

УДК 621.9.045:62-182.2(621.831.2)
DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-5-17

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ И ВРЕМЯ-ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ СТАНКОВ

А. Н. ПАРФИЕВИЧ, В. А. СОКОЛ

*Учреждение образования «Брестский государственный
технический университет», Республика Беларусь*

Представлены результаты комплексной диагностики технического состояния зубчатых приводов токарных станков моделей SN 401/501 и 2K52-1. Использование разработанного аппаратно-программного комплекса позволило провести детальный анализ виброакустических и угловых колебаний. Показано, что спектры сигналов содержат множество составляющих, затрудняющих выявление гармоник от интересующих элементов. Продемонстрированы преимущества метода анализа угловых колебаний, обладающего высокой помехозащищенностью. Впервые для данных объектов применены методы синхронного накопления и время-частотного анализа, позволившие точно локализовать источники колебательной активности, идентифицировать характерные частотные составляющие (оборотные, зубцовые, комбинированные) и выявить резонансные зоны. Результаты повышают достоверность диагностики и создают предпосылки для их применения в системах технического диагностирования и мониторинга станков.

Ключевые слова: зубчатый привод, диагностика, угловые колебания, синхронное накопление, время-частотный анализ, техническое состояние.

Для цитирования. Парфиевич, А. Н. Использование угловых колебаний и время-частотного анализа для комплексной диагностики зубчатых приводов станков / А. Н. Парфиевич, В. А. Сокол // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 5–17. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-5-17

USE OF ANGULAR VIBRATIONS AND TIME-FREQUENCY ANALYSIS FOR COMPLEX DIAGNOSTICS OF MACHINE TOOL GEAR DRIVES

A. N. PARFIEVICH, V. A. SOKOL

Brest State Technical University, the Republic of Belarus

The results of complex diagnostics of technical condition of gear drives of lathes of models SN 401/501 and 2K52-1 are presented. The use of the developed hardware and software complex allowed to conduct a detailed analysis of vibroacoustic and angular oscillations. It is shown that the signal spectra contain many components which make it difficult to detect harmonics of the elements of interest. There demonstrated the advantages of the method of analyzing angular oscillations, which has high noise immunity. For the first time, the methods of synchronous accumulation and time-frequency analysis are applied to these objects, which made it possible to accurately localize sources of oscillatory activity, identify characteristic frequency components (reversible, toothed, combined) and identify resonant zones. The results increase the reliability of diagnostics and create prerequisites for their application in technical diagnostics and machine monitoring systems.

Keywords: gear drive, diagnostics, angular oscillations, synchronous accumulation, time-frequency analysis, technical condition.

For citation. Parfievich A. N., Sokol V. A. Use of angular vibrations and time-frequency analysis for complex diagnostics of machine tool gear drives. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 5–17 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-5-17

Введение

Зубчатые приводы являются ключевыми элементами кинематических цепей металлорежущих станков, напрямую влияя на точность обработки и надежность оборудования [1]. Обеспечение их безотказной работы в условиях повышенных нагрузок и длительной эксплуатации требует эффективных систем технической диагностики для предупреждения отказов и простоев. Одним из перспективных и интенсивно развивающихся направлений неразрушающего контроля является виброакустическая диагностика, позволяющая оценивать техническое состояние механизмов по анализу возникающих при их работе колебаний и шума [2–4]. Анализ литературных источников показывает, что сигналы от зубчатых передач содержат характерные составляющие – оборотные частоты, частоты пересопряжения зубьев и их комбинации, которые служат информативными признаками для выявления дефектов [5, 6]. Однако в сложных многовальных приводах спектры сигналов перегружены множеством составляющих от различных элементов, что затрудняет идентификацию источников колебаний и снижает достоверность диагностики.

В последние годы уделяется повышенное внимание методам анализа угловых колебаний, отличающихся высокой помехозащищенностью и возможностью точной локализации источников колебательной активности в кинематических цепях [6, 7]. Развитие методов время-частотного анализа и синхронного накопления сигналов открывает дополнительные возможности для исследования нестационарных процессов и выявления скрытых дефектов [8, 9].

Целью данной работы является повышение эффективности диагностики технического состояния сложных зубчатых приводов токарных станков путем комплексного анализа виброакустических и угловых колебаний с применением современных методов обработки сигналов. Работа направлена на развитие практических методик диагностики и связана с важным научно-техническим направлением обеспечения надежности и долговечности станочного оборудования.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили сложные механические системы – коробки скоростей привода главного движения токарных станков моделей СН 401/501 и 2К52-1. При работе этих приводов в движение приходят не только зубчатые передачи кинематической цепи, передающей вращение на выходной вал, но и другие элементы (приводы гитары сменных колес, реверса, тормозного механизма, паразитные шестерни), которые, не влияя напрямую на вращение шпинделя, формируют общий акустический сигнал. Это приводит к появлению большого количества дополнительных составляющих в спектре, затрудняющих анализ гармоник на интересующих частотах.

В качестве средства для проведения экспериментальных исследований использовался реализованный в Брестском государственном техническом университете аппаратно-программный комплекс (далее – АПК), позволяющий с высокой точностью снимать информацию о процессах, возникающих при эксплуатации многовальных зубчатых приводов [1]. Технические характеристики АПК позволяют эффективно проводить диагностику независимо от количества компонентов сигнала, влияющих на эффективность проводимой диагностики/мониторинга [2].

