

Г. Б. Куликов

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИВОДА ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

На примере механизма привода качающегося стола автомата БНШ-6, показана возможность диагностирования технического состояния элементов привода полиграфических машин методами виброакустической диагностики с использованием искусственных нейронных сетей. Экспериментальные исследования выполнены с применением современных компьютерных технологий, методов цифрового спектрального анализа сигналов. Показано, что предложенный алгоритм позволяет правильно определять степень изношенности исследуемого механизма, а также, что увеличение размерности входного ряда искусственных нейронных сетей путем добавления номинальных переменных позволяет повысить уверенность ответов сети и несколько увеличить надежность распознавания. На основе проведенных исследований предложена методика безразборной диагностики привода полиграфических машин.

Наблюдающиеся в настоящее время тенденции развития систем виброакустической диагностики связаны с поиском новых, более эффективных методов и средств обработки виброакустической информации и применением для построения диагностических признаков методов распознавания образов. Наиболее современной технологией построения систем распознавания является использование искусственных нейронных сетей (ИНС).

Кулачковые механизмы широко используются в полиграфическом оборудовании, их номенклатура насчитывает более 500 типоразмеров. Из них около 30 % составляют пазовые кулачки с роликовым толкателем. Как правило, полиграфические машины содержат 5...10 кулачковых механизмов, а, например, в блокообработывающих агрегатах их число может достигать 62. Особую роль эти механизмы играют в ниткошвейных автоматах, так как от их состояния зависит качество выпускаемой продукции.

Особенностью кулачковых механизмов является явно выраженный цикл работы и жесткая последовательность контакта кинематических пар. Вибрация таких механизмов представляет собой последовательность импульсов, которые характеризуются значительной амплитудой, малой длительностью и высокой частотой. В качестве возмущающих сил выступают ударные и инерционные нагрузки, обусловленные законом периодического движения, неровностью профиля кулачка и колебанием технологической нагрузки.

Колебания деталей кулачкового механизма под действием ударов происходят на собственных частотах, характерных для каждого элемента механизма, что облегчает их выделение из общего спектра вибраций.

За период эксплуатации кулачок проходит несколько этапов развития дефектов: от зарождения до начала аварийного износа.

Для различных механизмов ниткошвейного автомата критическая величина износа будет разной. В работе [1] приведены данные по средней величине износа различных механизмов ниткошвейного автомата. Для исследуемого механизма износ рабочей части профиля (т.е. участка, соответствующего моменту подхода стола к позиции шитья) кулачков привода качающегося стола за год может достигать 0,15... 0,75 мм. Износ остальных участков составляет 0,04... 0,06 мм.

Второй, не менее важной особенностью параметров виброакустического сигнала кулачковых механизмов является то, что колебания, вызванные ударным воздействием, могут быть с достаточной точностью привязаны к углу поворота главного вала машины (фазе цикла). Совмещение операций фазовой и частотной селекции дает возможность диагностировать состояние отдельных деталей механизма путем исследования виброакустических процессов в определенные моменты времени по углу поворота главного вала и в диапазоне частот собственных колебаний этих деталей.

С точки зрения динамики погрешность профиля может служить причиной неравномерности движения ведомого звена, дополнительных динамических нагрузок и, как следствие, повышенного изнашивания рабочих поверхностей.

Влияние погрешностей профиля на динамику кулачковых механизмов рассмотрено Г.А. Ротбартом в работе [2], где показано, что одной из причин возникновения ударов в кулачковых механизмах являются отрывы толкателя от поверхности кулачка. Для пазовых кулачков, имеющих люфт, происходит удар ролика по кулачку, называемый переходным скачком или перекладкой зазора. Другой причиной ударов Г.А. Ротбарт считает отклонения рабочего профиля кулачка от расчетного, вызванные погрешностью изготовления, износом и т.д.

Для оценки влияния отклонения профиля кулачка на его виброактивность можно воспользоваться зависимостью, предложенной В.Ф. Красниковым, для определения дополнительного ускорения ведомого звена вследствие наличия погрешностей действительного профиля [3]:

$$\Delta a = \left(\frac{a^2}{v_k^2} \cos^3 \theta + \frac{P \sin \theta}{v_k} \right) \Delta R^N + \\ + [3a + (R_0 + S) \omega^2] \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \Delta \theta_n + \frac{v_k^2}{\cos^3 \theta} \frac{1}{\Delta \rho},$$

где R_0 — радиус начальной окружности кулачка; ΔR^N — ошибка радиуса-вектора профиля кулачка; S — высота подъема толкателя; θ — угол подъема профиля кулачка; v_k — линейная скорость кулачка; a — ускорение ведомого звена; $P = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{da}{dt}$ — пульс, или производная от ускорения по времени; ω — угловая скорость кулачка; $\Delta\theta_n$ — ошибка угла подъема профиля кулачка; $\Delta\rho$ — ошибка радиуса кривизны профиля.

Доля первого слагаемого составляет 1...2% от суммарного значения Δa ; второе слагаемое, отражающее вклад погрешности угла давления, составляет 4...5% от Δa ; третье слагаемое, характеризующее форму погрешности профиля, $\Delta\rho$ равняется 94% от Δa .

Таким образом, основным фактором, вызывающим дополнительное ускорение ведомого звена, а следовательно, и повышение уровня вибраций, является ошибка кривизны действительного профиля. Поскольку в процессе эксплуатации профиль изнашивается неравномерно, это вызывает еще бóльшую динамическую нагрузку на механизм. В пазовых кулачковых механизмах к износу профиля добавляется износ ролика, поэтому оценивать приходится величину зазора в паре кулачок–ролик.

Для оценки влияния износа пары кулачок–ролик на виброактивность механизма на кафедре печатного и послепечатного оборудования МГУП на базе ниткошвейного автомата БНШ-6 был изготовлен экспериментальный макет (рис. 1), состоящий из механизма привода качающегося стола, механизма проколов и станины с электродвигателем. Остальные механизмы для снижения помех были удалены. Качающийся стол машины БНШ-6 приводится в движение парой пазовых кулачков, имеющих технологические зазоры, необходимые для качения ролика толкателя по пазу. Эти зазоры в процессе эксплуатации машины увеличиваются вследствие износа профилей кулачка и ролика.

