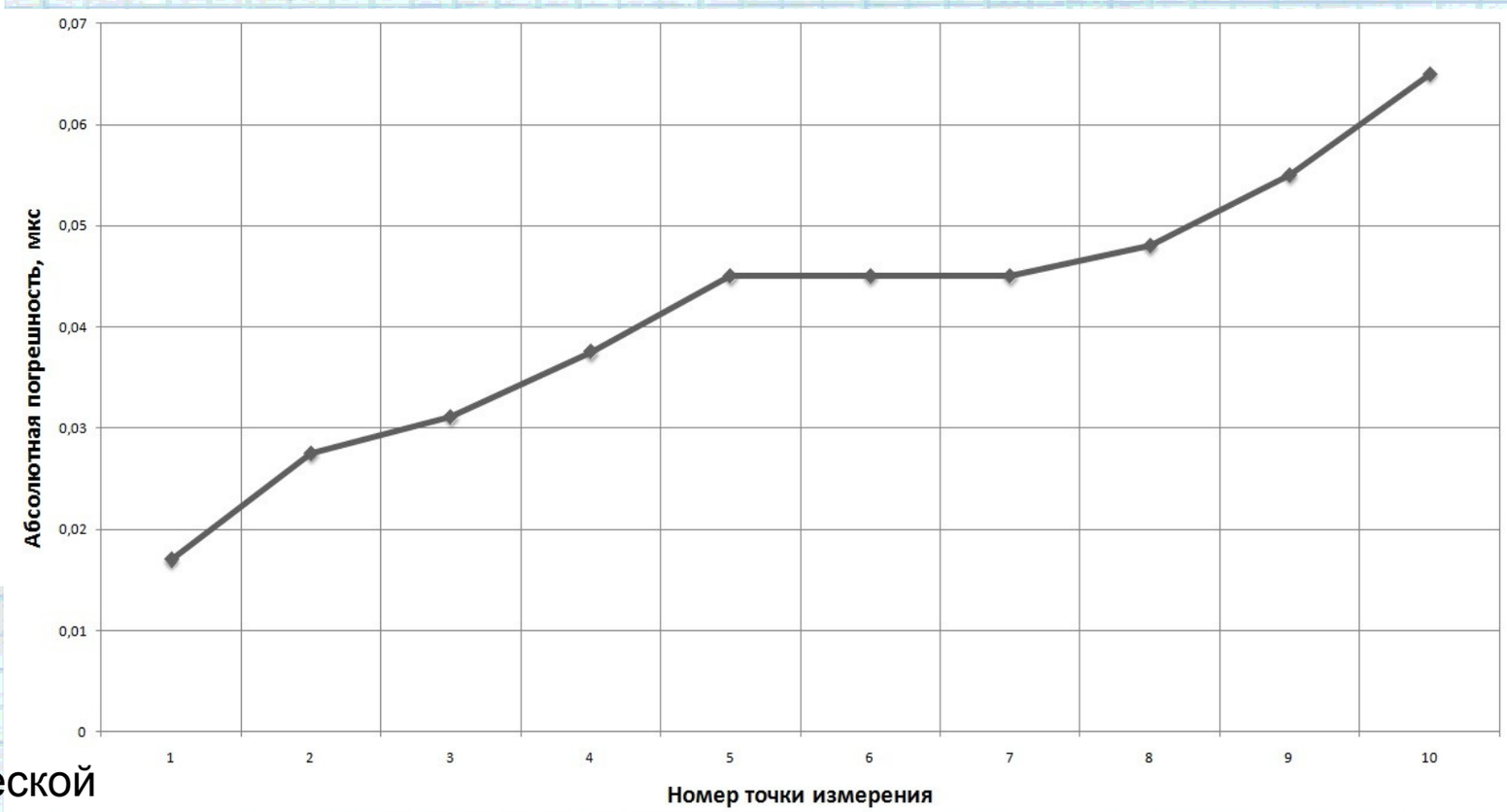
Оценка метрологических характеристик блока обработки измерительной информации





Номер точки диапазона	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δ_i, мкс	0.017	0.0275	0.0311	0.0375	0.045	0.045	0.045	0.048	0.055	0.065

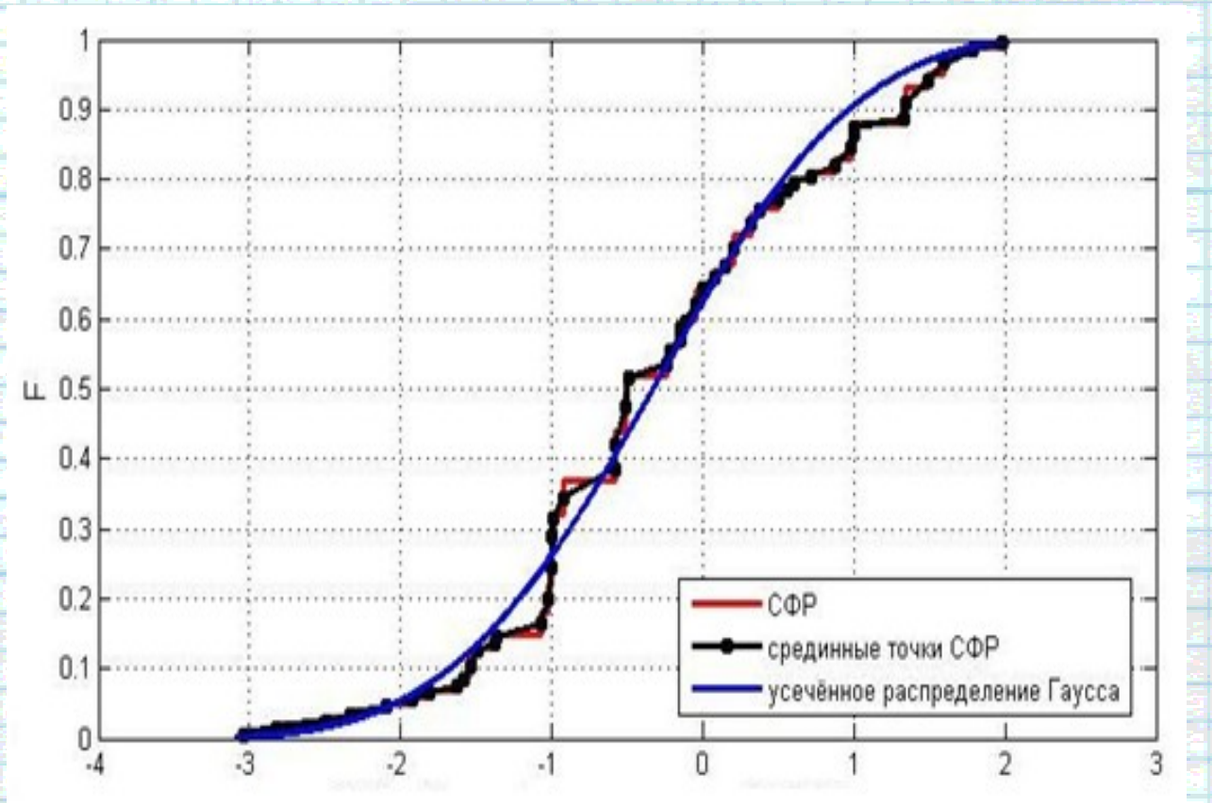




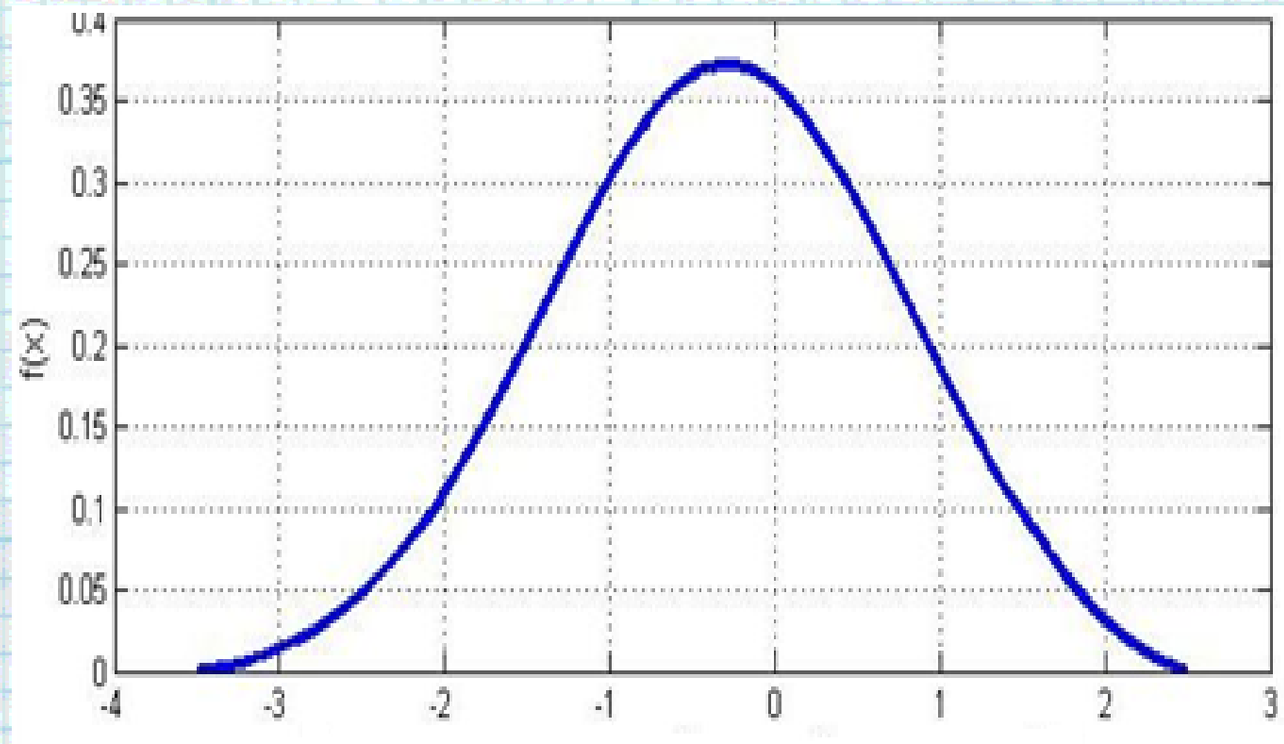
Впервые для ФХМ системы решена **измерительная задача идентификации основной погрешности** с целью построения функции погрешности (основной метрологической характеристики средства измерений)

Погрешность лежит в пределах от 0,017 до 0,065 мкс (СКО 0,01388 мкс). Линейность полученной характеристики говорит о стабильности метрологических характеристик во всем диапазоне измерения.