Анализ литературных источников [2–6] показывает, что в структуре колебательного сигнала, фиксируемого с зубчатого привода, можно выделить характерные компоненты, обусловленные спецификой работы зубчатых передач:

– низкочастотные составляющие, кратные частоте вращения элементов привода $f_{об}$;

– высокочастотные составляющие с частотами пересопряжения зубьев всех зубчатых пар f_z , а также кратные им частоты;

– составляющие колебаний с комбинированными частотами $lf_z \pm nf_{об}$, возникающими вследствие различного рода модуляций сигнала ($l, n = 0,5; 1; 1,5; 2$ и т. д.);

– составляющие колебаний, генерируемые подшипниками качения (частота перекатывания тел качения по внешней обойме $F_H = f_o(N_{тк}/2 - 1,2)$; частота перекатывания тел качения по внутренней обойме $F_B = f_o(N_{тк}/2 + 1,2)$; частота сепаратора $F_c = f_o(1 - 1,2/N_{тк})$; модулированные составляющие, проявляющиеся на комбинированных частотах $kF_B \pm lf_o$ и $kF_H \pm lf_o$, где $N_{тк}$ – количество тел качения в одном ряду подшипника; f_o – оборотная частота вращения ротора; $D_{тк}$ – диаметр тела качения; D_c – средний диаметр сепаратора) [8].

Использование методов оценки угловых колебаний, по сравнению с традиционными методами анализа вибраций и шума, имеет ряд преимуществ [5, 6]:

– возможность оценки механизмов на низких частотах вращения, когда энергия вибраций невелика;

– высокая помехозащищенность, так как внешние возмущения не влияют на вращательное движение элементов кинематической цепи;

– возможность диагностики сложной кинематической цепи с использованием одного датчика угла поворота.

Результаты экспериментальных исследований

Анализ угловых колебаний

Спектр угловых колебаний выходного вала коробки передач станка СН 401/501 (передача 14, 630 мин⁻¹ на шпинделе, 758,62 мин⁻¹ на входном валу) представлен на рис. 1. Благодаря высокой точности определения частот вращения входного и выходного валов программной системой АПК, был произведен уточненный расчет всех составляющих со всех валов привода.

Анализ спектра показал наличие составляющих колебаний практически всех элементов привода:

1. На низких частотах отмечены оборотные и кратные составляющие всех валов кинематической цепи (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Оборотные частоты валов привода станка СН 401/501 (передача 14)

Вал привода	Частота вращения, мин ⁻¹	1-я оборотная частота	2-я оборотная частота
Вал 1	758,62	12,64	25,29
Вал 2	864,474	14,41	28,82
Вал 3	1260,691	21,01	42,02
Вал 4	1002,088	16,70	33,40
Вал 5	668,0586	11,13	22,27
Вал 6	668,0586	11,13	22,27

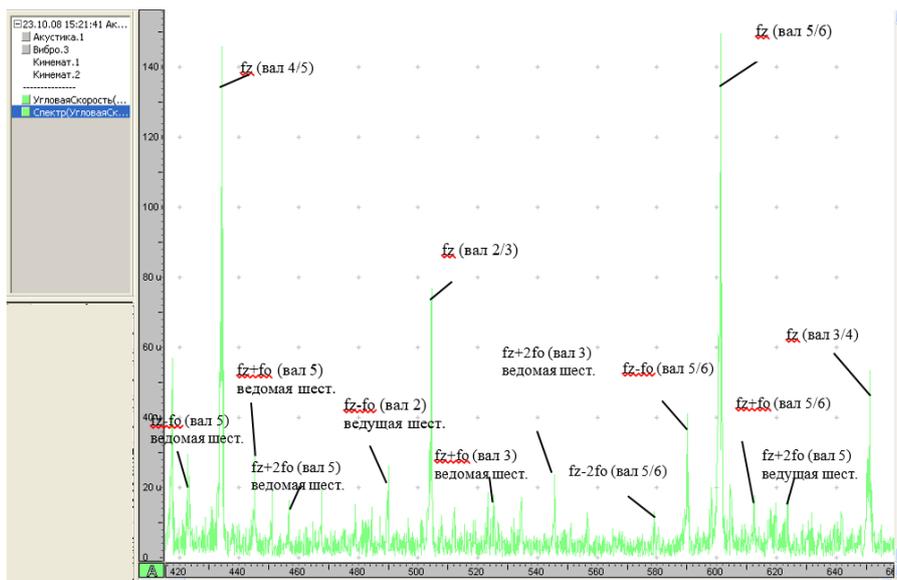


Рис. 2. Фрагмент спектра угловых колебаний выходного вала станка SN 401/501 (передача 14) – область первой зубцовой частоты

На рис. 3 представлен спектр угловых колебаний выходного вала станка 2K52-1 (передача 1, 50 мин^{-1}). Колебания имеют выраженный вынужденный характер, гармоники на спектре имеют частоты, в основном обусловленные пересопряжением зубьев. Так, на спектре четко выражены кратные: вторая $2 \cdot f_z = 62 \text{ Гц}$, третья $3 \cdot f_z = 99 \text{ Гц}$, пятая $5 \cdot f_z = 165 \text{ Гц}$, седьмая $7 \cdot f_z = 232 \text{ Гц}$ и десятая гармоники $10 f_z = 335 \text{ Гц}$ зубцовой частоты $f_z = 33 \text{ Гц}$ зубчатой пары выходного вала $Z45/Z21 = 32/40$. Также на спектре выделяется зубцовая гармоника $1 \cdot f_z = 70 \text{ Гц}$ и кратная вторая гармоника зубчатой пары $Z43/Z42 = 18/67$ на частоте $2 \cdot f_z = 141 \text{ Гц}$.

