

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. В. СААКЯН

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ
 ДВИЖЕНИЯ УЗЛА ПОДАЧИ СТАНКА

Плавность движения узлов подачи станков наиболее полно рассмотрена в работах [1; 2], вскрывающих механизм возникновения неустойчивости перемещения и отклонений от равномерной скорости в зависимости от особенности конструкции, характеристик упругой системы и процесса трения.

Внимание к проблеме обусловлено значимостью неравномерности подачи в функционировании любого станка. Достаточно, например, иметь амплитуду $V_i = 0,1 \div 1$ мм/сек одной из переменных составляющих скорости на частоте $f_i = 1 \div 10$ Гц, чтобы при фрезеровании с подачей $S = 1$ мм/мин под углом α к направлению движения на детали возникла волна с амплитудой и шагом соответственно:

$$\frac{V_i \sin \alpha}{2\pi f_i} = 0,001 \div 0,1 \text{ мм}; \quad \frac{10^3 \cdot S}{60 f_i} = 1,5 \div 15 \text{ мм}.$$

Кроме того, станки одной модели имеют, как правило, существенный разброс показателей плавности перемещения от образца к образцу. Так, проведенные нами измерения суммарной виброскорости перемещения стола при $S = 1,5$ мм/мин семи вертикальных фрезерных станков с крестовым столом шириной 400 мм показали, что она различна в пределах $0,5 \div 1,7$ мм/сек. Это свидетельствует о технологических отклонениях в изготовлении и сборке узла, приводящих в дальнейшем к погрешностям обработки, износу деталей узла, потере геометрической точности станка, шуму, перегревам и т. д. Отсюда, виброскорость узла подачи может быть критерием его качества, и здесь возможен единый подход к нормированию, контролю и снижению виброскорости холостого хода различных узлов станка в целях стабилизации качества.

Адекватным аппаратом такой вибродиагностики дефектов является спектральный анализ. Спектральный подход достаточно широко применяется при анализе вибраций машины, возникающих в диапазоне частот от $10 \div 20$ Гц до $1 \div 10$ кГц, но его применение к сигналу скорости поступательно движущегося ползуна станка нам обнаружить не удалось, что, по-видимому, объясняется рядом особенностей и связанных с ними трудностей. Рассмотрим это подробнее.

Спектр виброскорости ползуна смещается в низкочастотную область: частоты вращения в паре «ходовой винт-гайка» исключаются

десятыми долями и единицами герц; частоты вращения шаров в подшипниках и пересоприжения зубьев в зубчатых парах последних приводных звеньев ползуна составляют единицы и десятки герц; частоты того же порядка наблюдаются и при релаксационных колебаниях ползунов [2]. Отсюда, диапазон 2—300 Гц, по крайней мере, необходим для охвата спектра большинства причин, порождающих неравномерность.

Спектроанализирующая аппаратура выпускается, как правило, на диапазон частот, начинающийся не ниже 10 ÷ 20 Гц, что не удовлетворяет поставленной задаче. Для идентификации отдельных спектральных составляющих необходима высокая избирательность анализатора [3; 4]. Разделение двух равных спектральных линий при частотном интервале между линиями Δf возможно при добротности анализатора [5]

$$Q \geq 4 \frac{f_i}{\Delta f}. \quad (2)$$

Требуемую добротность можно оценить, исходя из необходимости разделения центральной и боковых составляющих модулированного частотой вращения f_n сигнала встречи шаров с дефектом вращающегося кольца шарикоподшипника или пересоприжения зубьев колес, имеющих эксцентриситет начальной окружности [4]. В первом случае, полагая, что число шаров $z = 10 \div 30$, при $f_c \approx 0,5 f_n$ имеем

$$Q \geq 4 \frac{(f_n - f_c)z}{f_n} \approx 20 \div 60, \quad (3)$$

а в случае зубчатого колеса с числом зубьев $z = 15 \div 30$ —

$$Q \geq 4 \frac{f_n z}{f_b} = 60 \div 120. \quad (4)$$

Гетеродинные спектроанализаторы типа С4—12, С5—3 с постоянной полосой пропускания $\Delta f = 6 \div 7$ Гц обеспечивают эквивалентную добротность, равную требуемой (20 ÷ 120), начиная лишь с частот

$$f = Q \cdot \Delta f = (20 \div 120) \cdot (6 \div 7) = 120 \div 840 \text{ Гц}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что для низких частот в отношении избирательности преимущество дают фильтры с постоянной добротностью, а не с постоянной полосой пропускания. Итак, необходим анализатор с добротностью, по крайней мере, 50 и нижней частотой диапазона не выше 2 Гц. Промышленностью такие приборы не выпускаются.