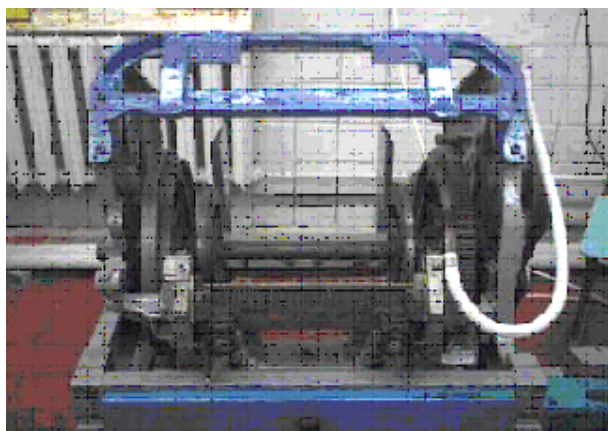


Рис. 1. Общий вид экспериментального макета

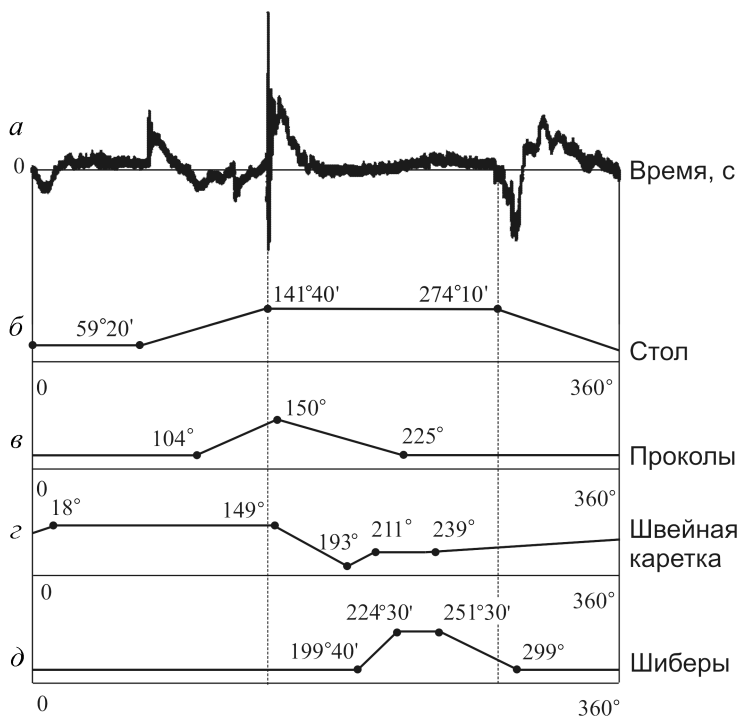


Рис. 2. Диаграмма виброускорения стола (*a*) за один цикл и циклограммы стола (*б*), проколов (*в*), швейной каретки (*г*), продольного перемещения шиберов (*д*)

На рис. 2 показаны циклограммы работы основных швейных инструментов, совмещенные с записью виброускорения стола.

Как видно из представленных циклограмм, проколы начинают движение во время перемещения стола в позицию шитья, затем стол останавливается и на участке $141^\circ \dots 150^\circ$, происходит прокалывание корешка тетради, при этом происходит удар об упоры и возникают сильные колебания стола. В тот же момент начинает движение швейная каретка (участок $149^\circ \dots 193^\circ$), проколы выходят из корешка тетради и в образовавшиеся отверстия входят швейные инструменты. На рис. 2, *a* видно, что амплитуда колебаний стола имеет максимум как раз в момент входа швейных инструментов в корешок тетради.

Для исследования влияния износа пары кулачок–ролик на виброактивность механизма было изготовлено 8 пар роликов с диаметрами от номинального 50 мм и далее по убывающей до 49,36 мм (табл. 1). Реальный зазор пары с номинальным роликом диаметром 50 мм составляет 0,03...0,04 мм.

Таблица 1

Диаметры экспериментальных роликов

Номер пары роликов	1	2	3	4	5	6	7	8
Наружный диаметр роликов, мм	50	49,92	49,86	49,67	49,55	49,5	49,45	49,36

Ролики устанавливали на макет и затем снимали показания вибрации с датчика виброускорения, расположенного на боковом рычаге качающегося стола. Скорость работы макета составляла 82 цикла в минуту.

Оцифрованный сигнал с акселерометра записывался на жесткий диск персонального компьютера в виде текстового файла. Для каждой из 8 пар роликов была сделана 41 запись виброускорения, включающая 2 оборота кулачка. Дальнейшая обработка производилась с помощью программ Statistica и MathCAD.

Оцифровка проводилась на внешнем АЦП LA-20 USB с частотой дискретизации 41000 Гц, сигнал на выходе АЦП оценивается в милливольтках. Поскольку нас интересовала только качественная картина зависимости виброактивности от зазора в механизме, пересчет мВ в м/с^2 или дБ не осуществлялся. Затем из каждой полученной реализации был выделен один цикл работы кулачка, включающий около 30 000 отсчетов. На рис. 2, а приведена запись виброускорения за один цикл. Анализ полученных записей виброускорения стола показал, что с увеличением зазора в паре кулачок–ролик амплитуда виброимпульса в точке $141^\circ 40'$ резко возрастает.

Спектры виброускорения получены с помощью программы Statistica. На рис. 3 показаны спектры одного цикла работы кулачкового механизма с роликами диаметром от 50 до 49,36 мм. Поскольку амплитуды спектральных составляющих изменяются от 12 мВ на низких частотах до 0,005 мВ в области высоких частот, представить весь спектр в диапазоне 0...20 кГц на одном графике не представляется возможным. По этой причине спектры на рис. 3 построены в диапазонах 0...100 Гц, 100...1000 Гц и 1...20 кГц. На всех графиках по оси Z отложены амплитуды спектральных составляющих в милливольтках.

Анализ представленных диаграмм позволяет сделать ряд важных выводов. Во-первых, исследуемые спектры вибраций содержат ряд ярко выраженных резонансных частот, во-вторых, на некоторых из них хорошо заметна тенденция к увеличению амплитуды резонансных пиков по мере уменьшения диаметра ролика, т.е. данные частоты являются информационными.

Статистическая обработка полученных данных методами регрессионного анализа, позволила выявить информационные частоты, на которых наблюдается практически линейное увеличение амплитуды в зависимости от увеличения зазора в паре кулачок–ролик.

С учетом погрешности метода измерений и рекомендаций для обеспечения достаточной точности был применен статистический прогноз на основе уравнения линейной регрессии, в общем случае имеющий вид