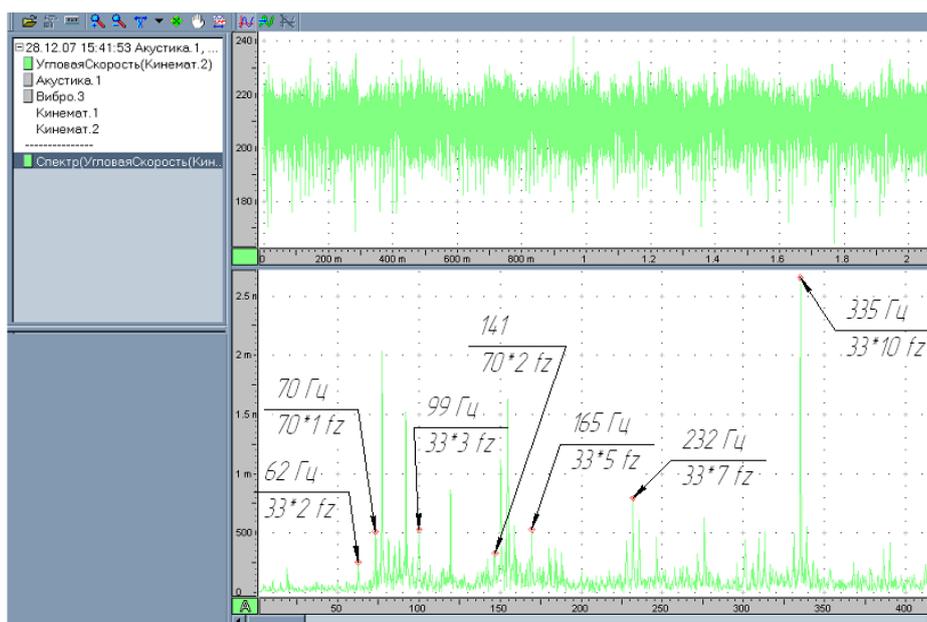


Рис. 3. Спектр угловых скоростей выходного вала станка 2K52-1 (передача 1)

Колебания на отмеченных частотах характеризуют работу перечисленных выше зубчатых пар. При анализе спектра обнаружены также гармоники и субгармоники, генерируемые не только зубчатыми передачами, но и другими элементами привода, такими как муфты, подшипники и др.

Анализ акустических сигналов

Спектр шума подвергается аналогичной процедуре идентификации. Например, на аналогичных режимах привода станка СН 401/501 в структуре сигнала выявляются практически те же частотные составляющие. Так, в спектре сигнала четко выявляются низкочастотные составляющие на частотах вращения валов привода и кратных им (рис. 4), зубцовые и кратные частоты, а также набор комбинационных частот.

Поскольку путь прохождения акустического сигнала неодинаков, вклад отдельных зубчатых пар в общий сигнал может значительно отличаться. Так, наибольшую амплитуду, в отличие от спектра угловых скоростей, будет иметь зубцовая составляющая от зацепления пар шестерен при передаче вращения со второго на третий вал на частоте 504 Гц.

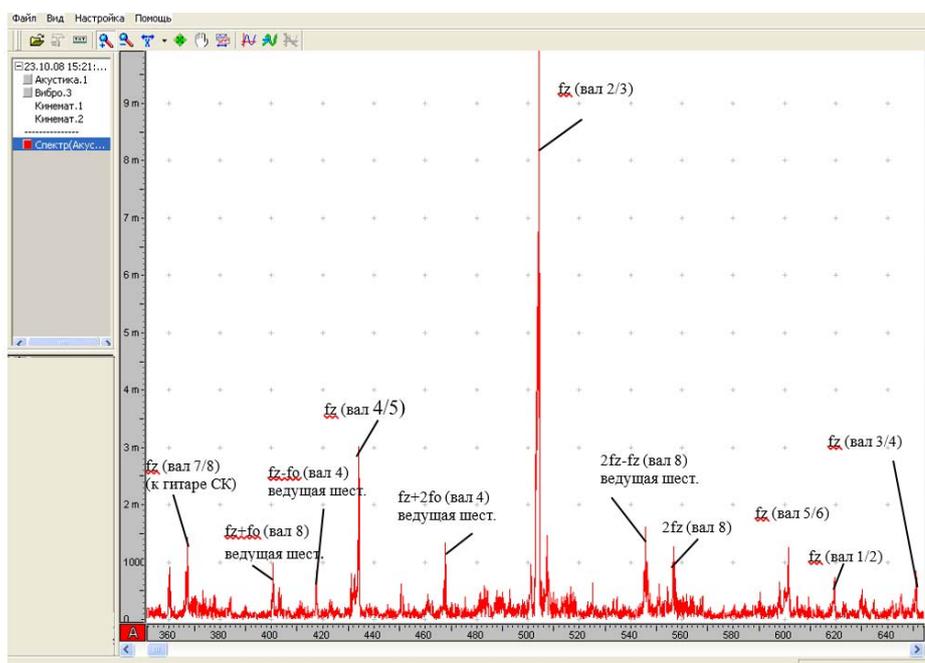


Рис. 4. Фрагмент спектра акустического шума станка СН 401/501 (передача 14) – область первой зубцовой частоты