Другой особенностью является противоречие между кратковременностью процесса установившегося движения узла подачи станка и длительностью времени анализа спектра. Продольный ход стола фрезерного станка при наибольшей подаче осуществляется всего за 36 сек. Время же переходного процесса резонансного фильтра с $Q = 50$, после его настройки на спектральную составляющую $f_i = 2$ Гц, составит:

$$T = 3 \frac{Q}{\varepsilon f_i} = 24 \text{ сек.} \quad (6)$$

Для последовательного анализа с равномерной скоростью изменения частоты настройки фильтра даже в узком диапазоне $F = 10 \text{ Гц}$ при $f_{i \min} = 2 \text{ Гц}$ и $Q = 50$, допуская динамическую ошибку в амплитуде и разрешающей способности 25%, а в частоте составляющей — 1% (т. е. $\mu = 0,5$), имеем время анализа [5]

$$T = \frac{2}{\pi} \frac{FQ^2}{f_i^2 \mu} = 27 \text{ мин.} \quad (7)$$

Измерение спектральной плотности мощности случайного процесса только в точке $f_i = 2 \text{ Гц}$ при $Q = 10$ с нормированной среднеквадратической ошибкой $\varepsilon = 0,3$ требует время [6]

$$T = \frac{Q}{f_i \varepsilon^2} = 55 \text{ сек.} \quad (8)$$

Таким образом, приходим к необходимости магнитной записи на закольцованную ленту. Длина кольца определяет статистическую точность воспроизведения спектра и сверху ограничена длительностью самого кратковременного процесса движения ползуна. При длине реализации $T_p = 36 \text{ сек}$ разрешающая способность B_ε воспроизведения спектра с нормированной среднеквадратической ошибкой $\varepsilon = 0,3$ составит [6]

$$B_\varepsilon = \frac{1}{T_p \varepsilon^2} = 0,3 \text{ Гц,} \quad (9)$$

что эквивалентно добротности

$$Q_{\text{экв}} = f_i / B_\varepsilon. \quad (10)$$

Это значит, что начиная с 15 Гц и выше спектр воспроизводится подробнее, чем при измерении фильтром с $Q = 50$. На более низких частотах $Q_{\text{экв}}$ снижается до 7 при $f_i = 2 \text{ Гц}$, это — ограничение, но приемлемое, так как соотношения (3) и (4) получены для частот 10 Гц .

С учетом изложенных соображений была собрана установка для спектрального анализа движения узлов подач, блок-схема которой

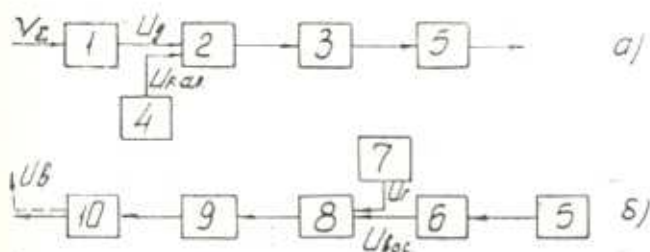


Рис. 1.

приведена на рис. 1. Установка содержит два основных блока: измерения и запоминания (рис. 1,а), воспроизведения и анализа (рис. 1,б).

Сигнал виброскорости преобразуется датчиком 1, проходит через широкополосный усилитель 2 и модулятор 3, который модулирует сигнал на несущей частоте, и записывается магнитофоном 5. На вторую дорожку той же ленты записывается калибровочный сигнал $U_{\text{кал}}$ от генератора 4. При анализе воспроизведенный магнитофоном сигнал демодулируется детектором 6 и поступает на анализатор 8, к выходу которого через усилитель 9 подключен квадратический вольтметр 10. Для калибровки цепи анализа используется генератор 7.

Индукционный сейсмический датчик виброскорости типа К001 имеет собственную частоту $f_0 \approx 1 \text{ Гц}$ и чувствительность $5-10 \text{ мВ.сек/мм}$ при сопротивлении нагрузки $R_n \geq 200 \text{ Ом}$ и обеспечивает постоянство частотной характеристики в исследуемом диапазоне частот ($2-300 \text{ Гц}$) начиная с сигнала $V = 0,01 \text{ мм/сек.}$

Модулятор (рис. 2) собран по схеме, включающей входной делитель

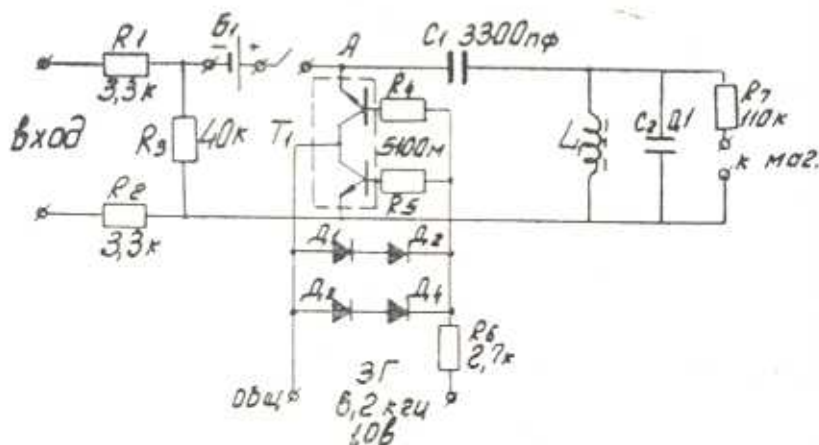


Рис. 2.