$$y_i = k_0 + kx_i.$$

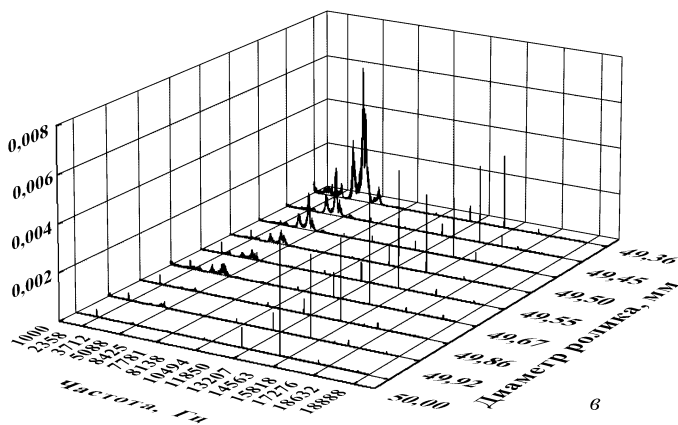
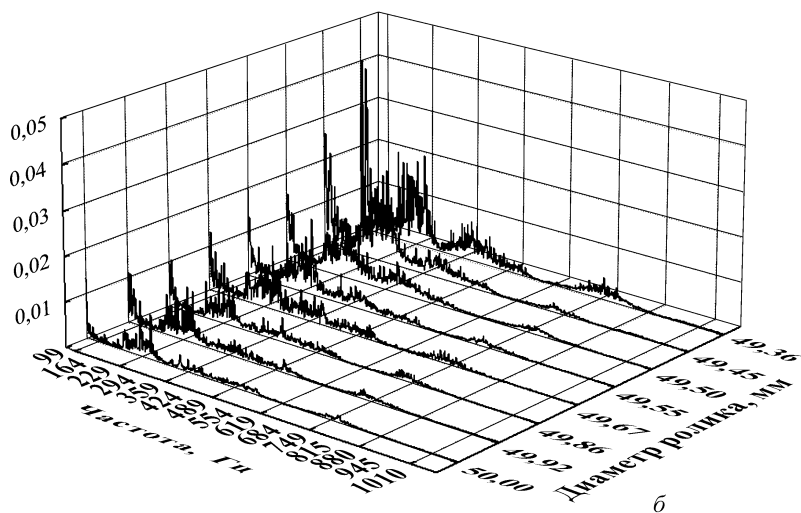
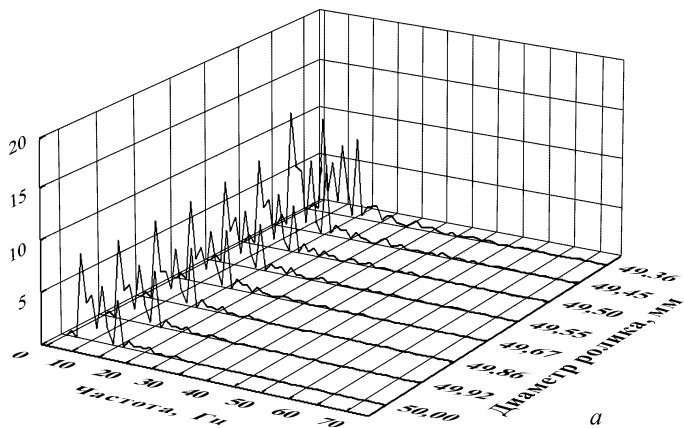


Рис. 3. Спектры виброускорения кулачкового механизма в диапазонах 0... 100 Гц (а), 100... 1000 Гц (б) и 1... 20 кГц (в)

Здесь k_0, k — коэффициенты регрессии; y_i — зависимая случайная переменная (функция); x_i — независимая переменная (аргумент).

В нашем случае в качестве функции выступает амплитуда спектральной составляющей на информационной частоте, а в качестве аргумента — зазор в паре кулачок–ролик.

Коэффициенты регрессии, необходимые для построения линии регрессии и установления статистической зависимости, были рассчитаны для каждой информационной частоты по известным формулам:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2};$$
$$k_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Расчет моделей регрессии по каждой информационной частоте и построение графиков осуществлялись в программе MathCAD.

Для всех потенциальных информационных частот по полученным экспериментальным значениям был задан массив данных для зависимостей амплитуды от зазора. По полученным значениям составлены регрессионные модели и рассчитаны доверительные интервалы. В качестве примера на рис. 4, а приведены графики регрессий для частот 3,75 и 6,26 Гц (линиями, состоящими из точек, на графиках показан доверительный интервал, \times — экспериментальные значения, сплошной кривой — регрессия). На приведенных графиках по оси абсцисс отложены значения зазора в сотых долях миллиметра, а по оси ординат — амплитуды спектральных составляющих в милливольтгах.

Итак, в спектре виброускорения кулачкового механизма было выделено 14 информационных частот, стабильно присутствующих в спектрах всех экспериментальных роликов: 3,75, 6,26, 8,75, 12,5, 98,5, 249, 289, 2 437, 4 876, 7 165, 9 600, 12 050, 14 450, 16 900 Гц.

На всех информационных частотах зависимость диагностического параметра (амплитуды спектральных составляющих) от структурного (технологического зазора в паре кулачок–ролик), т.е. при увеличении зазора соответственно увеличивается амплитуда. Кроме того, на всех выделенных информационных частотах эта зависимость близка к линейной. Фактические значения экспериментальных данных на всех информационных частотах лежат в пределах доверительного интервала. Выполнение условий охвата доверительным интервалом значений,

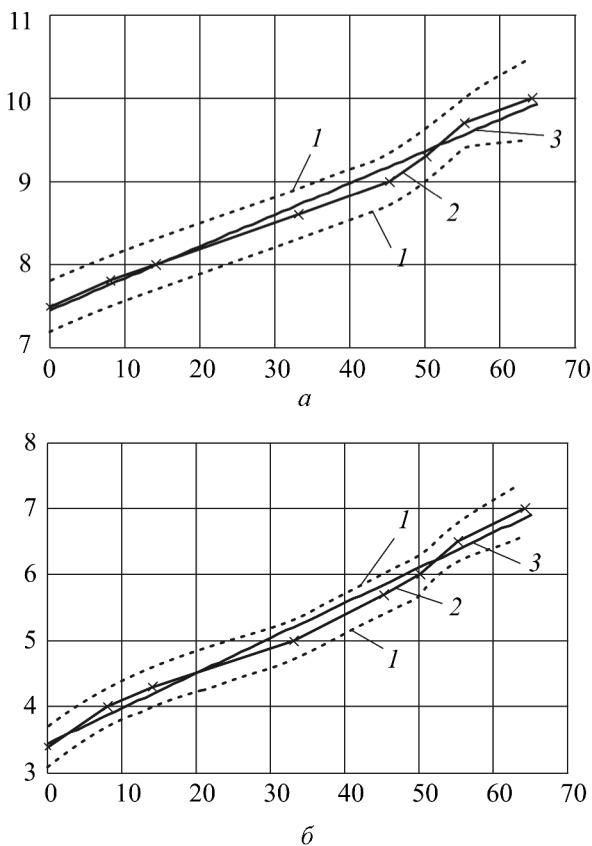


Рис. 4. График регрессии на частоте 3,75 Гц (а) и 6,26 Гц (б)

при которых проводились расчеты и эксперименты, подтверждает достаточную точность полученных результатов. Из сказанного можно сделать вывод, что выбранные диагностические признаки являются информативными и могут быть использованы как для оценки текущего состояния диагностируемых кулачковых механизмов, так и для прогноза развивающихся дефектов.

Как отмечено ранее, в спектре вибраций кулачкового механизма должны присутствовать гармонические составляющие, определяемые циклограммой, законом периодического движения и резонансными частотами всех элементов механизма. Дальнейшие исследования подтвердили эту гипотезу.