Подобный анализ проведен и для результатов измерений на станке 2К52-1. На рис. 5 приведен узкополосный спектр акустических колебаний на 4-й передаче станка 2К52-1 (200 мин^{-1}). На нем ярко выражена составляющая на первой зубцовой $1 \cdot f_z = 280 \text{ Гц}$ и кратной ей третьей зубцовой частоте $3 \cdot f_z = 840 \text{ Гц}$ зубчатой пары $Z43/Z42 = 18/67$. Также может быть идентифицирована в спектре шума составляющая от зубчатой пары $Z12/Z5 = 42/32$ на зубцовой частоте $1 \cdot f_z = 498 \text{ Гц}$.

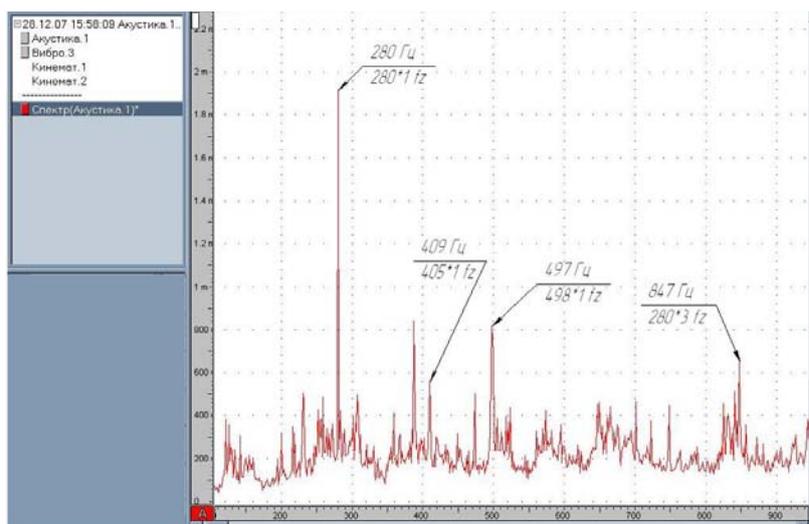


Рис. 5. Спектр шума станка 2K52-1 (передача 4)

Анализ вибрационных сигналов

Аналогичные выводы можно сделать относительно вибрационного сигнала, обработанного с использованием программной системы макетного образца. Его использование может как подтвердить сделанные выводы относительно источников колебательной активности, так и обнаружить новые, благодаря возможности перехода от виброускорений к более чувствительным в области низких частот виброскоростям и виброперемещениям [9].

Так, из спектра виброускорений (рис. 6) наиболее ярко могут быть выявлены комбинационные частоты от зацепления шестерен 4-го и 5-го валов привода, которые в спектрах других сигналов не столь явно выражены либо отсутствуют. Они могут быть следствием отклонения профиля зуба от теоретического [7].

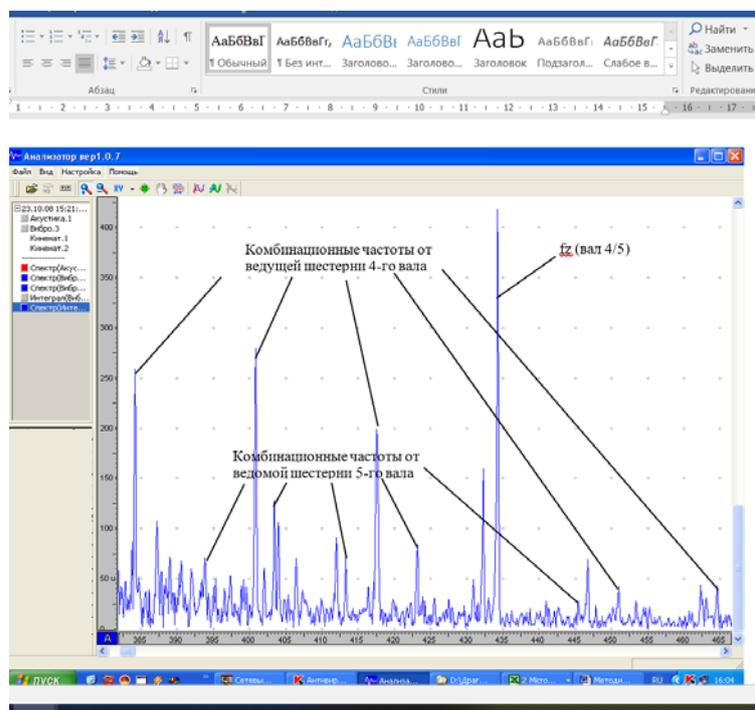


Рис. 6. Зубцовая и комбинационные составляющие в спектре виброускорений станка СН 401/501 (передача 14) с использованием БПФ с окном Блэкума

На рис. 7 приведен узкополосный спектр виброускорений на 6-й передаче (500 мин^{-1}) станка 2К52-1.