Оценка метрологических характеристик блока обработки измерительной информации



Идентификация функции распределения

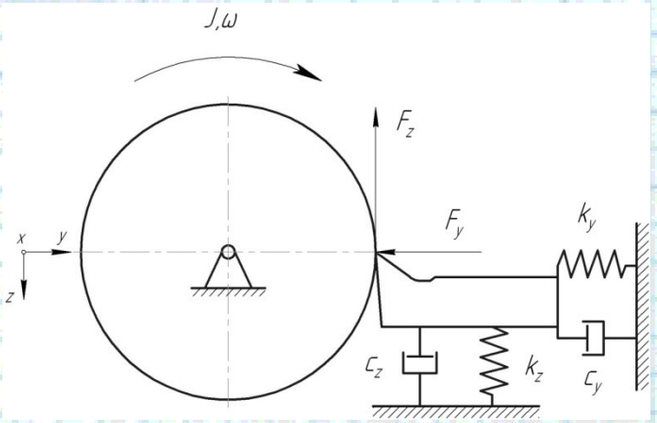


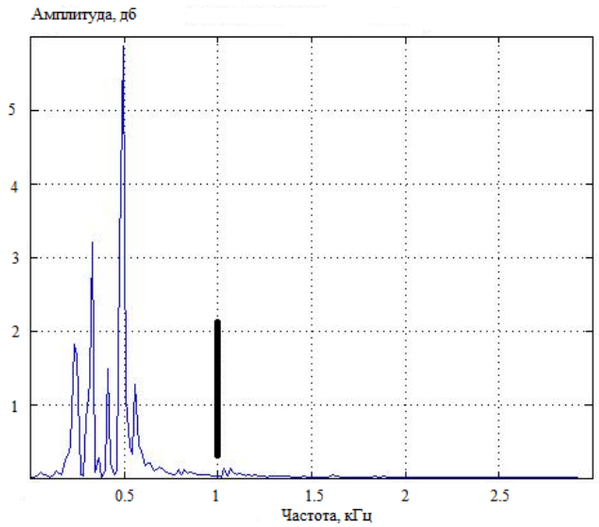
Свертка возможных значений основной погрешности СИ

По статистическому нормализованных значений погрешности и характеристикам погрешности рабочего эталона была построена вероятностная оценка количественного результата идентификации основной погрешности блока обработки измерительной информации.

Верхняя граница свертки возможных значений основной погрешности: 0,049 мкс
Нижняя граница свертки возможных значений основной погрешности: - 0,032 мкс

Математическое моделирование

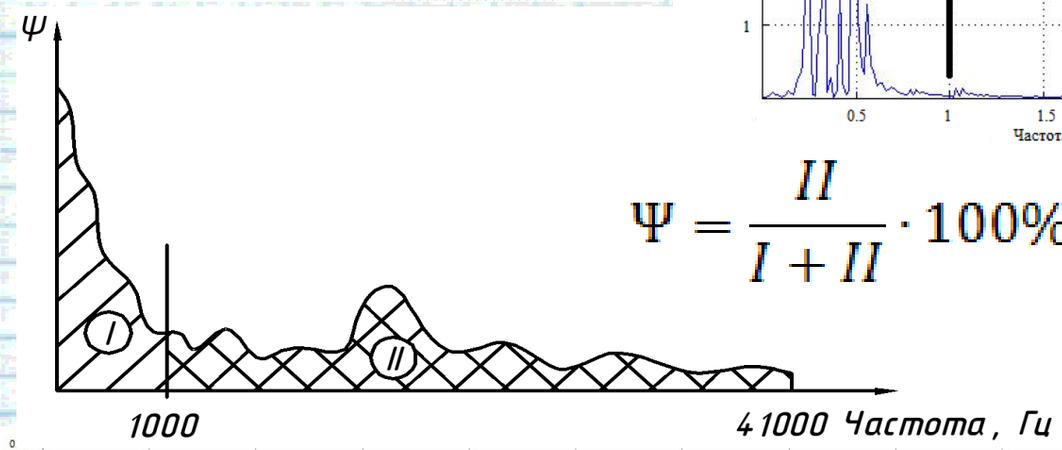




Зависимость угла поворота шпинделя от времени в модели взаимодействия заготовки и режущего инструмента с учетом нелинейной силы сопротивления движению резца и его вынужденных колебаний вдоль линии резания имеет вид:

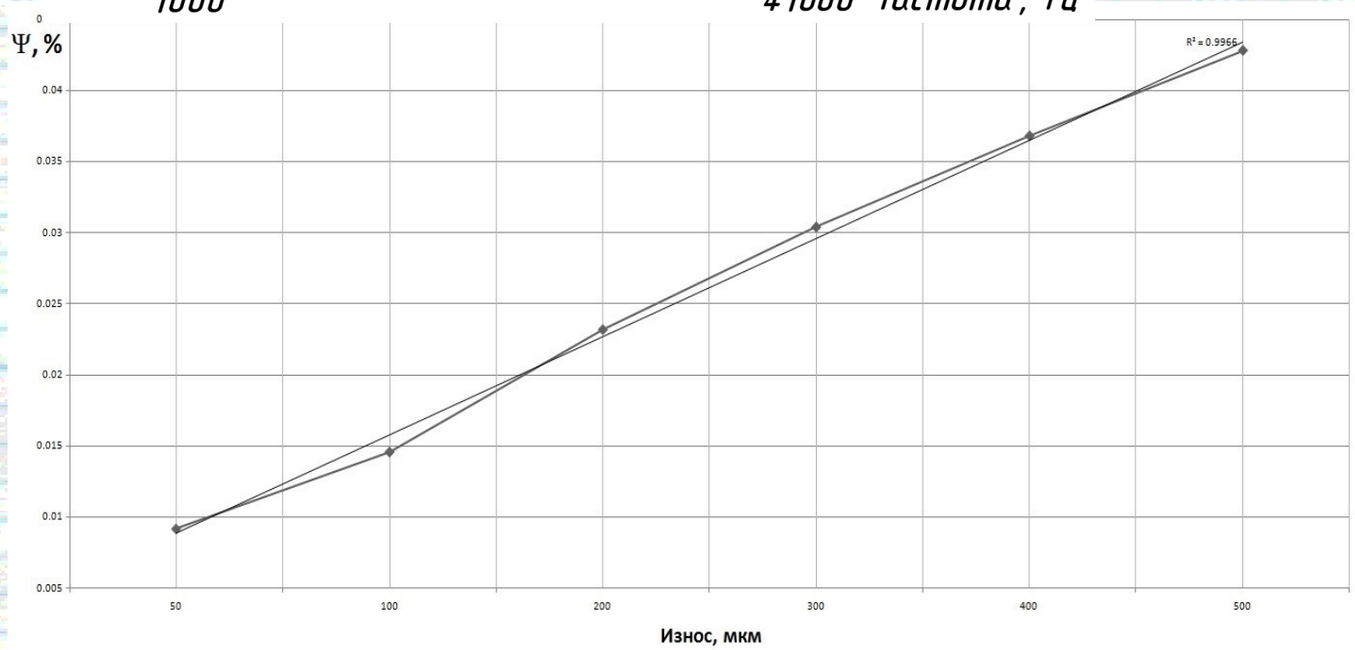
$$\theta(t) = \Omega_н t + \frac{AR_д}{J\omega_0^2}\left(k_z - m_z\omega_0^2\right)\cdot\sin\left(\omega_0 t + \phi_0\right) + \frac{AR_д c_z}{J\omega_0}\times$$
$$\times\left(\frac{3}{4}\gamma A^2\omega_0^2 - 1\right)\cdot\cos\left(\omega_0 t + \phi_0\right) + \frac{1}{36J}\gamma A^3 R_д c_z \omega_0 \cos(3\omega_0 t + 3\cdot\phi_0),$$

где θ – угол поворота шпинделя; $R_д$ – плечо силы в точке приложения; m – эффективная масса резца; γ – коэффициент нелинейности, зависящий от скорости резания и определяемый по эмпирической зависимости; A – амплитуда колебаний резца; ω_0 – угловая частота колебаний резца; φ_0 – фаза;