Первые четыре резонансные частоты спектра виброускорения (3,75, 6,26, 8,75, 12,5 Гц) обусловлены периодичностью перекладки зазоров в механизме определяемой циклограммой и законом периодического движения, следовательно, значение каждой из них должно зависеть от скорости работы машины. Перекладка зазоров должна происходить в моменты перехода механизма от выстоя к движению, а также при изменении знака ускорения. Для проверки этой гипотезы в соответствии с циклограммой были рассчитаны частоты следова-

ния импульсов от перекладки зазоров на разных скоростях работы машины (табл. 2).

Таблица 2

Частота, Гц, следования импульсов от перекладки зазоров

Параметры			Скорость работы, цикл/мин (оборотная частота, Гц)					
			51 (0,85)	57 (0,95)	64 (1,07)	73 (1,22)	78 (1,3)	82 (1,38)
Разбег	1 период	82°20'	3,72	4,15	4,66	5,32	5,68	6,05
	1/2 периода	41°10'	7,43	8,31	9,33	10,64	11,37	12,1
Выбег	1 период	85°50'	3,57	3,98	4,47	5,1	5,45	5,8
	1/2 периода	42°56'	7,13	7,97	8,95	10,21	10,91	11,61

На рис. 5 показаны графики низкочастотных спектров вибрации на различных скоростях работы машины. Следует отметить хорошее совпадение некоторых расчетных значений с полученными в результате экспериментов. Из рис. 5 видно, как отдельные резонансные пики смещаются вправо по мере увеличения скорости. Следовательно, при проведении диагностики в производственных условиях значения этих информационных частот нужно рассчитывать, исходя из текущей скорости машины. В табл. 2 курсивом выделены значения, имеющие максимальную амплитуду и хорошо заметные на графиках (см. рис. 5).

Далее были определены собственные частоты рычага и ролика, для этого на них воздействовали короткими ударными импульсами, полученные спектры виброускорения приведены на рис. 6. Как видно из

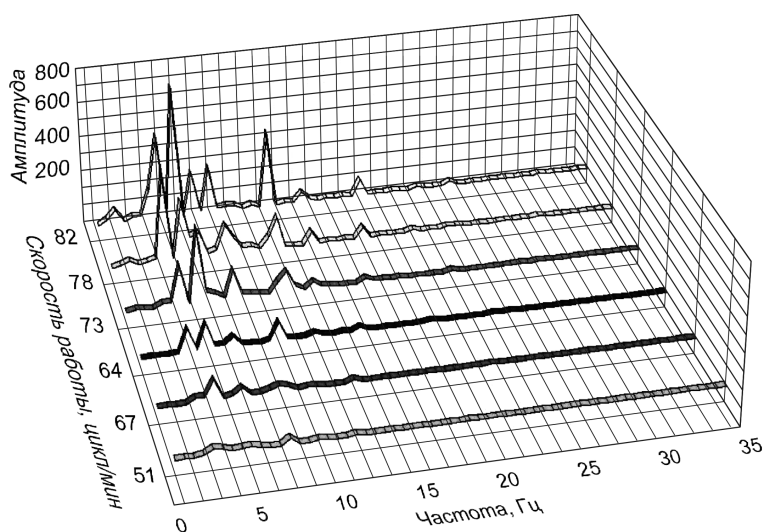


Рис. 5. Низкочастотные спектры на разных скоростях

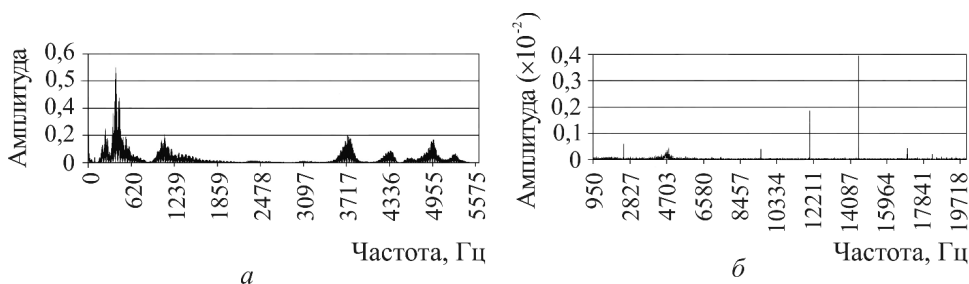


Рис. 6. Спектр вибрации рычага (а) и ролика (б)

диаграмм, частоты 98,5, 249, 289, 2 437, 4 876, 7 165 Гц являются собственными частотами рычагов (см. рис. 9, а), а частоты 9 600, 12 050, 14 450, 16 900 Гц — собственные частоты ролика (рис. 6, б). В спектрах, полученных на разных скоростях работы макета, эти частоты оставались неизменными.

В заключение были проведены эксперименты по исследованию влияния зазора в кулачковом механизме привода качающегося стола на качество шитья. Для этого экспериментальные ролики попарно устанавливались в ниткошвейный автомат БНШ-6; с каждой установленной парой роликов на автомате было сшито 20 тетрадей. Оценивали величину смещения стежка относительно линии фальца. В соответствии с технологическими инструкциями, допуск на эту величину составляет $\pm 0,5$ мм.

На рис. 7, 8 показаны различные дефекты, возникающие в процессе шитья. На рис. 7, а показан разворот нормально сшитой тетради, а на рис. 7, б — разворот тетради, в корешок которой швейные инструменты вошли с сильным смещением (образование стежка в этом случае невозможно, вероятно поломка инструментов).

На рис. 8 показаны корешок тетради (а) и ее разворот (з), на которых видны дефекты шитья. На рис. 8, е показан разрыв листов тетради, возникающий в результате смещения швейного инструмента относительно оси корешка, при этом входное отверстие на корешке несколько увеличено (рис. 8, в). Это говорит о том, что стол не занимал в позиции шитья правильное положение. На рис. 8, б, в показаны входное и выходное отверстия, смещенные на 4 мм относительно оси корешка тетради. Это также свидетельствует о том, что стол не занимал правильного положения в позиции шитья, кроме того, возможно,