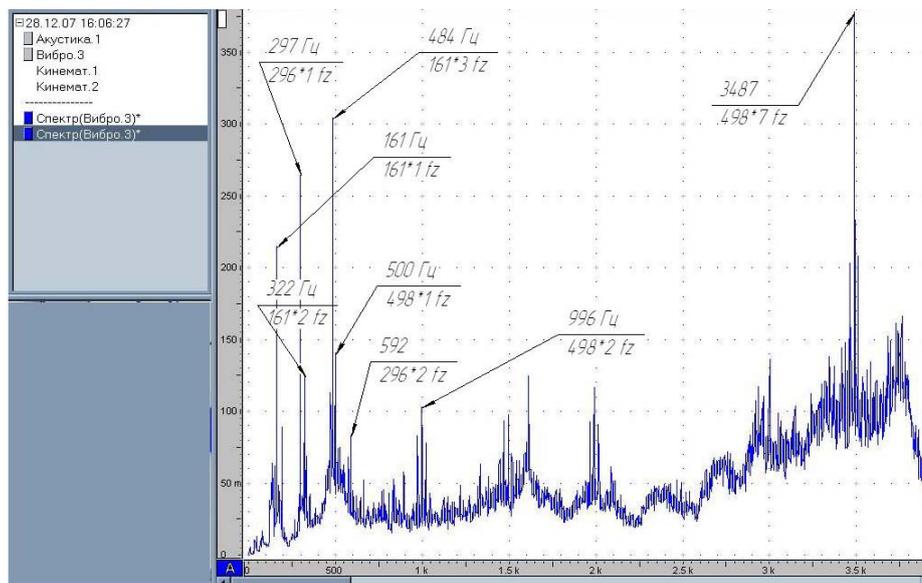


Рис. 7. Спектр виброускорений станка 2К52-1 (передача 6)

На спектре могут быть идентифицированы первая зубцовая частота $1 \cdot f_z = 161 \text{ Гц}$ зубчатой пары $Z2/Z1 = 26/26$ и кратные ей вторая $2 \cdot f_z = 322 \text{ Гц}$ и третья $3 \cdot f_z = 483 \text{ Гц}$ частоты; первая зубцовая частота $1 \cdot f_z = 296 \text{ Гц}$ и кратная ей вторая $2 \cdot f_z = 592 \text{ Гц}$ зубчатой пары $Z11/Z6 = 25/48$; первая зубцовая частота $1 \cdot f_z = 498 \text{ Гц}$ зубчатой пары $Z13/Z12 = 20/42$ и кратные ей вторая $2 \cdot f_z = 996 \text{ Гц}$ и седьмая $7 \cdot f_z = 3486 \text{ Гц}$ частоты. Гармонические составляющие виброускорений на указанных частотах характеризуют работу перечисленных выше зубчатых пар, изменение их амплитуд в процессе работы будет свидетельствовать об ухудшении технического состояния зубчатых передач.

Применение функции синхронного накопления

Использование функции синхронизации измерений угловых перемещений входного и выходного валов привода с параметрами шума, вибраций и деформаций позволяет реализовать алгоритм синхронного накопления и осуществлять выделение из отмеченных сигналов составляющих, формируемых элементами каждого вала привода, что значительно упрощает процедуру поиска источников повышенной виброакустической активности. Примеры применения данной функциональной возможности проиллюстрированы на рис. 8–10, на которых приведены результаты разложения общего сигнала вибрации при работе некоторых валов коробки скоростей на 6-й передаче.

Так, на спектре входного вала (рис. 8) хорошо видны зубцовая гармоника шестерни $Z = 20$, расположенная на рассматриваемом валу, и кратные ей вторая $Z = 2 \times 20$, третья $Z = 3 \times 20$, четвертая $Z = 4 \times 20$ и седьмая $Z = 7 \times 20$ гармоники.

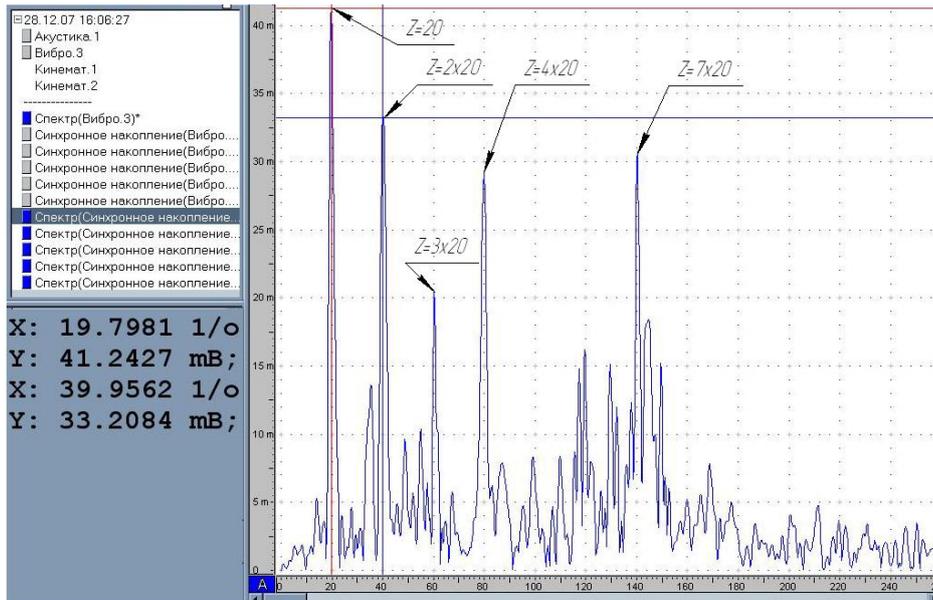


Рис. 8. Спектр виброускорений на 1-м (входном) валу станка 2K52-1 (передача 6)