R_1-R_3 , ключ T_1 , управляемый от внешнего звукового генератора $ZГ$ через ограничивающую цепь R_4 , D_1-D_4 и выходной резонансный контур L_1C_2 , настроенный на частоту $6,2 \text{ МГц}$. Напряжение $4,5 \text{ В}$ от внешнего источника B_1 , введенного для обеспечения возможности модуляции знакопеременным сигналом, суммируясь с напряжением входного делителя, прерывается ключом T_1 . Прямоугольные импульсы с амплитудой, пропорциональной входному сигналу, преобразуются резонансным контуром в синусоидальные и через согласующую цепочку подаются на вход бытового магнитофона «Днепр». Максимальной (без искажения сигнала) глубине модуляции $0,8$ соответствует входное (в модулятор) напряжение $5,8 \text{ В эфф.}$ Полагая, что амплитуды одновременно анализируемых спектральных составляющих могут отличаться на

порядок, можно оценить по предельно малому сигналу датчика требуемый максимальный коэффициент усиления усилителя. Он должен быть не ниже $(8 \div 10) \cdot 10^3$. Такую величину в диапазоне частот, начинающемся с $0,5 \text{ Гц}$, удалось обеспечить, используя в качестве усилителя 9 три последовательно соединенных усилительных каскада фазочувствительного вольтметра В5-2.

При воспроизведении сигнал снимается с гнезда магнитофона, предназначенного для подключения внешнего усилителя, и подается на демодулятор, представляющий собой однополупериодный выпрямитель с фильтром низкой частоты. В качестве анализатора спектра в установке используется разработанный Закавказским филиалом ЭНИМС [7] типовой измерительный блок балансировочного станка, содержащий резонансный фильтр с регулируемой в пределах $3 \div 50$ добротностью, выполненный на диапазон частот $2 \div 500 \text{ Гц}$. В установке используется последний каскад милливольтметра переменного тока типа В3-5 (квадратичский детектор, усилитель постоянного тока и показывающий прибор), пропускающий без завала сигнал с $f_{\text{min}} = 2 \text{ Гц}$. Добавлением емкости постоянная времени усреднителя увеличивается до значения, не меньшего $(0,3 \div 0,5) T_r$.

Для получения наибольшей точности анализа необходимо на выходе усилителя 2 обеспечивать максимальный сигнал, ограничиваемый, как указывалось, уровнем $X_0 = 1,4 \cdot 5,8 = 8,1 \text{ В}$, соответствующим допустимой глубине модуляции. Поскольку сигнал, как правило, представляет собой нормальный случайный процесс, то можно оценить его предельную среднеквадратическую величину $\sigma_{\text{вх}}$, исходя из известной [8] зависимости для отношения между числом пересечений процессом заданного (X_0) и нулевого уровней:

$$\frac{\lambda(X_0)}{\lambda(0)} = \exp(-X_0^2 / 2\sigma_{\text{вх}}^2). \quad (11)$$

Если допустить, что только 10% пиков могут достичь и превысить уровень X_0 , то из (11) имеем $\sigma_{\text{вх}} = 3,8 \text{ В}$.

Качество установки оценивалось по ее частотной характеристике, линейности, коэффициенту нелинейных искажений гармонического сигнала, уровню и спектру помех. На рис. 3 кривые 1—3 показывают изменение коэффициента усиления $K_{\text{нл}}$ системы, выраженного в относительных единицах в функции частоты при трех уровнях входного сигнала.

Коэффициент нелинейных искажений гармонического сигнала оказался в пределах $10 \div 15\%$, что допустимо из соображений значимости составляющих.

Помехи установки исследовались при нулевом входном сигнале. Общий уровень помех $\sigma_{\text{нл}}$, приведенный к входу модулятора, оказался равным $1,3 \text{ В}$, что позволяет воспроизвести и измерить суммарную виброскорость с точностью $\sigma_{\text{вх}} / \sqrt{\sigma_{\text{вх}}^2 - \sigma_{\text{нл}}^2} = 1,07$, т. е. 7%.