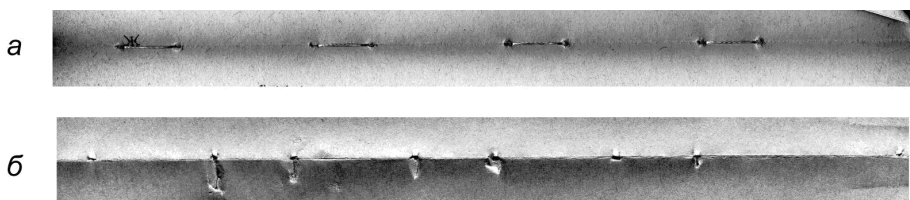


Рис. 7. Разворот тетради

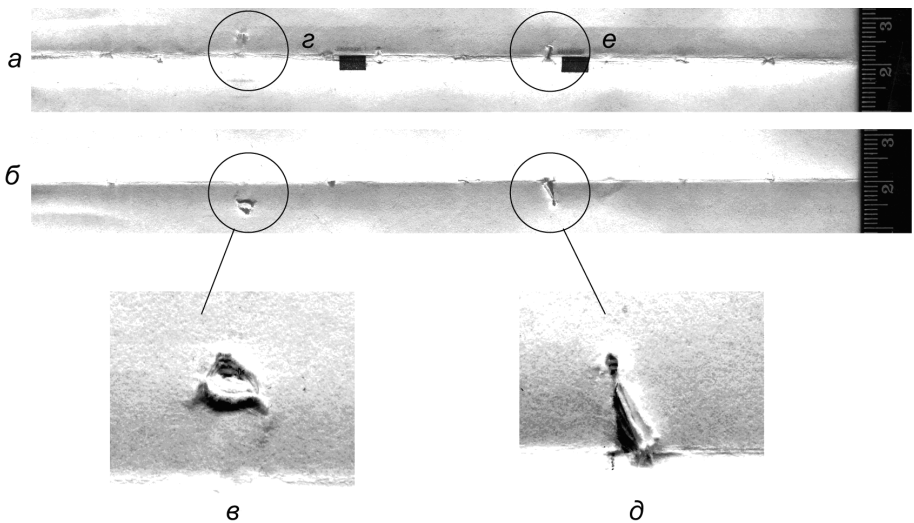


Рис. 8. Типичные дефекты шитья

что в результате сильного удара в конце хода стола тетрадь оказалась перекошенной. Следует обратить внимание на то, что на обоих рисунках в левой части тетради смещение отверстий гораздо больше, чем в правой (тетради на рисунках расположены так же, как и на столе машины). На эту особенность обратил внимание при исследовании точности позиционирования качающегося стола Ю.А. Шостачук; им было установлено, что левая часть стола имеет амплитуду колебаний значительно бóльшую, чем правая [4].

В результате проведенных исследований было выделено три категории качества шитья: хорошее (с использованием роликов диаметром 50 и 49,92 мм) — смещение проколов относительно линии корешка в пределах допуска; среднее (с использованием роликов диаметром 49,86, 49,67 и 49,55 мм) — смещение проколов относительно линии корешка может немного выходить за пределы допуска; плохое (с использованием роликов диаметром 49,5, 49,45 и 49,36 мм). В последнем случае из-за сильного смещения швейных инструментов происходят их поломки, добиться приемлемого качества шитья без снижения скорости работы машины невозможно.

Дальнейшие эксперименты были посвящены разработке методики диагностирования износа пары кулачок–ролик с использованием искусственных нейронных сетей.

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии в качестве диагностических параметров использовались полученные ранее амплитуды пиковых значений информационных частот спектра ускорения кулачкового механизма в диапазоне 0... 18 кГц.

Во второй серии помимо амплитуд пиковых значений спектра ускорения использовалась номинальная переменная “Качество шитья”.

Из 41-го спектра виброускорения каждого ролика были выделены максимальные значения амплитуд на информационных частотах, и сформированы обучающая, тестовая и контрольная выборки. Это потребовало определенной подготовки данных. Каждый спектр в диапазоне от 0 до 20 кГц содержит 16 000 значений, отличающихся по абсолютной величине в тысячи раз. Нейронные сети могут работать с числовыми данными, лежащими в определенном ограниченном диапазоне, в пределах которого сигналы различимы. Данный диапазон называется интервалом допустимых значений и определяется функцией активации нейрона. Для различных функций активации эти интервалы различны, что создает проблемы в случаях, когда данные имеют нестандартный масштаб. Отображение множества значений исходной величины в интервал допустимых значений осуществляется с помощью простейшего преобразования — нормализации.

Аналогичные проблемы возникают при работе с данными нечислового характера. В настоящей работе использована номинальная переменная “Качество шитья” = {Хорошее, Среднее, Плохое}, ее значения необходимо преобразовать в числовой код. В пакете Statistica Neural Networks имеются средства преобразования числовых данных в подходящий для сети диапазон, а также как двух-, так и многозначных номинальных переменных для последующего использования в нейронной сети.

Нейросети формировались в программе Statistica Neural Networks с использованием мастера решений (Automatic Network Designer).

В каждой серии экспериментов было сформировано по 5 сетей классификации, их основные характеристики приведены в табл. 3. . . 6.

Основной характеристикой структуры полученной сети (см. табл. 3) является ее профиль, определяемый типом, числом входных и выходных переменных, числом слоев и элементов (сетей) или компонентов (ансамблей). В нашем случае использовались сети следующих типов: многослойный перцептрон (МП), линейная сеть (линейная), радиальная базисная функция (РБФ).

Для простых нейронных сетей число входных и выходных переменных может совпадать с числом входов и выходов, но это не является обязательным условием. В нашем случае число входов определяется, как правило, числом информационных частот.

Производительность сети определяется на обучающей, контрольной и тестовой выборках соответственно (в представленных таблицах производительность на контрольной выборке опущена). Смысл понятия производительности зависит от типа сети. Для сети классификации — это доля правильно классифицированных наблюдений в выборке. Для регрессионной сети — это отношение стандартных отклонений ошибки прогноза и наблюдаемых значений. Поскольку формировались

Таблица 3

Основные характеристики сетей первой группы (анализ спектра вибрации)

Профиль сети	Производительность обучения	Тестовая производительность водителю	Ошибка обучения	Тестовая ошибка	Обучение / Элементы	Входы	Скрытые
МП 14:14-13-7:1	0,930556	0,84507	0,352732	1,377594	ОП100, СГ20, СГ0b	14	13
Линейная 13:13-7:1	0,75	0,71831	0,255639	0,267993	ПО	13	0
Линейная 12:12-7:1	0,75	0,71831	0,256209	0,268591	ПО	12	0
РБФ 14:14-19-7:1	0,777778	0,774648	0,241123	0,237365	КС, КБ, ПО	14	19
РБФ 14:14-29-7:1	0,763889	0,802817	0,224865	0,225928	КС, КБ, ПО	14	29

Ранг выходной переменной при анализе чувствительности пяти сетей по 14 входам (анализ спектра вибрации)

Сеть	Частота, Гц													
	3,75	6,26	8,75	12,51	19,85	24,9	28,9	2437	4876	7165	9600	12050	14450	16900
1	7	3	5	1	6	8	12	10	4	11	9	2	13	14
2	5	3	4	2	7	10	6	12	11	13	9	1	—	8
3	5	3	4	2	7	9	6	12	11	—	10	1	—	8
4	5	3	4	2	7	9	6	12	11	—	10	1	—	8
5	7	3	9	2	5	10	8	12	11	14	13	1	4	6

сети классификации, то производительность означает суммарный процент правильно распознанных роликов, в нашем случае это основная характеристика.

Следующие колонки — “Ошибка обучения”, “Тестовая ошибка”. Алгоритмы обучения оптимизируют функцию ошибки (например, сумма квадратов кросс-энтропии между наблюдаемыми и предсказанными выходами). Эти столбцы сообщают уровни ошибок на выборках. Значение ошибки интерпретируется менее точно, чем значение производительности, но более значимо для алгоритмов обучения.