На спектре 2-го вала (рис. 9) также можно выделить гармоники от расположенных на рассматриваемом валу шестерен. Так, хорошо видна зубцовая гармоника шестерни $Z = 25$ и кратные ей вторая $Z = 2 \times 25$ и пятая $Z = 5 \times 25$ гармоники. Также на указанном рисунке четко выражена зубцовая гармоника шестерни $Z = 42$ и кратные ей вторая $Z = 2 \times 42$, четвертая $Z = 4 \times 42$ и седьмая $Z = 7 \times 42$ гармоники.

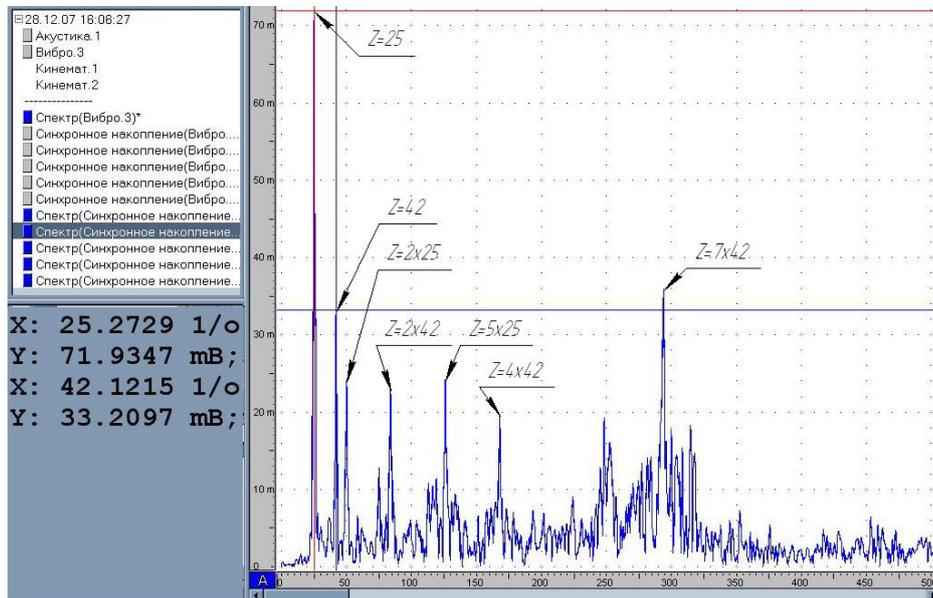


Рис. 9. Спектр виброускорений на 2-м валу станка 2K52-1 (передача 6)

При рассмотрении выходного 5-го вала (рис. 10) хорошо видна зубцовая гармоника $Z = 40$, характеризующая работу расположенной на данном валу шестерни с соответствующим числом зубьев, а также кратные ей вторая $Z = 2 \times 40$, третья $Z = 3 \times 40$, четвертая $Z = 4 \times 40$ и десятая $Z = 10 \times 40$ гармоники.

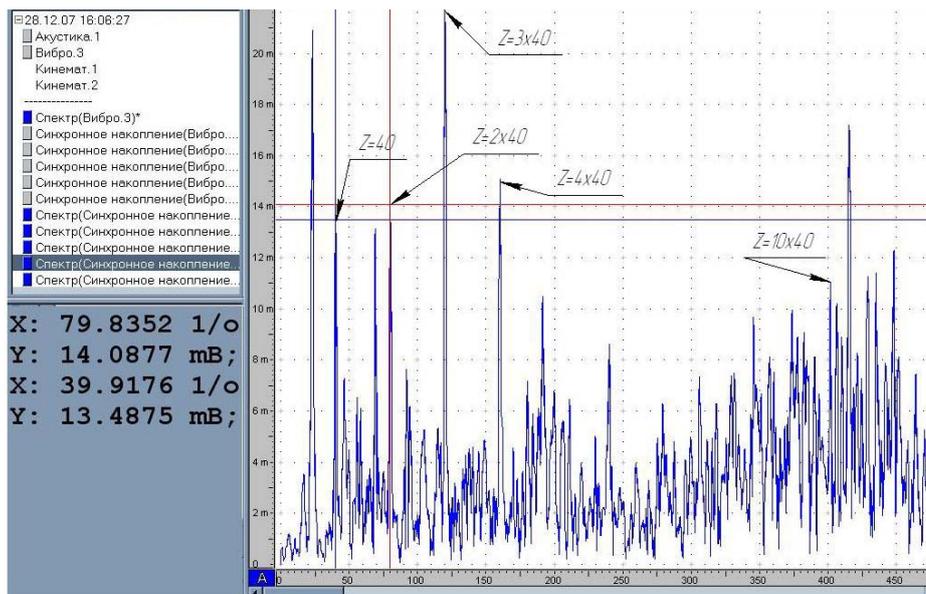


Рис. 10. Спектр виброускорений на 5-м (выходном) валу станка 2К52-1 (передача 6)

Становится очевидным, что функция синхронного накопления значительно облегчает возможность сопоставления гармоник с повышенными амплитудами с источниками их возникновения и, как следствие, диагностики привода.