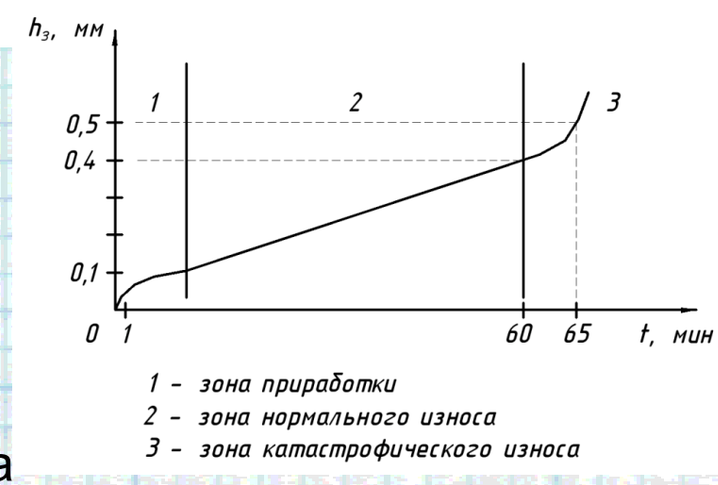


$$\Psi = \frac{II}{I + II}\cdot 100\%$$

где $A = \beta\cdot\sqrt[\chi]{\frac{h_з}{B}}$, $h_з$ - износ по задней поверхности



Достижению равномерно распределенных границ интервалов угла поворота («квантов фазы») $\Delta\theta_н\left(\Delta\theta_н = \frac{2\pi}{N}\right)$ соответствуют регистрируемые моменты времени t_i. При равномерном вращении детали повороту на угол $\Delta\theta$ соответствует интервал времени $\Delta t_н\left(\Delta t_н = \frac{2\pi}{\Omega_н N}\right)$. Возмущенному резанием неравномерному режиму вращения соответствуют временные интервалы $\Delta t_i\left(\Delta t_i = t_i - t_{i-1}\right)$. При этом в вариациях интервалов $\delta\Delta t_i\left(\delta\Delta t_i = \Delta t_i - \Delta t_н\right)$ содержится информация о режиме резания

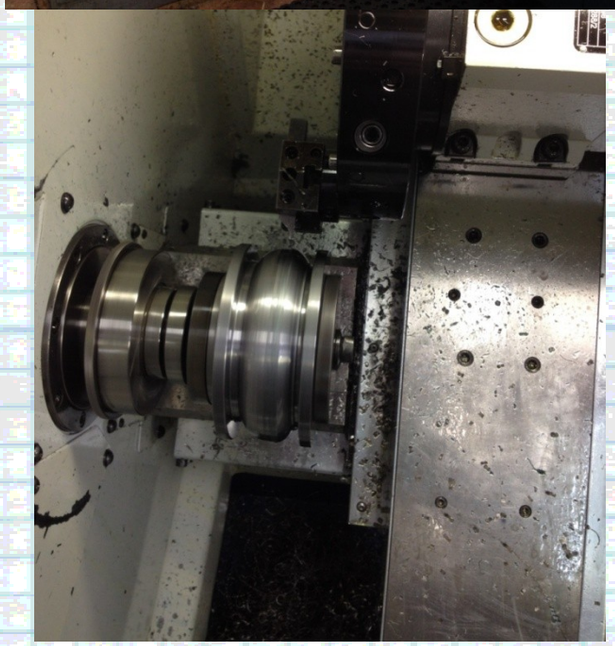


Впервые введен критерий затупления режущего инструмента, заключающийся в росте доли высокочастотных составляющих в спектре хронограммы вращения по мере износа режущего инструмента

Исследование процесса резания

Станок G.D.W. 240 CNC, Раменский ПЗ, n=300 об/мин, s=0.02 мм/об

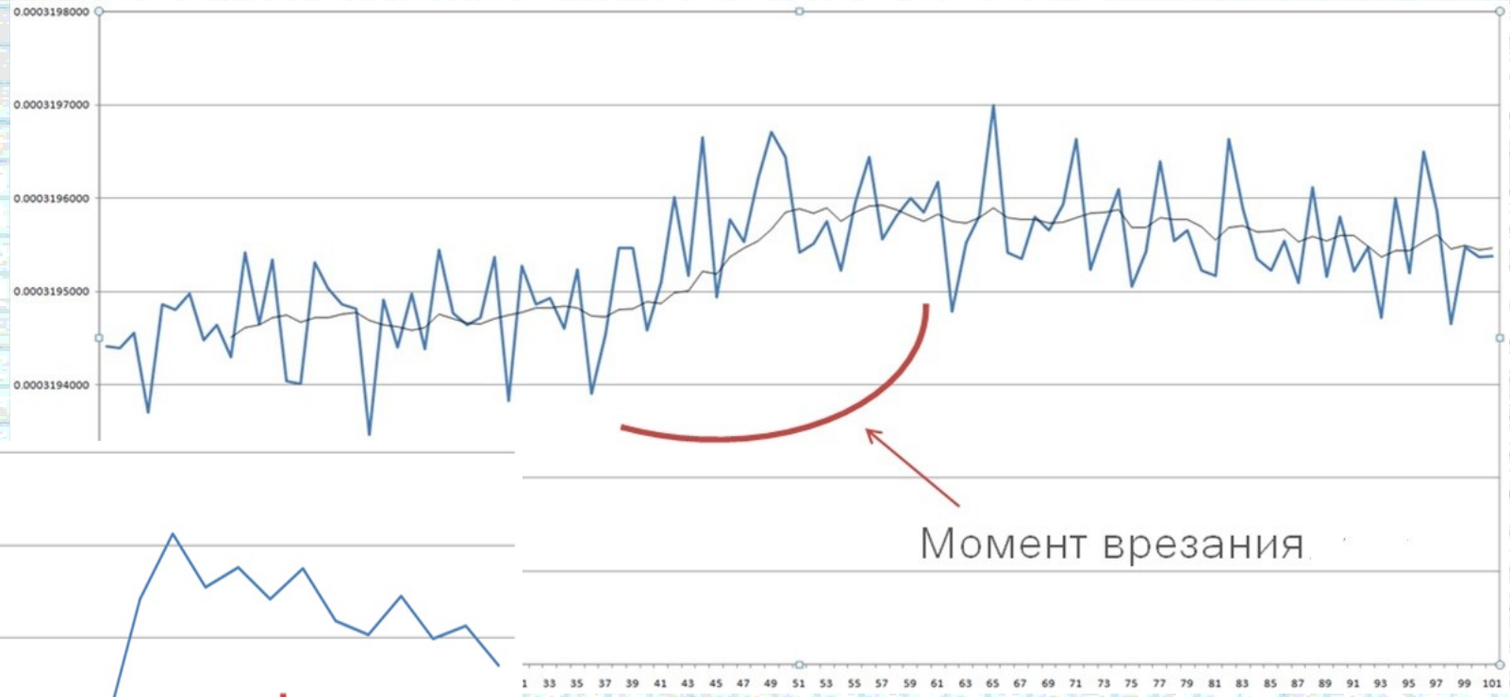
- Проведена оценка работоспособности системы в цеховых условиях. Доказана работоспособность.

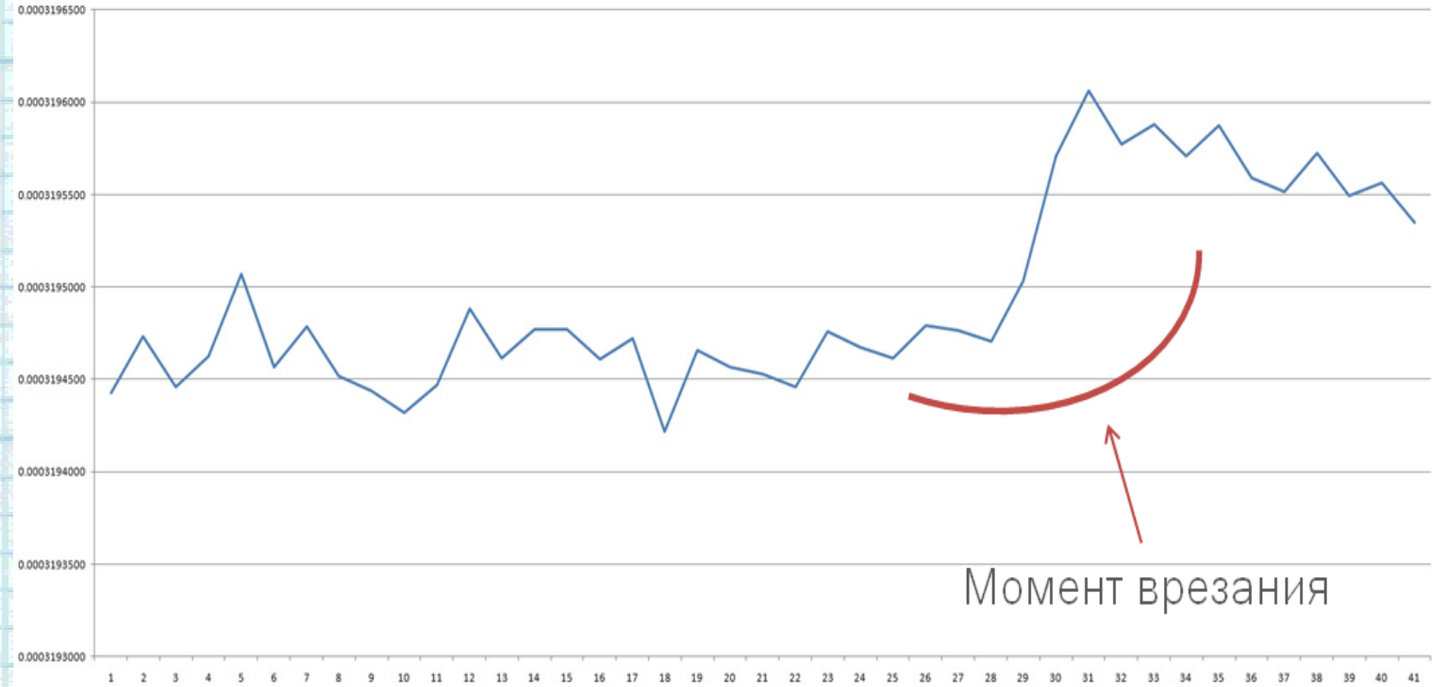


Исследование процесса резания

Станок G.D.W. 240 CNC, Раменский ПЗ, n=300 об/мин, s=0.02 мм/об

- Впервые исследован процесс врезания инструмента в заготовку в фазохронометрическом представлении