Колонка “Обучение” содержит короткое описание алгоритмов, используемых для обучения сети. Представленные коды расшифровываются следующим образом: ОР — обратное распространение; СГ — метод сопряженных градиентов; КС — К-средних (расстановка центров); КБ — К-ближайших соседей (задание отклонений); ПО — псевдообратные (линейная оптимизация методом наименьших квадратов).

Как видно из табл. 3 наибольшую эффективность имеет сеть на основе многослойного персептрона МР 14:14-13-7:1, на рис. 9 представлена ее структура.

Программный комплекс Statistica Neural Networks позволяет ранжировать входные переменные, выделить наиболее значимые и исключить те, которые не дают полезной информации при распознавании.

Ранжирование проводится на основе анализа чувствительности используемых переменных. Чувствительность характеризует отношение ошибки с заменой каждой переменной процедурой пропущенных данных к исходной ошибке. Чем чувствительнее сеть к данной переменной, тем хуже распознавание и, таким образом, тем больше отношение. Если отношение меньше либо равно единице, то отключение переменной не влияет на качество работы сети.

Когда чувствительности подсчитаны для всех переменных, они ранжируются, располагаясь в ряд по мере убывания значимости.

Таблица 5

Основные характеристики группы сетей (анализ спектра вибрации + качество шитья)

Архитектура	Производительность обучения	Тестовая производительность	Ошибка обучения	Тестовая ошибка	Обучение / Элементы	Входы	Скрытые
МП 15:17-13-7:1	0,993056	0,971831	0,187011	0,165471	ОР100, СГ20, СГ0b	15	13
РБФ 15:17-19-7:1	0,895833	0,788732	0,160177	0,19247	КС, КБ, ПО	15	19
Линейная 15:17-7:1	0,930556	0,929577	0,19032	0,191049	ПО	15	0
Линейная 13:15-7:1	0,930556	0,929577	0,194523	0,189162	ПО	13	0
РБФ 15:17-29-7:1	0,923611	0,84507	0,142588	0,188565	КС, КБ, ПО	15	29

В табл. 4 представлены результаты ранжирования всех входных переменных для пяти сетей.

Из таблицы видно, что для первой сети максимальную чувствительность имеет информационная частота 12,5 Гц (ранг 1), на втором месте находится резонансная частота ролика — 12050 Гц, а частоты 289, 7165, 14450 и 16900 Гц могут быть исключены как неинформативные (отношение для них меньше единицы). При этом следует отметить, что частоты, не дающие полезной информации при одной структуре сети, могут иметь хороший ранг при другой. Например, частота 14450 Гц для первой сети незначима, в то время как для пятой сети — ее ранг равен четырем.

Кроме того, в линейных сетях (вторая и третья) автоматически отброшены переменные, для которых программа Statistica не смогла определить ранг, соответственно у них уменьшено число входных нейронов (см. табл. 4).

На втором этапе исследований для распознавания, помимо непрерывных переменных (амплитуд спектральных составляющих спектра вибрации), использовалась одна номинальная — “Качество шитья”.

Для нового набора входных данных вновь была сформирована группа из пяти сетей, а затем и ансамбль. Основные характеристики новой группы сетей приведены в табл. 5, а процент правильно распознанных каждой сетью роликов — в табл. 6.

Как видно из таблиц, наилучшие показатели имеет сеть на основе многослойного персептрона, а добавление переменной “Качество шитья” позволило получить 100 % результат распознавания на четырех

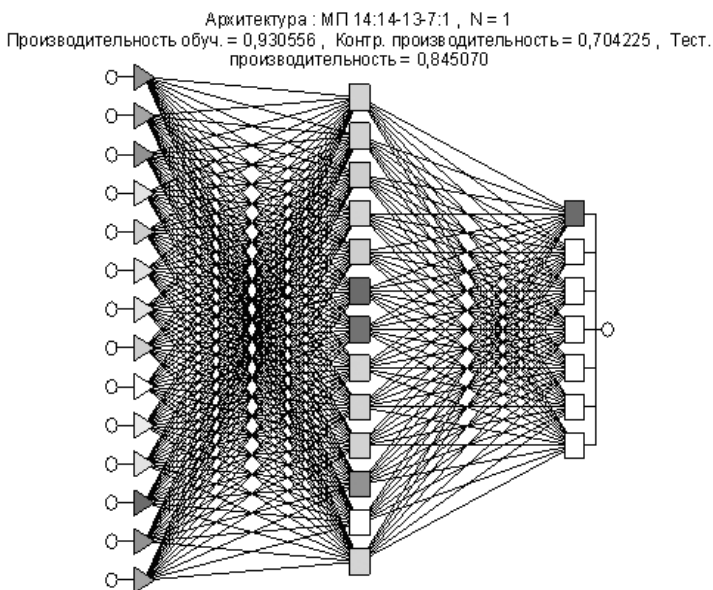


Рис. 9. Многослойный персептрон МП 14:14-13-7:1

Результаты распознавания (анализ спектра вибрации + качество шитья)

Сеть	Ролик диаметром, мм						
	50	49,92	49,86	49,67	49,55	49,50	49,36
1	100	100	95,12195	87,80488	100	97,56098	100
2	97,56098	100	75,60976	46,34146	87,80488	87,80488	90,2439
3	100	100	97,56098	58,53659	92,68293	100	95,12195
4	100	100	100	56,09756	92,68293	100	95,12195
5	95,12195	97,50000	82,92683	68,29268	80,4878	90,24390	100
Ансамбль из пяти сетей	100	100	100	65,85366	95,12195	97,56098	97,56098

роликах. Формирование ансамбля не улучшило качество распознавания. Очевидно, что ансамбли следует формировать только из тех сетей, которые показывают наилучший результат. Анализ чувствительности всех пяти сетей представлен в табл. 7. Интересно, что номинальная переменная “Качество шитья” вышла по значимости на первое место, а на втором для всех сетей оказалась резонансная частота ролика — 12 050 Гц.

Таблица 7

Ранг входной переменной при анализе чувствительности пяти сетей по 15 входам (анализ спектра вибрации + качество шитья)

Сеть	Частота, Гц														
	3,75	6,26	8,75	12,51	19,85	24,92	28,92	43,76	48,76	71,65	96,00	120,50	144,50	169,00	Качество шитья
1	4	9	7	3	12	14	10	15	6	13	8	2	5	11	1
2	7	6	9	3	5	14	11	8	10	13	15	2	4	12	1
3	4	5	6	3	7	10	12	9	8	11	14	2	13	15	1
4	5	4	6	3	7	10	13	9	8	12	—	2	11	—	1
5	8	7	9	3	5	11	12	13	10	14	15	2	4	6	1
Ансамбль	4	9	7	3	12	13	11	15	6	14	8	2	5	10	1

Далее попытаемся улучшить показатели первой сети. Поскольку диагностические признаки, имеющие ранг с 11 по 15 (см. табл. 7), не влияют на качество распознавания, можно их из рассмотрения исключить как незначимые. Это частоты 98, 249, 2 437, 7 165 и 16 900 Гц. Была сформирована соответствующая сеть, результаты распознавания которой представлены в табл. 8.