Применение время-частотного анализа

Дополнительные возможности более качественной идентификации элементов привода раскрывает использование функций время-частотного представления колебательных процессов. На рис. 11 представлен фрагмент спектра и время-частотное представление сигнала виброускорений на корпусе коробки передач. Время-частотная характеристика, полученная посредством преобразования Габора, свидетельствует о нестационарности процесса, проявляющейся в виде колебаний частоты пересопряжения зубьев и амплитуды колебаний на этих частотах (рис. 12). Спектр виброускорений явно перегружен комбинированными частотами, что затрудняет анализ [10].

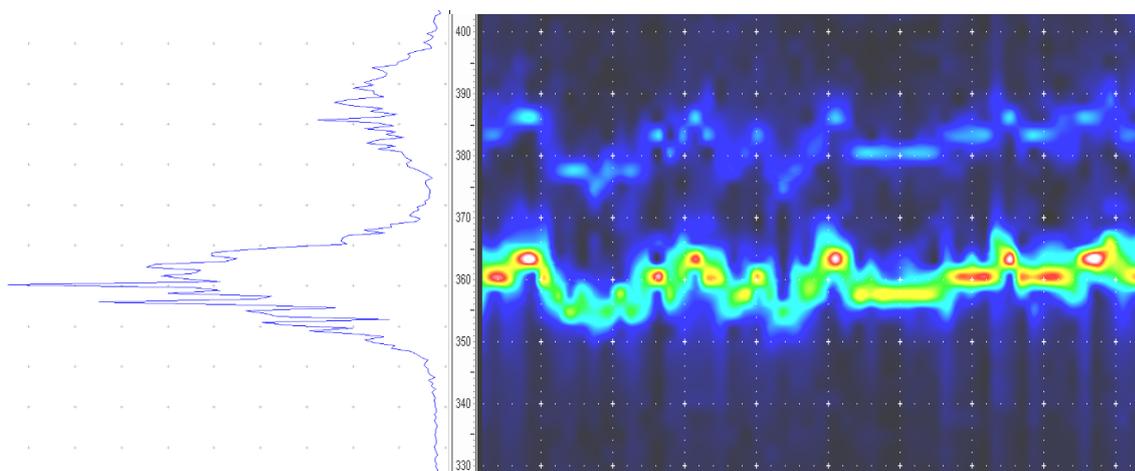


Рис. 11. Спектр виброускорений и время-частотное представление сигнала станка 2К52-1 (передача 4)

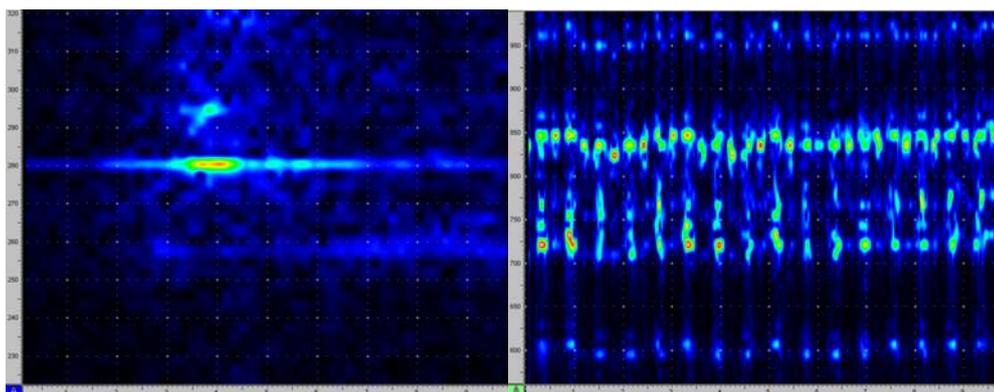


Рис. 12. Фрагменты время-частотного представления нестационарного сигнала виброускорений на корпусе КП

Данное представление колебательного сигнала, фиксирующее динамику изменения частотных составляющих, позволяет также установить диапазоны собственных частот колебаний привода, что даст возможность избежать резонансных явлений. Пример использования данной функции при разгоне входного вала коробки передач станка СН 401/501 приведен на рис. 13.