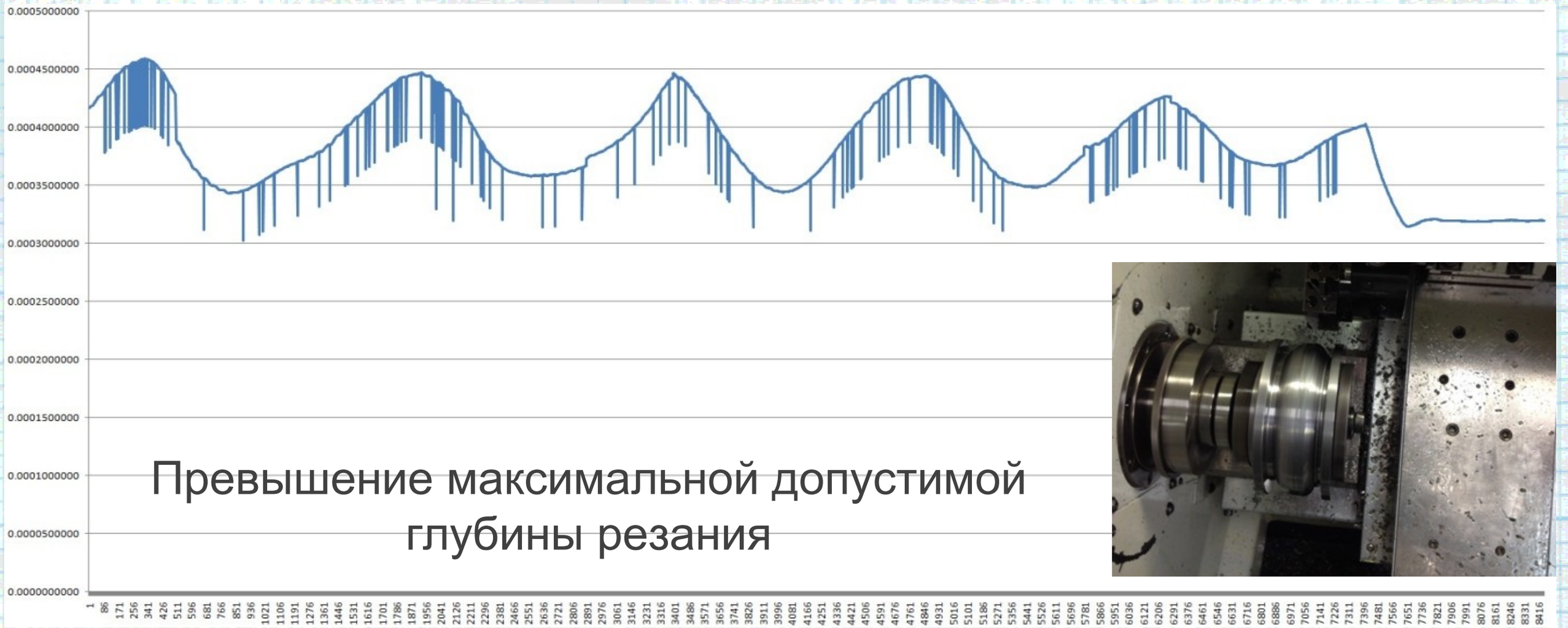




- Доказана чувствительность системы к изменениям, связанным с взаимодействием инструмент-деталь.
- Показана возможность детального изучения процесса врезания.

Исследование процесса резания

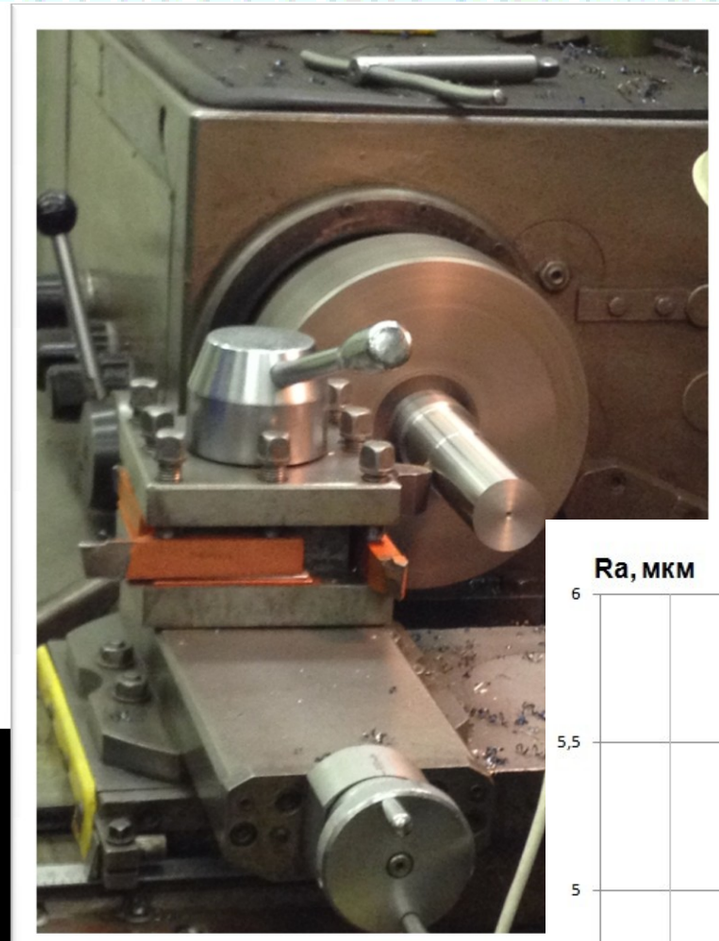
Станок G.D.W. 240 CNC, Раменский ПЗ, n=300 об/мин, s=0.02 мм/об



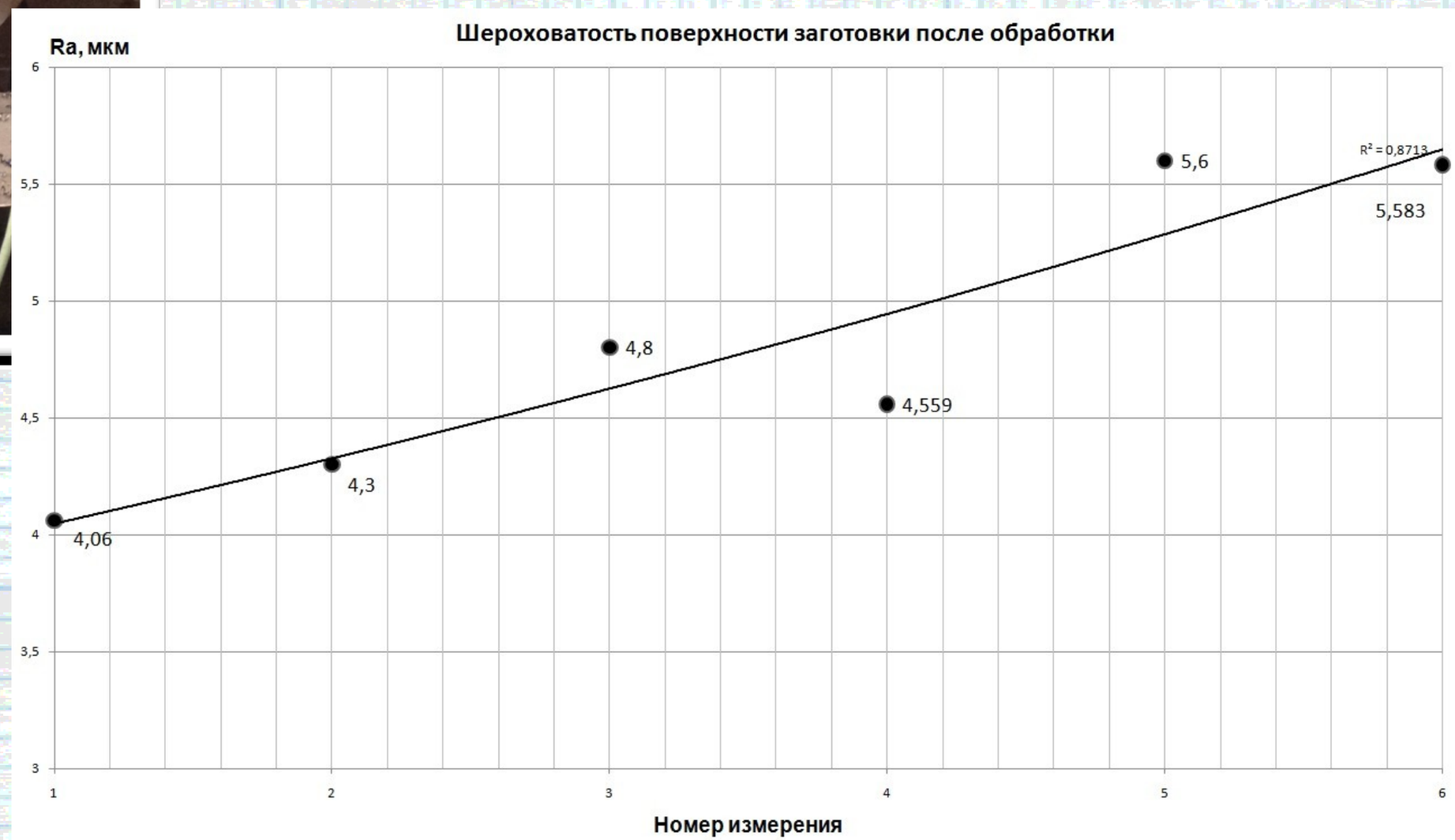
Превышение максимальной допустимой глубины резания