**Результаты правильного распознавания
(анализ спектра вибрации + качество шитья), %**

Диаметр ролика, мм	50	49,92	49,86	49,67	49,55	49,5	49,36
Сеть МП 10:12-12-7:1 Распознавание по спектру вибрации (9 параметров + качество шитья)							
% правильных вариантов	100	100	100	90,2439	100	100	100

Из табл. 8 видно, что исключение параметров, не дающих полезной информации, позволяет существенно улучшить результаты распознавания, а также сократить объем необходимых вычислений.

И, наконец, в табл. 9 приведены сравнительные результаты распознавания лучших вариантов сетей. Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что наилучшими результатами обладает сеть МП 10:12-12-7:1, использующая в качестве входных параметров 9 значимых амплитуд спектра виброускорения плюс “Качество шитья”.

Таблица 9

Сравнительные характеристики наилучших вариантов сетей

Диаметр ролика, мм	50	49,92	49,86	49,67	49,55	49,5	49,36
Сеть МП 14:14-13-7:1 Распознавание по спектру вибрации (14 параметров)							
% правильных вариантов	100	82,5	80,4878	90,2439	75,60976	82,92683	85,36585
Сеть МП 15:17-13-7:1 Распознавание по спектру вибрации (14 параметров + качество шитья)							
% правильных вариантов	100	100	95,12195	87,80488	100	97,56098	100
Сеть МП 10:12-12-7:1 Распознавание по спектру вибрации (9 параметров + качество шитья)							
% правильных вариантов	100	100	100	90,2439	100	100	100

Таким образом, использование нейросетевой технологии для диагностики кулачковых механизмов полиграфических машин показало ее высокую эффективность. Несмотря на то, что этот метод требует большого объема предварительных исследований, обучения сети, и определенную технологию подготовки данных, обучив нейронную сеть, можно в дальнейшем ее многократно использовать для выполнения диагноза на основе новых данных. Сделаем также смелое предположение, что эта методика будет столь же эффективна и при диагностике других элементов и механизмов полиграфических машин. В дальнейшем планируется продолжение работ в этом направлении.

Несомненным достоинством предлагаемого метода является возможность использования номинальных переменных, что позволяет применять в целях технической диагностики качественные показатели работы полиграфического оборудования, и даже субъективное мнение обслуживающего персонала, результаты опроса экспертов и т.д. (необходимо лишь разработать соответствующие методы формализации этих данных).

Современное автоматизированное полиграфическое оборудование оснащается встроенными системами функциональной диагностики, обеспечивающими не только контроль за ходом технологического процесса, но и позволяющими контролировать отказы электронного оборудования и отказы механических систем (в том числе эксплуатационные). Ведущие производители печатного оборудования, такие как Heidelberg, MAN Roland, KBA, Komori, Kolbus, оснащают выпускаемое оборудование специальными системами для сбора, обработки и анализа данных о работе машины, в том числе по техническому обслуживанию и отказам. Вся информация выводится на пульт управления машиной. Однако эти системы не предназначены для контроля износа оборудования.

Использование нейросетевых технологий дает возможность дополнить эти системы модулями контроля физического износа оборудования, что несомненно приведет к повышению качества выпускаемой продукции и снижению затрат на обслуживание.

На основе проделанной работы можно предложить следующий алгоритм построения диагностических систем с использованием ИНС.

1. Разбиение множества состояний объекта на классы (составление алфавита классов);
2. Выбор пространства признаков и описание на языке признаков классов состояний объекта либо путем непосредственной обработки исходной априорной информации, либо на основе методов обучения или самообучения;
3. Разработка технических средств определения признаков;
4. Разработка методов и алгоритмов обработки информации, построение ИНС;
5. Оценка эффективности системы распознавания в различных режимах ее функционирования и т.д.

Измерительная система с максимальным использованием средств вычислительной техники предполагает аналого-цифровое преобразование сигнала с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и реализацию остальных алгоритмов на ЭВМ.

На основе проведенных исследований предложена структура системы технической диагностики (СТД), предназначенной для определения технического состояния элементов привода полиграфических машин с использованием ИНС (рис. 10).

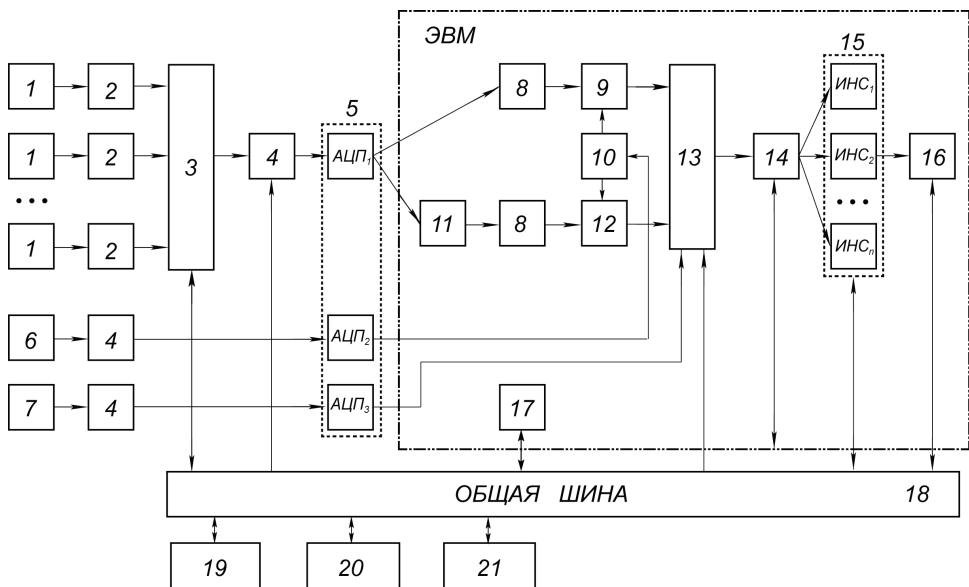


Рис. 10. Блок-схема системы виброакустической диагностики

Связь измерительной части СТД с объектом исследования осуществляется посредством совокупности датчиков виброускорения 1. Датчики преобразуют измеряемые физические величины в заряды, являясь первым звеном, представляющим информацию о состоянии объекта исследования. При этом число датчиков и их расположение на объекте определяются числом диагностируемых элементов и условиями, обеспечивающими оптимальное пространственное разделение виброакустических сигналов.

Для преобразования зарядов в электрическое напряжение и для усиления этого напряжения используют предварительные усилители 2. С выходов усилителей заряда сигналы поступают на входы коммутатора 3, осуществляющего пространственное разделение сигналов, поступающих от различных кинематических пар. При этом коммутатор подключает один из входных сигналов на свой выход в соответствии с кодом адреса, поступающего по общей шине 18 с выхода блока управления 17.