Поскольку спектр помех неравномерен, оценивалась точность измерения детерминированных составляющих спектра фильтром с $Q=50$. Кривая 4 на рис. 3 показывает отношение величины составляющей, которую в условиях помех еще можно измерить с точностью 20%, к суммарной виброскорости на различных частотах. Как видно, во всех случаях оно меньше 0,1.

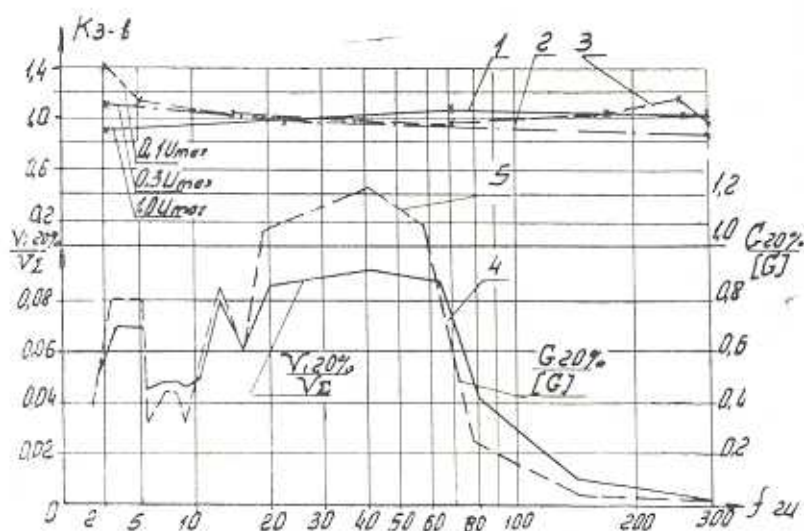


Рис. 3.

При оценке возможностей измерения спектральной плотности случайных составляющих в условиях помех, следует вначале установить—какой уровень Q считать значимым. Чисто случайные составляющие проявляются обычно в зонах резонансов упругой системы [4]. Такая зона спектральной плотности может считаться значимой, если она изменяет V_2 , по крайней мере, на 10%, т. е. составляет $0,2 V_2$. Полагая наименьшую добротность резонансной характеристики упругой системы $Q_M=5$, и учитывая, что 80% всей энергии спектра уже укладывается в области от $G_{рез}$ до $0,46 G_{рез}$, можем записать значимый уровень $[G]$ спектральной плотности как

$$[G] = 0,46 \frac{0,2 V_2^2 Q_M}{f} = \frac{6,6}{f} [B^2/Гц], \quad (12)$$

где $V_2 = \sigma_{вх}$.

Кривая 5 на рис. 3 показывает отношение уровня спектральной плотности $G_{20\%}$, который в условиях помех еще можно измерить с точностью 20%, к значимому по (12) уровню $[G]$ на различных частотах. Как видно, эта точность выдерживается с запасом, кроме области $20 \div 60$ Гц, в которой значимый уровень $[G]$ измеряется с ошибкой 25%.

Таким образом, разработанная установка во всех отношениях

удовлетворяет условиям анализа спектра неравномерности скорости узла подачи станков.

Գ. Վ. ՍԱՀՅԱՅԱՆ

ՀԱՍՏՈՑԻ ՄԱՏՈՒՑՄԱՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ՇՈՐՃՄԱՆ ԱՆՉԵՎԱՍՍԵՐԱԶՈՓՈՒԹՅԱՆ
ՍՊԵԿՏՐԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒՄՈՒԹՅՈՒՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերված է ուղղաձիգ-ֆրեկերային հաստոցի պարապ ընթացքի ժամանակ մատուցման հանդույցի շարժման անհավասարաչափության վերլուծության համար առաջարկվող կաշիների նկարագրությունը:

Վերլուծության են ենթարկված հաստոցի առաջընթաց շարժվող սողանի թրթռաարագության աղղանշանի ուսումնասիրման համար սպեկտրալ վերլուծության կիրառման առանձնահատկությունները:

ЛИТЕРАТУРА

1. Пун В. Э. Малые перемещения в станках. Машгиз, 1961.
2. Кудинов В. А. Динамика станков. Изд. «Машиностроение», 1967.
3. Baxter B., Bernhard B. Vibration an indicating tool, Mechanical Engineering*, V. 90, No 13, 1968.
4. Бровман Я. С., Демирян К. С., Шмугер С. Л. Диагностика источников вибрации асинхронного электродвигателя. «Электротехника», № 1, 1973.
5. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Физматгиз, 1962.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. Изд. «Мир», 1971.
7. Агабян А. Г., Саргсян С. А., Слезангер П. Н. Система унифицированных блоков управления автоматической балансировкой. Сб. «Теория и практика балансировочной техники» под ред. В. А. Щепетильникова: Изд. «Машиностроение», 1973.
8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. Изд. «Сов. радио», 1969.