- Впервые показана применимость фазохронометрической измерительной информации в вопросах управления процессом обработки

Исследование износа инструмента



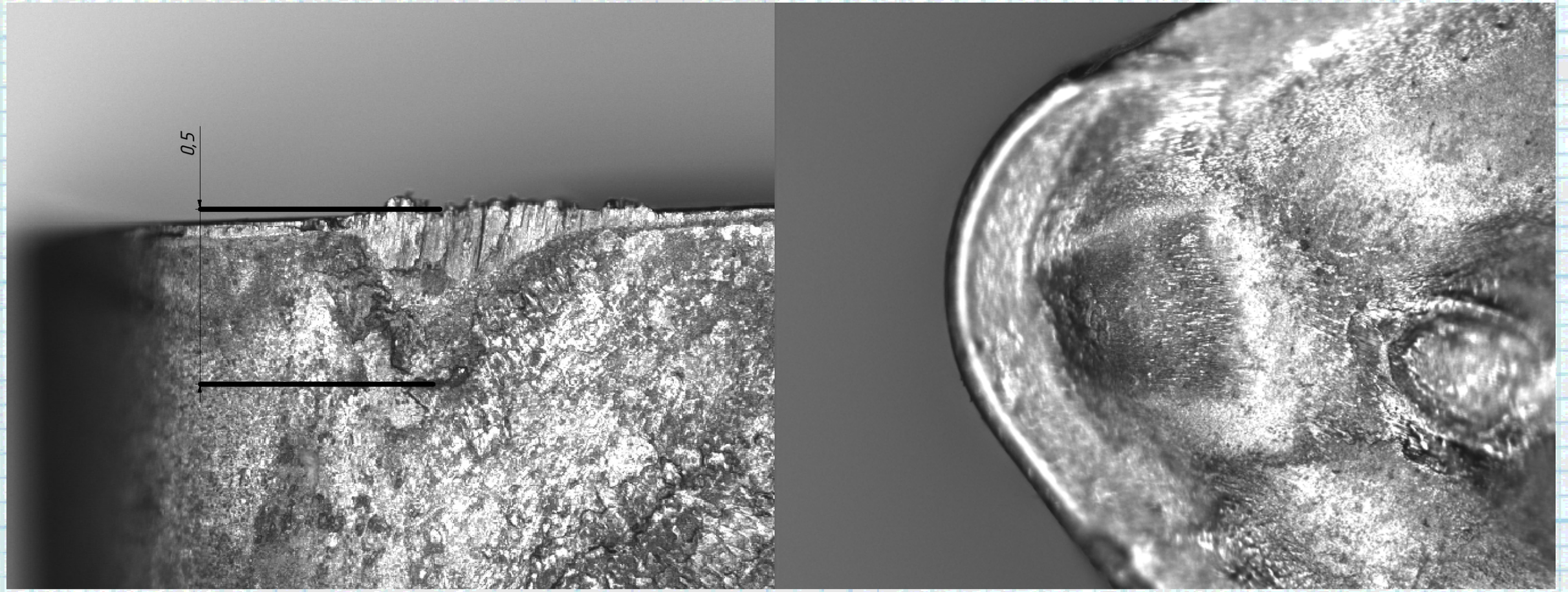
Станок 16К20, НОЦ «Центр модернизации машиностроения»,
n=1000 об/мин, s=0.2 мм/об, t=1 мм, Сталь 45,
CNMG 12 04 08-MM



- Шероховатость поверхности возрастает по мере изнашивания токарной пластины

Исследование износа инструмента

Станок 16К20, НОЦ «Центр модернизации машиностроения», n=1000 об/мин, s=0.2 мм/об, t=1 мм, Сталь 45, CNMG 12 04 08-MM

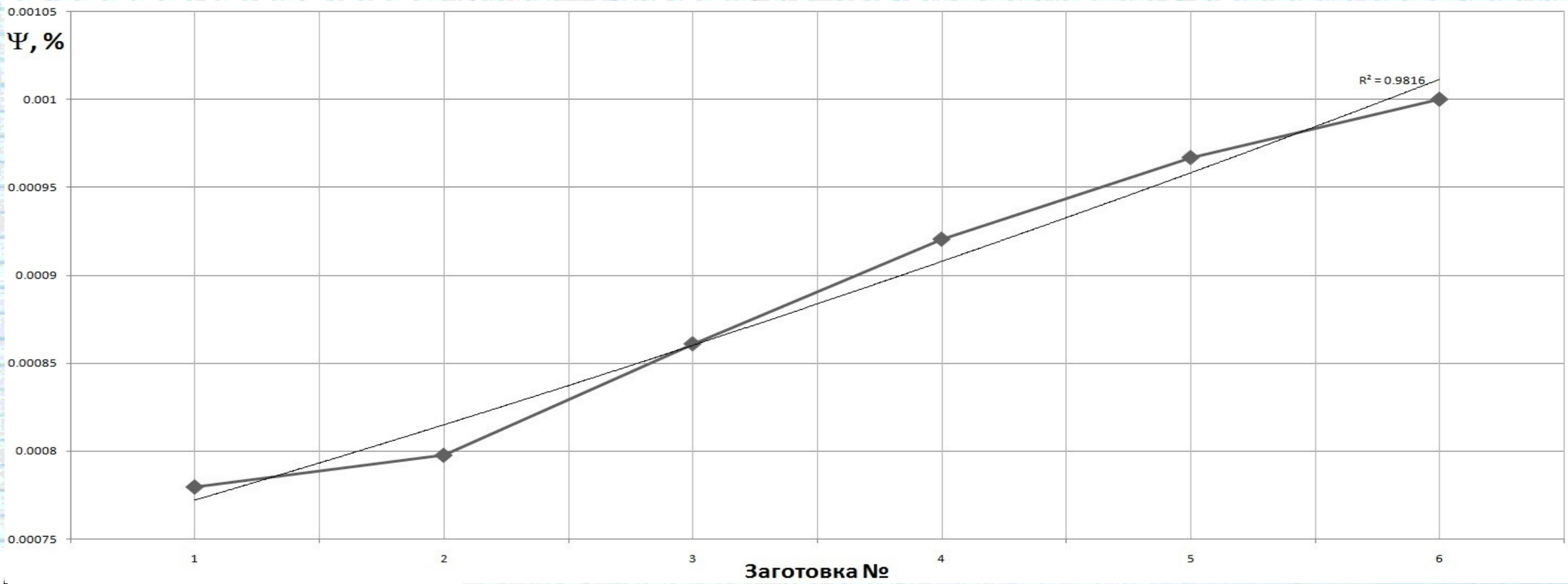


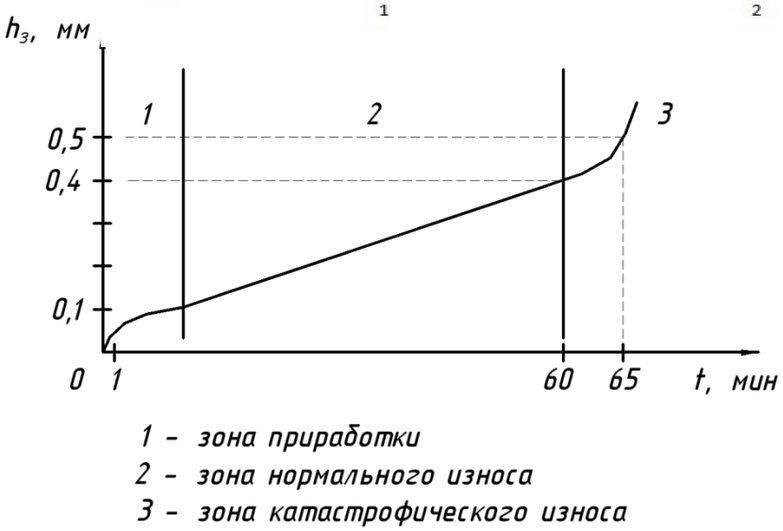
Износ по задней поверхности 500 мкм

- Проведены измерения геометрических параметров износа на прецизионной видеоизмерительной машине Mitutoyo Quick Vision Apex Pro

Результаты анализа фазохронометрической информации

Отношение оценки отношения мощности колебаний в полосе частот свыше 1000 Гц к оценке мощности по всей ширине спектра, %