Особенностью вибрационных сигналов механизмов привода полиграфических машин является их широкий динамический диапазон, который необходимо согласовывать с относительно узким динамическим диапазоном измерительной части ИНС. С этой целью сигнал с выхода коммутатора подается на вход измерительного усилителя 4 (при использовании программы Statistica эта операция может осуществляться программно — после оцифровки). При этом измерительный усилитель, коэффициент усиления которого изменяется по программе блока управления, оценивает его значение и унифицирует сигнал по

уровню. Сигнал с выхода измерительного усилителя поступает для дальнейшей обработки на вход многоканального АЦП. Оцифрованный вибрационный сигнал поступает на вход ЭВМ со специальным программным обеспечением; ЭВМ управляет работой всех остальных компонентов в реальном времени и осуществляет анализ и визуализацию результатов анализа. В программном модуле 8 осуществляется быстрое преобразование Фурье — выделяются спектральные составляющие сигнала виброускорения. В модуле 10 проводится расчет значений информационных частот, зависящих от скорости вращения вала, затем в модуле 9 с учетом априорной информации об информационных частотах формируется спектр исследуемого сигнала виброускорения. Полученный спектр подается на вход модуля формирования вектора диагностических признаков 13. Параллельно с этим в модуле 11 формируется огибающая акустического сигнала, затем осуществляется быстрое преобразование Фурье, расчет частот, зависящих от скорости вращения вала, далее в модуле 12 с учетом априорной информации об информационных частотах формируется спектр огибающей исследуемого сигнала виброускорения. Полученный спектр также записывается на жесткий диск и может быть использован для формирования вектора диагностических признаков.

При диагностике цикловых механизмов для исключения зависимости измерения фазовых параметров сигнала от скоростного режима работы машины запись сигнала виброускорения должна осуществляться относительно начала цикла работы исследуемого механизма. Для этого используется датчик частоты вращения 6 и датчик начала цикла 7. Унификация сигналов данных датчиков осуществляется предварительными усилителями 4, которые преобразуют сигналы датчиков в прямоугольные импульсы заданной амплитуды и длительности. Преобразование фазы в цифровой код осуществляется с помощью АЦП 5. Результаты оцифровки передаются в модуль 13, в котором происходит дальнейшая обработка сигнала и вычисляются значения структурных параметров по заданной программе.

Для повышения отношения сигнал/шум может использоваться алгоритм синхронного накопления данных. Полученные спектры виброускорения и огибающих за один цикл работы машины поступают в модуль 13, в котором осуществляется последовательное суммирование значений амплитуд спектральных составляющих на информационных частотах, запоминание результатов и т.д. По окончании ввода и обработки заданного числа реализаций рассчитываются средние значения амплитуд спектральных составляющих на информационных частотах. Затем полученные значения через общую шину поступают в модуль коммутации 14.

Если в машине имеется встроенная система функциональной диагностики, то отдельные качественные показатели работы оборудования могут быть использованы при формировании вектора диагностических признаков. В этом случае данные системы функциональной диагностики также передаются в модуль формирования вектора диагностических признаков 13.

Модуль коммутации 14 в соответствии с выбранным для диагностики элементом передает сформированный вектор диагностических признаков в модуль ИНС 15. Там подключается ИНС соответствующая диагностируемому элементу и классифицируется состояние этого элемента, результат передается в модуль диагноза и прогноза развития дефекта 16. Результаты диагноза и прогноза фиксируются в запоминающем устройстве 21 и передаются в блок отображения информации 20 (для этого может быть использована встроенная система функциональной диагностики 19).

Представленная блок-схема может быть использована при построении системы диагностики для определения технического состояния таких элементов привода полиграфических машин, как кулачковые механизмы, подшипники качения, зубчатые передачи и т.п.

При проведении данных исследований использовался измерительный тракт, включающий в себя модули 1, 2, 5; унификация и формирование спектра осуществлялись с помощью программы Statistica, вектор диагностических признаков, содержащий пиковые значения амплитуд спектральных составляющих на информационных частотах и соответствующие значения номинальной переменной “Качество шитья”, формировали вручную. Полученные данные передавали в модуль ИНС Statistica. Анализ полученных результатов также осуществляли вручную. При проведении данных исследований были использованы также огибающие спектра виброускорения, однако объем журнальной публикации не позволяет привести полученные результаты. Отметим лишь, что использование огибающих не дает существенных преимуществ при диагностике механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л у г о в е ц В. А. Ниткошвейные машины и работа на них. – М.: Книга, 1969. – 284 с.
2. Р о т б а р т Г. А. Кулачковые механизмы. – Л.: Судпромгиз, 1960.
3. К р а с н и к о в В. Ф. Некоторые вопросы анализа и синтеза кулачковых механизмов с учетом точности их изготовления: Дис... канд. техн. наук. – М., 1965.
4. Ш о с т а ч у к Ю. А. Синтез механизма качающегося стола ниткошвейных полиграфических машин с упругой компенсирующей связью: Дис. ... канд. техн. наук. Львов: УПИ им. И. Федорова, 1984.

Статья поступила в редакцию 4.10.2008



Григорий Борисович Куликов родился в 1949 г., окончил Московский полиграфический институт в 1971 г. Канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой печатного и послепечатного оборудования Московского государственного университета печати. Автор 67 научных работ, в том числе 20 работ в области технической диагностики и виброакустики.

G.V. Kulikov (b. 1949) graduated from the Moscow Printing Institute in 1971. Ph. D. (Eng.), assoc. professor, head of department for printing and post-printing equipment of the Moscow State University for Printing. Author 67 publication in the field of technical diagnostics and vibroacoustics.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Федерального агентства по образованию Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Главный редактор журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” — ректор МГТУ имени Н.Э. Баумана, академик РАН, д-р техн. наук, профессор И.Б. Федоров.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

В серии “Приборостроение” (главный редактор серии — д-р техн. наук, профессор В.А. Матвеев) публикуются материалы по следующим основным направлениям: информатика и вычислительная техника; системы управления; лазерные и оптико-электронные системы; оптика; радиоэлектроника; навигационно-гироскопические системы; мехатроника и робототехника; биомедицинские технологии; конструирование и технология приборостроения.

В серии “Машиностроение” (главный редактор серии — д-р техн. наук, профессор К.Е. Демихов) публикуются материалы по проектированию сложных технических устройств и систем; моделированию процессов; фундаментальным проблемам машиностроения; динамике, прочности, надежности; автоматизации производства; контролю и диагностике; криогенной технике; энергетическому и транспортному машиностроению; технологии; экологии; экономике и организации производства.

В серии “Естественные науки” (главный редактор серии — д-р физ.-мат. наук, профессор А.Н. Морозов) значительное внимание уделяется работам в области математики, теоретической и экспериментальной физики, химии, теоретической механики, экологии, а также таким отраслям знаний, свойственным исследовательскому техническому университету XXI века, как лингвистика и культурология.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”:

105005 Москва, 2-я Бауманская, д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Телефоны: (499) 263-62-60; (499) 263-60-45; (499) 263-67-98. Факс: (495) 261-45-97

E-mail: press@bmstu.ru