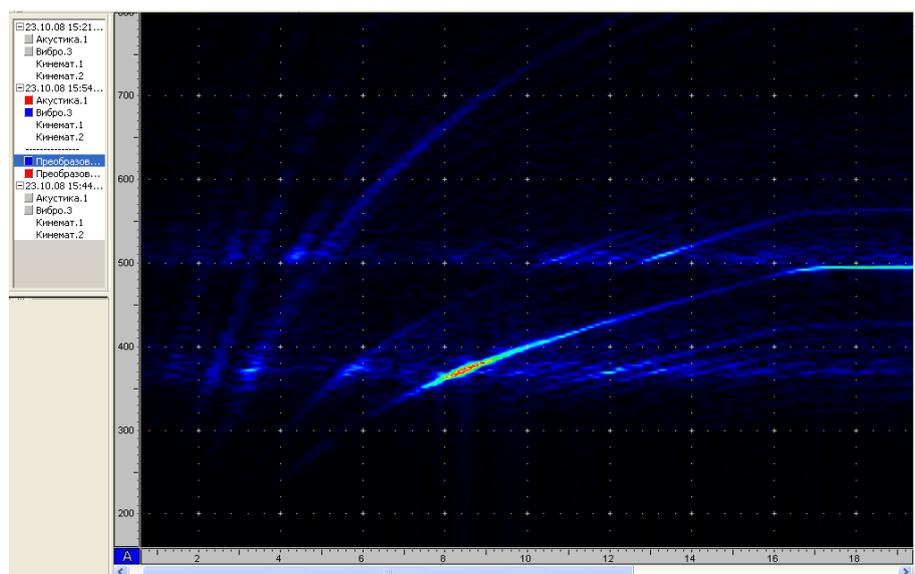


Рис. 13. Время-частотное представление вибрационного сигнала станка СН 401/501 (передача 14) при плавно изменяемой частоте вращения входного вала

Из спектрограммы следует, что при нахождении каждой составляющей в диапазоне 380 и 500 Гц происходит ярко выраженное увеличение амплитуд, что свидетельствует о резонансных явлениях в данных диапазонах.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность комплексного подхода к диагностике технического состояния зубчатых приводов токарных станков на основе анализа виброакустических и угловых колебаний. Использование разработанного АПК позволило впервые реализовать комплексную идентификацию частотных составляющих для станков СН 401/501 и 2К52-1, обеспечив точную регистрацию сигналов и их детальный спектральный анализ. Новизна результатов заключается

в демонстрации преимуществ анализа угловых колебаний и впервые примененных методов синхронного накопления и время-частотного анализа, которые позволили точно локализовать источники колебаний и выявить скрытые дефекты. Полученные результаты повышают достоверность диагностики и создают предпосылки для применения в системах технического диагностирования и мониторинга станков. Границы применимости определяются типом исследуемых многозвальных зубчатых приводов и необходимостью специализированного оборудования, однако сам подход применим для диагностики широкого класса зубчатых механизмов в различных отраслях машиностроения.

Литература

1. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А. В. Драган, И. П. Стецко, Д. А. Ромашко, Н. В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 17–26.
2. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – URL: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm> (дата обращения: 05.02.2023).
3. Берестнев, О. В. Создание микропроцессорного комплекса для диагностики технических систем: Оперативно-информационные материалы : в 2 ч. / О. В. Берестнев, И. В. Жук, А. С. Скороходов. – Минск : ИНДМАШ, 1996. – Ч. 2. – 64 с.
4. Русов, В. А. Спектральная вибродиагностика. Дефекты редукторов и мультипликаторов / В. А. Русов. – URL: <http://www.vibrocenter.ru/book7.htm> (дата обращения: 25.04.2023).
5. Jacob, A. Диагностирование зубчатой передачи с помощью нового метода контроля состояния роторного оборудования : пер. с англ. / A. Jacob, Y. I. Sharaf-Eldeen. – URL: <http://www.cnt-moscow.ru/ru/bible/vdpksp> (дата обращения: 14.05.2021).
6. Nguyen, Phong Dien. Beitrag zur Diagnostik der Verzahnungen in Getrieben mittels Zeit-Frequenz-Analyse / Phong Dien Nguyen. – Dissertation. – TU Chemnitz, 2002. – 174 с.
7. Harris, C. M. Shock and Vibration Handbook / C. M. Harris, A. G. Piersol. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 1376 p.
8. Randall, R. B. Vibration-based condition monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications / R. B. Randall. – Chichester : John Wiley & Sons, 2011. – 585 p.
9. Antoni, J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals / J. Antoni // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, iss. 2. – P. 282–307. – DOI 10.1016/j.ymsp.2004.09.001

References

1. Dragan A. V., Stetsko I. P., Romashko D. A., Levkovich N. V. New hardware and software for research and diagnostics of mechanical systems. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 4, pp. 17–26 (in Russian).
2. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration. URL: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm> (accessed 05.02.2023) (in Russian).
3. Berestnev O. V., Zhuk I. V., Skorokhodov A. S. *Creation of a microprocessor complex for diagnostics of technical systems*. Minsk, INDMASH, 1996. Part. 2, 64 p. (in Russian).
4. Rusov V. A. Spectral vibration diagnostics. Defects of gearboxes and multipliers. URL: <http://www.vibrocenter.ru/book7.htm> (accessed 25.04.2023) (in Russian).
5. Jacob A., Sharaf-Eldeen Y. I. Gear diagnosis with a new method for monitoring the condition of rotary equipment. URL: <http://www.cnt-moscow.ru/ru/bible/vdpksp> (accessed 14.05.2021) (in Russian).

6. Nguyen P. D. *Beitrag zur Diagnostik der Verzahnungen in Getrieben mittels Zeit-Frequenz-Analyse*. TU Chemnitz, 2002. 174 p.
7. Harris C. M., Piersol A. G. *Shock and Vibration Handbook*. New York, McGraw-Hill Publ., 2002. 1376 p.
8. Randall R. B. *Vibration-based condition monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Chichester: John Wiley & Sons Publ., 2011. 585 p.
9. Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, iss. 2, pp. 282–307. DOI 10.1016/j.ymssp.2004.09.001

Поступила 01.09.2025 г.