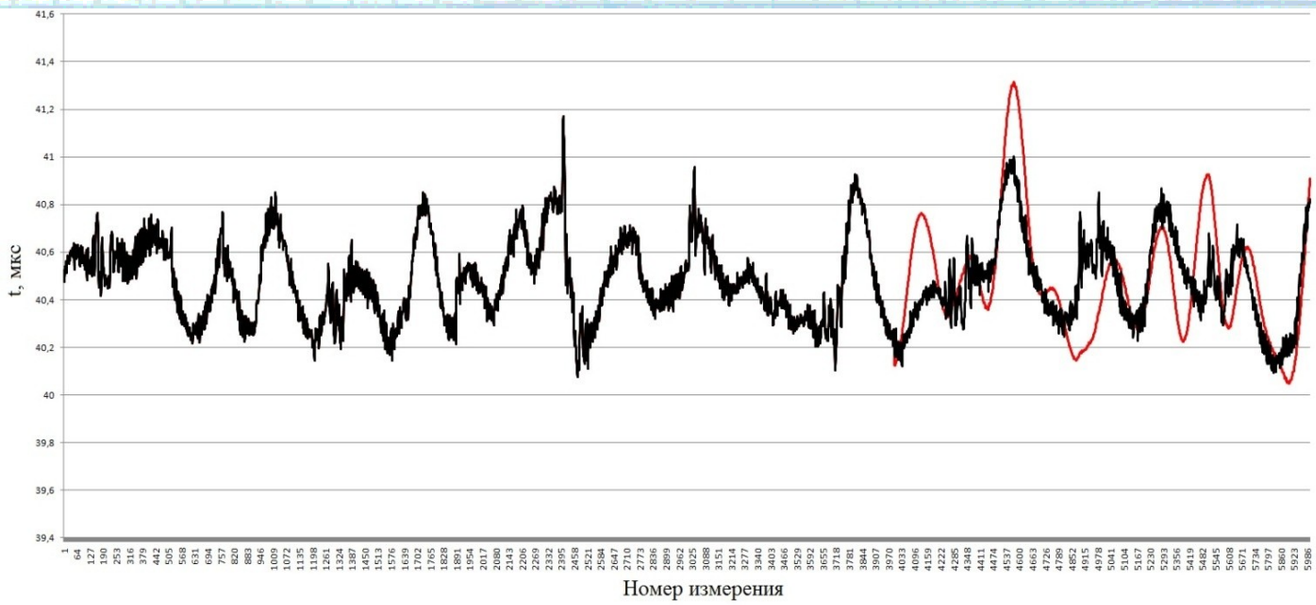




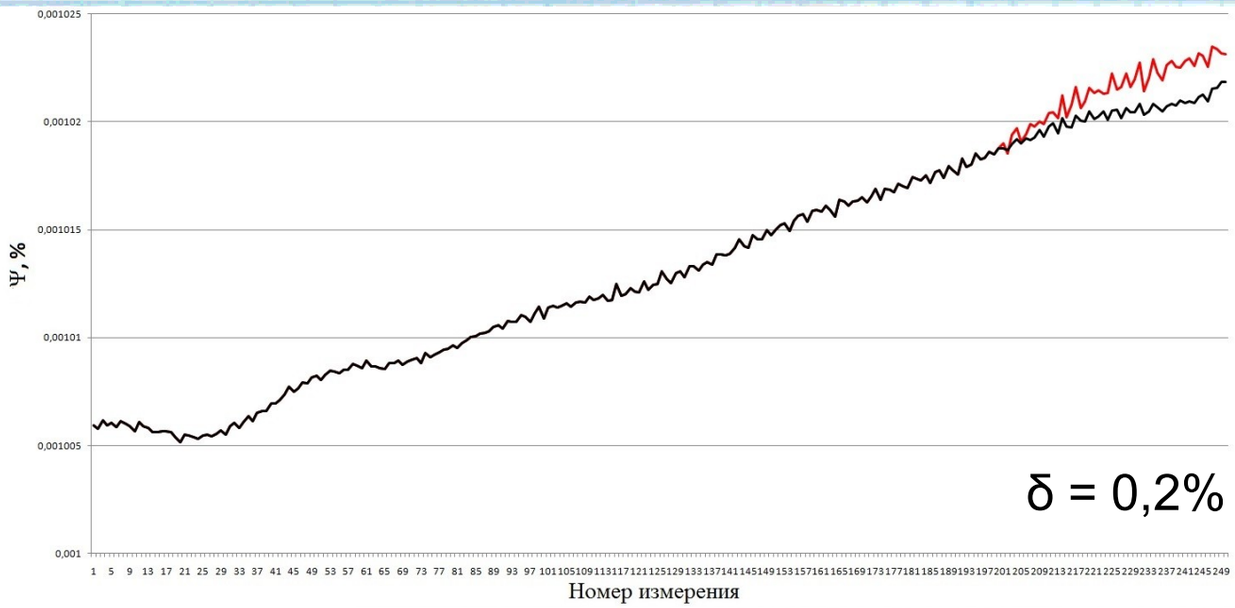
- Выявлена корреляция между изменением оценки мощности колебаний на хронограмме и классическим представлением развития износа режущего инструмента

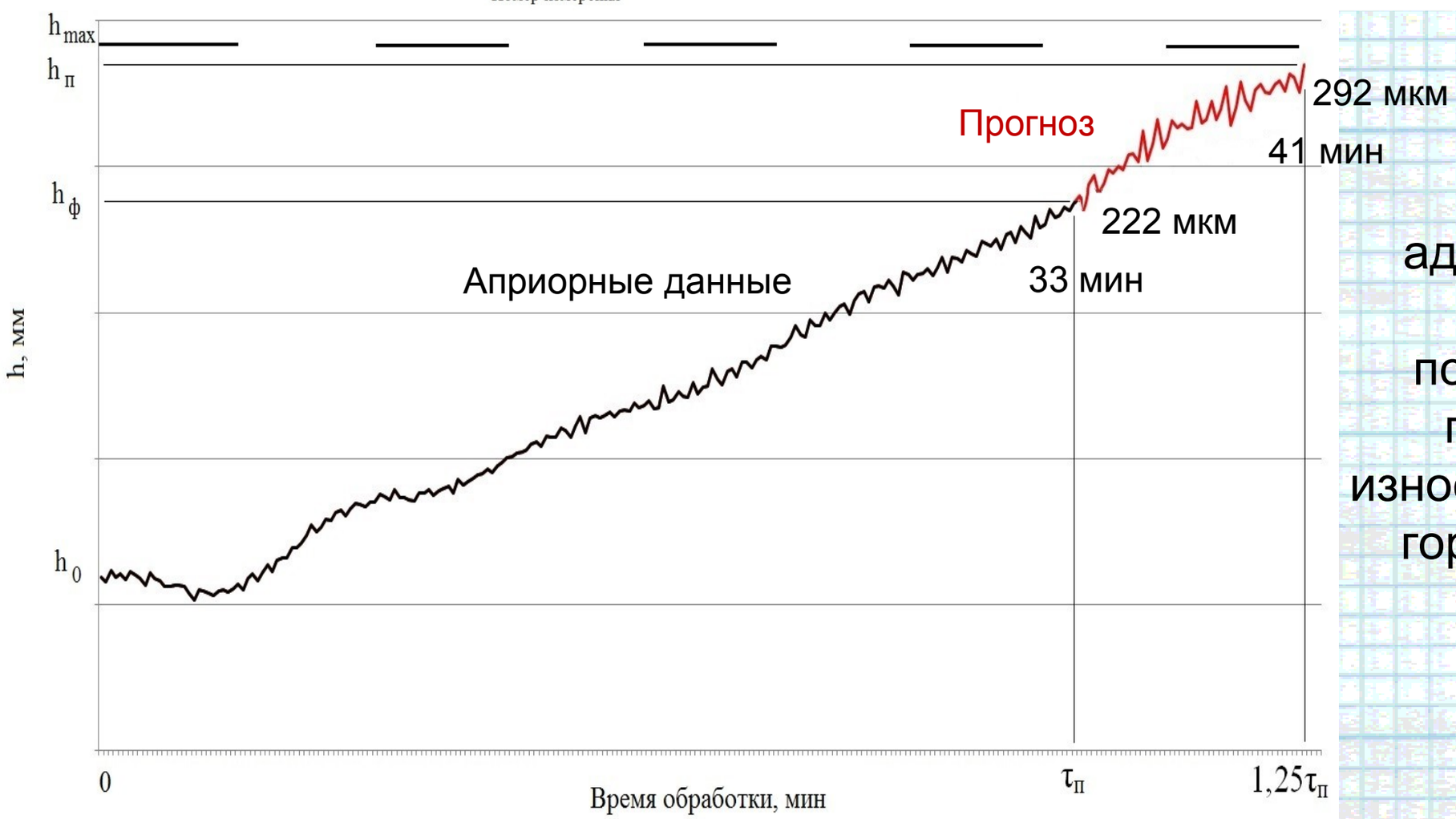
Прогнозирование износа режущего инструмента

Прогнозирование хронограммы вращения



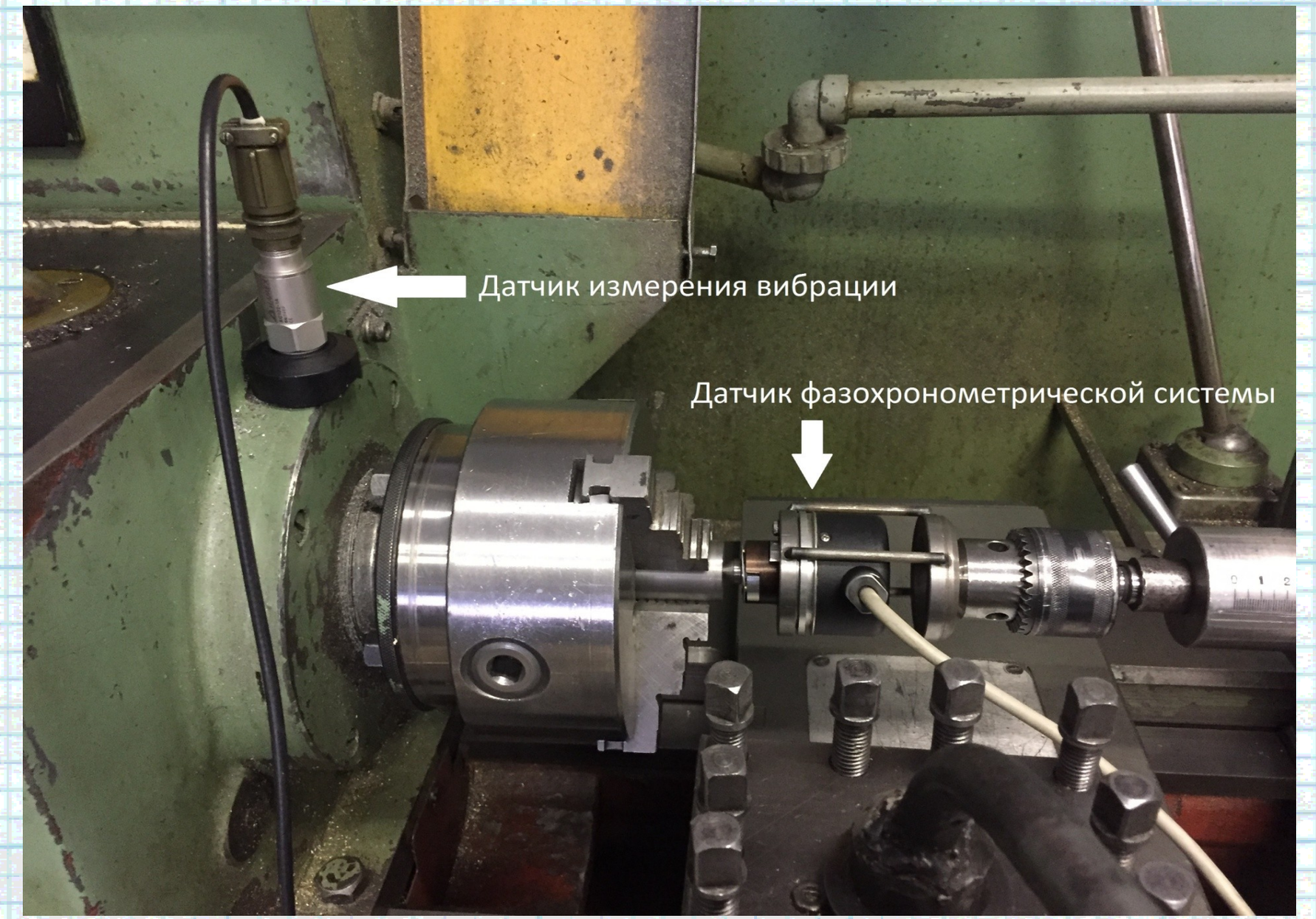
Прогнозирование параметра Ψ





Комбинирование подхода адаптивного регрессионного моделирования и псевдоградиентного метода позволило прогнозировать износ режущего инструмента с горизонтом прогноза до 25%

Совмещение двух методов диагностики



<u>Параметры эксперимента:</u>

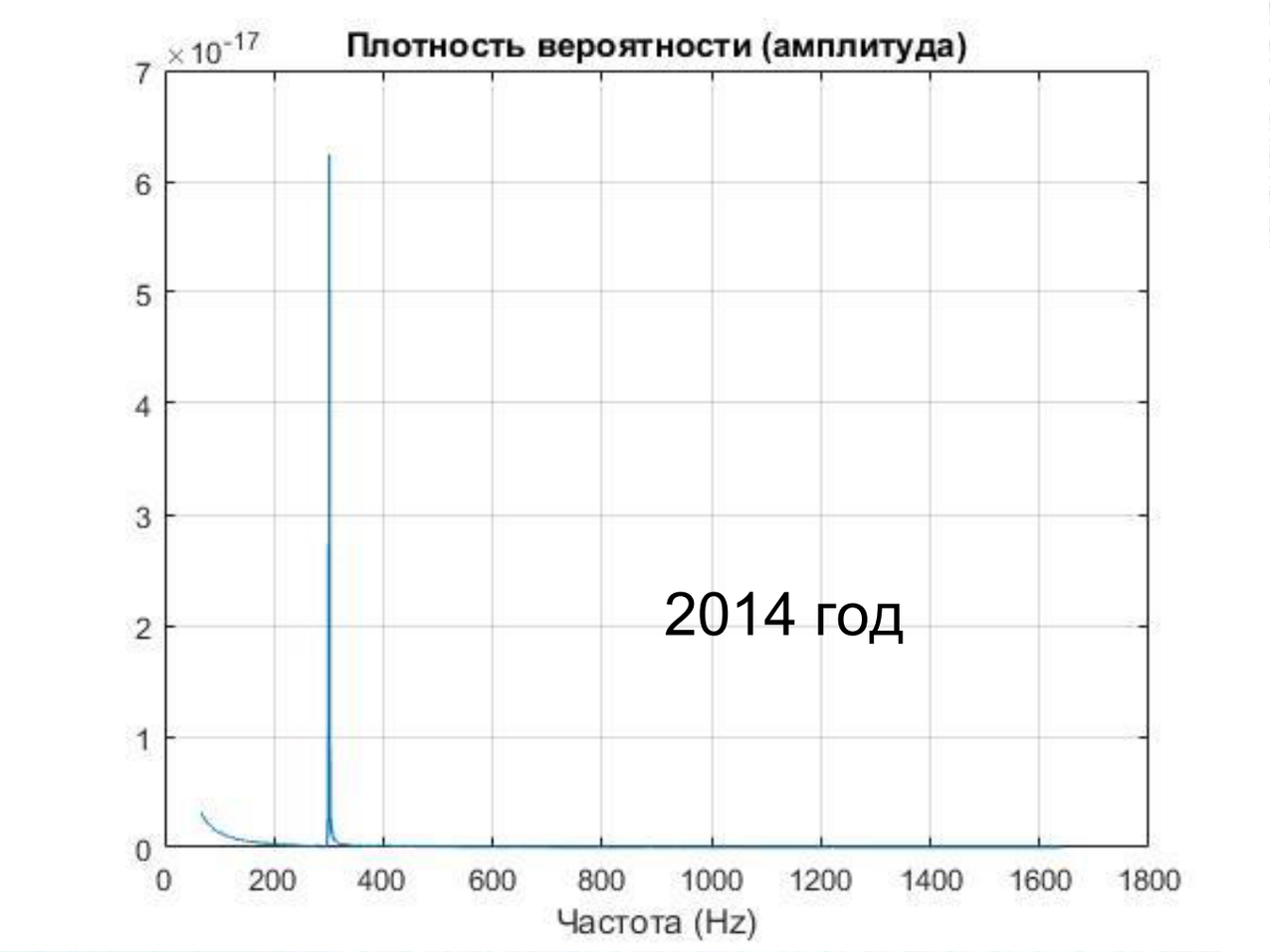
Станок УТ16П

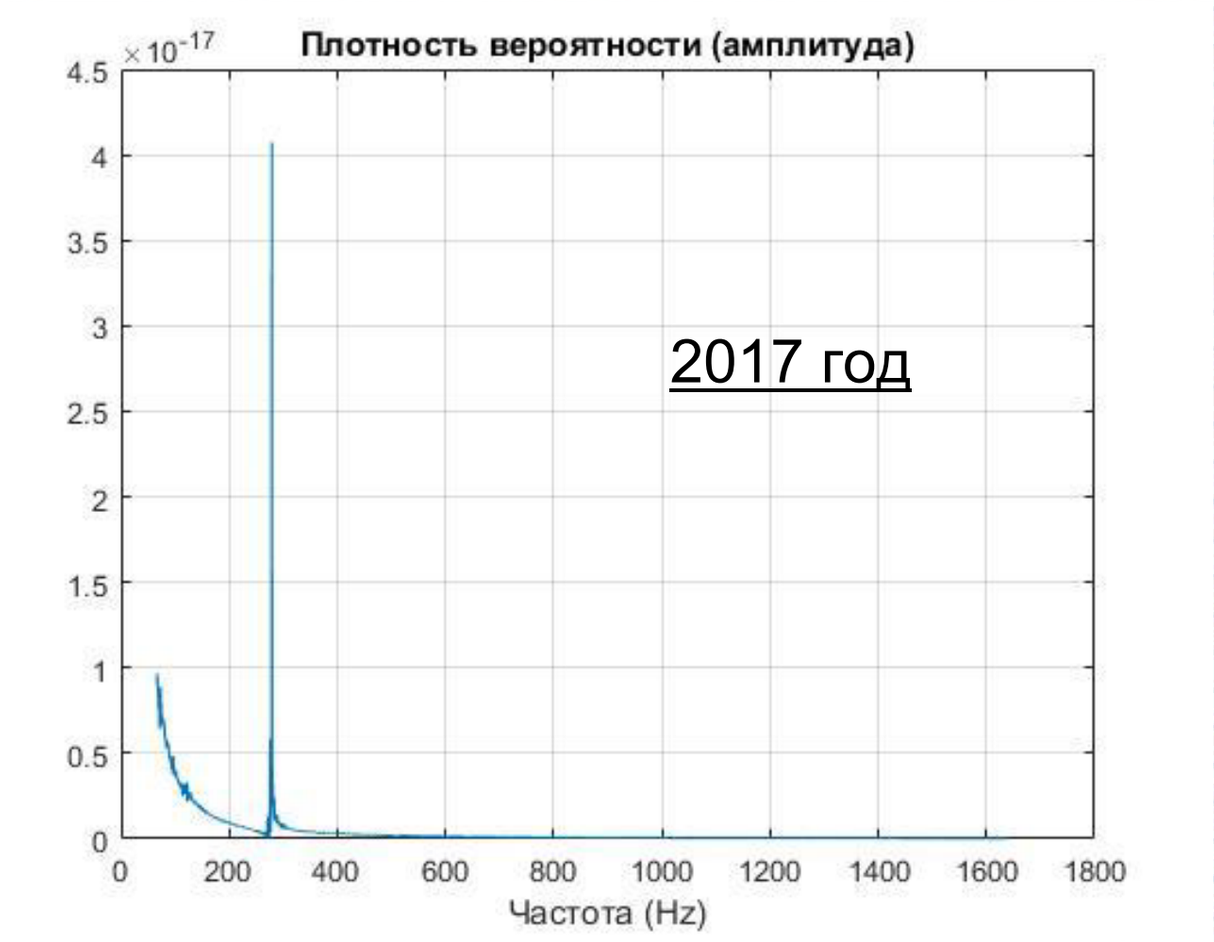
Холостой ход 315 об/мин

Комплекс измерения вибрации - Диамех Оникс

Фазохронометрический измерительный канал

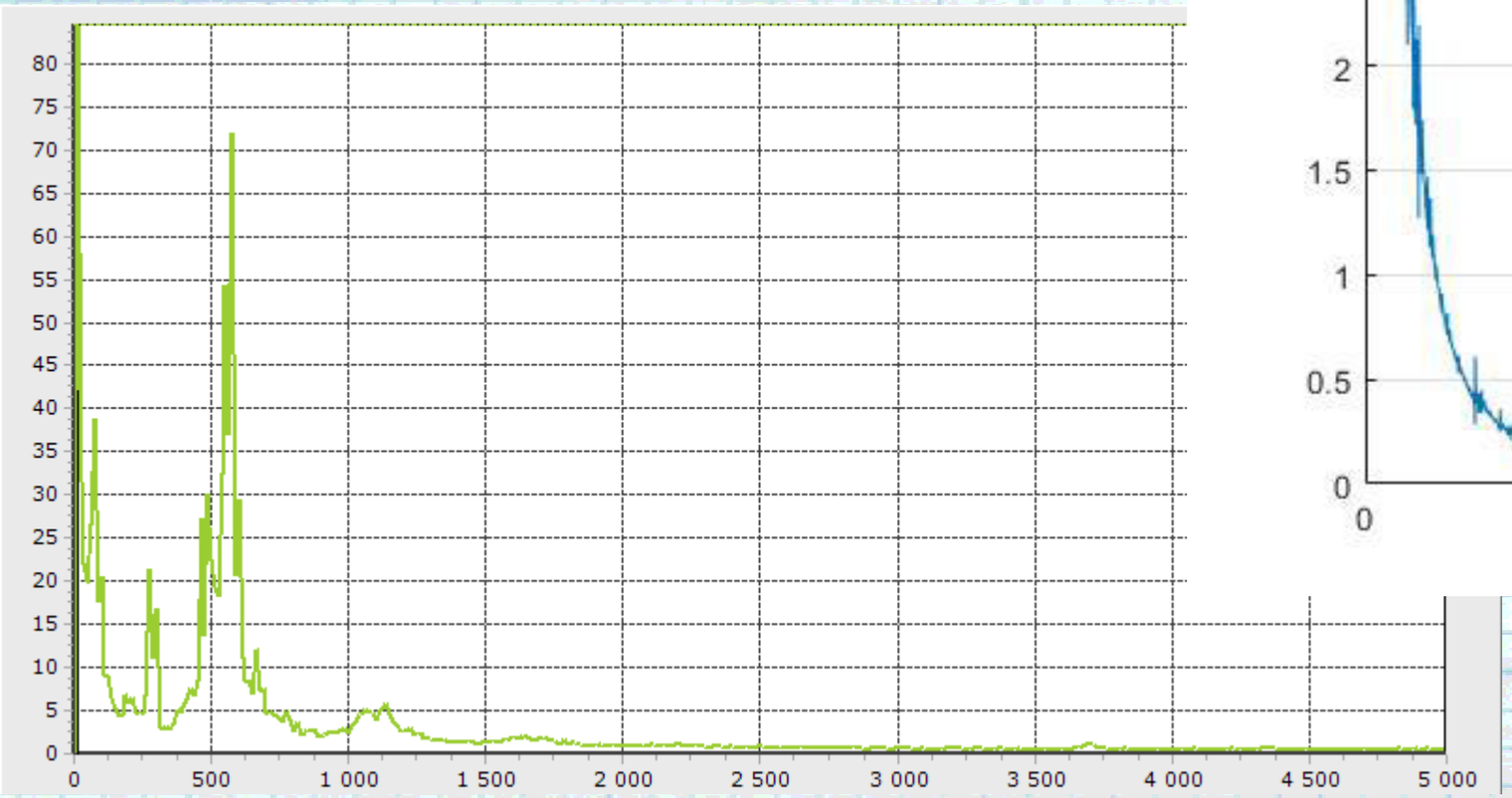
Сравнение ФХМ данных



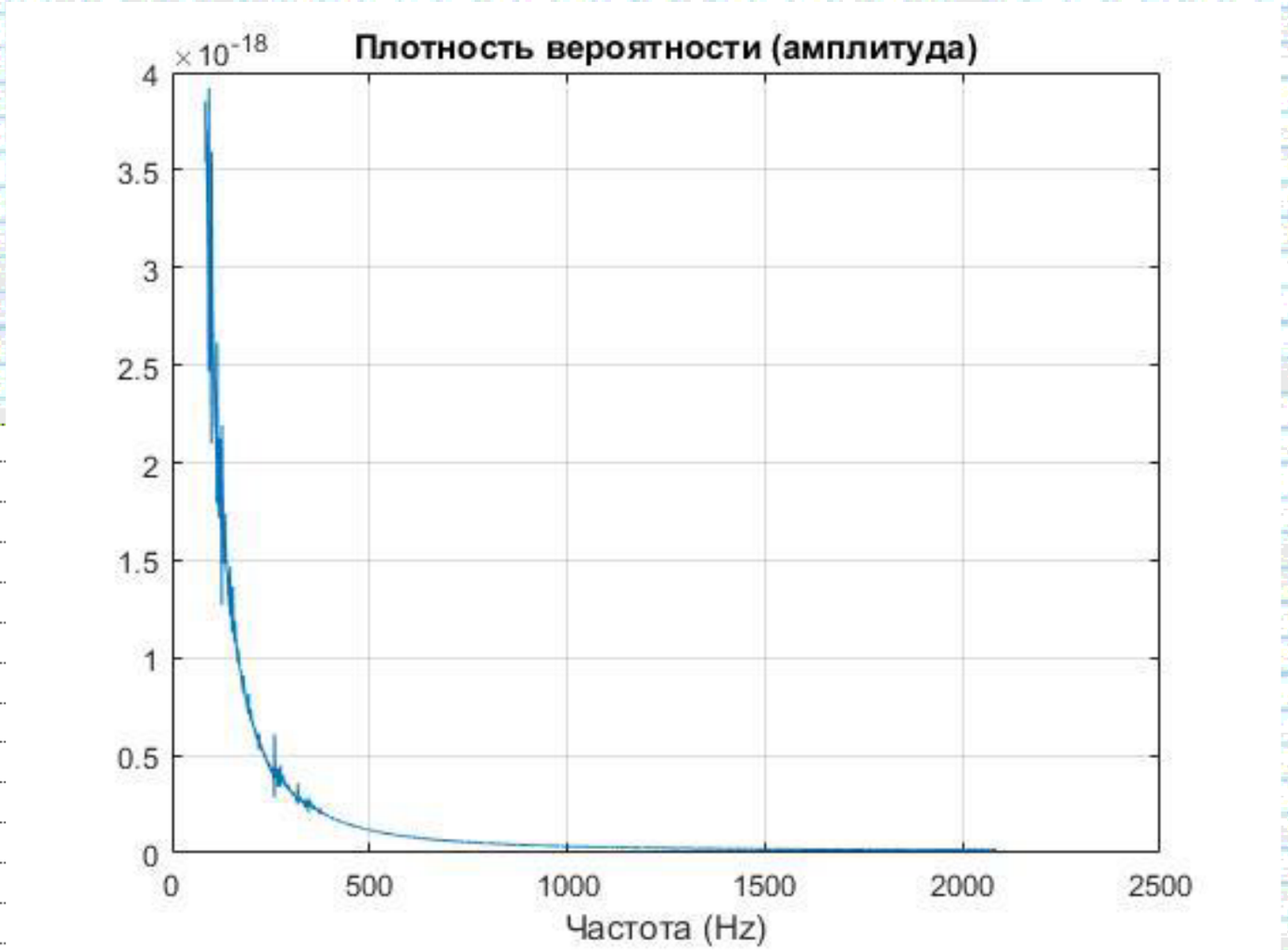


	Частоты пика	Амплитуда пика
2014 год	70	0,3
2017 год	70	0,9
2014 год	270	6,25
2017 год	270	4,175

Совмещение двух методов диагностики



Вибрационный спектр



ФХМ спектр

Совмещение двух методов диагностики

Частота пика ФХМ	Частота пика из виброспектра	Данные калькулятора частот
70 Гц	12,5 Гц	25 Гц
270 Гц	62,5 Гц	59 Гц
	275 Гц	72 Гц
	462,5 Гц	
	575 Гц	

Перекатывание тел качения по наружнему кольцу	Fo	=	59,062	Гц × ÷
Перекатывание тел качения по внутреннему кольцу	Fi	=	72,188	Гц × ÷
Вращение тел качения	Fw	=	25,988	Гц × ÷
Вращение сепаратора	Fq	=	2,362	Гц × ÷
Изменение формы наружнего кольца	Fo*	=	59,062	Гц × ÷
Изменение формы внутреннего кольца	Fi*	=	72,188	Гц × ÷
Изменение формы тел качения	Fw*	=	10,395	Гц × ÷

Результаты математического моделирования собственных частот подшипника передней опоры № **3182114**

Совмещение двух методов диагностики

По итогам первичной обработки экспериментальных данных были сделаны следующие выводы:

- отмечена стабильность частот ФХМ спектра во времени для отдельно взятой машины с изменением амплитуд пиков;
- отмечена принципиальная возможность совмещения подобных методов диагностики;
- результаты экспериментальных исследований коррелируют с расчетами, проведенными для определения собственных частот колебаний шпиндельного подшипника;
- для сопоставления экспериментальных данных необходима теоретическая методическая проработка принципов сопоставления данных двух методов (в том числе за счет разработки математических моделей).