

УДК 622.022:62.752

М. С. Островский, д.т.н., проф., Московский государственный горный университет

E-mail: kaftmr@msmu.ru

Вибрация как признак качества и изменения состояния горных машин

Изложены алгоритм и методика оценки вибрационного состояния машин, которая позволяет контролировать качество изготовления (ремонта) горных машин и следить за изменением их состояния на основании измерения параметров вибраций.

Ключевые слова: вибрация, горные машины, вибродиагностика, вибромониторинг, активный вибрационный контроль состояния.

M. S. Ostrovskiy

The Vibration as Indication of Quality and Change Condition of Mining Machines

Presented algorithm and the method of estimating the vibration of machine that allows you to control the quality of manufacturing (maintenance) of mining machines and monitor changes in their status on the basis of measurements of vibrations.

Keywords: vibration, mining machines, vibrodiagnostic, condition monitoring, active vibration control.

Различного рода дефекты машин, которые могут быть связаны с погрешностями при изготовлении, а также возникать и развиваться в процессе эксплуатации, приводят к возникновению вибраций. К числу таких дефектов относятся: дисбаланс роторов, несоосность валов, ослабление посадок, увеличение радиальных и осевых биений подшипниковых опор, неточность зубчатых передач.

Априорно понятно, что чем меньше уровень вибраций машины, тем, при прочих равных условиях, она более совершенна и выше точность её изготовления.

Уточним некоторые понятия. Под *вибрационным состоянием* машины будем понимать совокупность вибропараметров, измеренных в заранее установленных для данного типоразмера машин контрольных точках.

Уровнем *динамического качества* будем считать относительную величину вибрационных параметров, сопоставляемых с теми же параметрами базовой (эталонной) машины.

Вибродиагностика – процедура распознавания различных дефектов машины на основании измерения и анализа вибрационных параметров.

Вибромониторинг – это процедура периодических, регулярно проводимых по времени измерений параметров вибраций и анализа тенденций их изменения с целью предупреждения внезапных отказов.

Опыт эксплуатации горной техники [2] свидетельствует о том, что машины одного типоразмера, и даже произведенные одним и тем же изготовителем, имеют весьма большой разброс по ресурсу (рис. 1). Дисперсия разброса наработки до отказа (Рис. 1 (а)) определяется многими факторами, включая точностные параметры, определяемые технологией процесса изготовления и сборки машины. Поэтому для уменьшения дисперсии ресурса (Рис. 1 (б)) требуется модернизация производственной системы на базе применения наиболее прогрессивных машиностроительных технологий и совершенного станочного оборудования. Однако, к сожалению, фонд машиностроительного оборудования в Российской Федерации морально и физически изношен. Другая проблема горного машиностроения – дефицит высококвалифицированных кадров. Поэтому ожидать, что в ближайшие годы промышленность начнет выпускать продукцию с показателями надежности, характеризуемыми (Рис. 1 (б)) вряд ли представляется возможным.

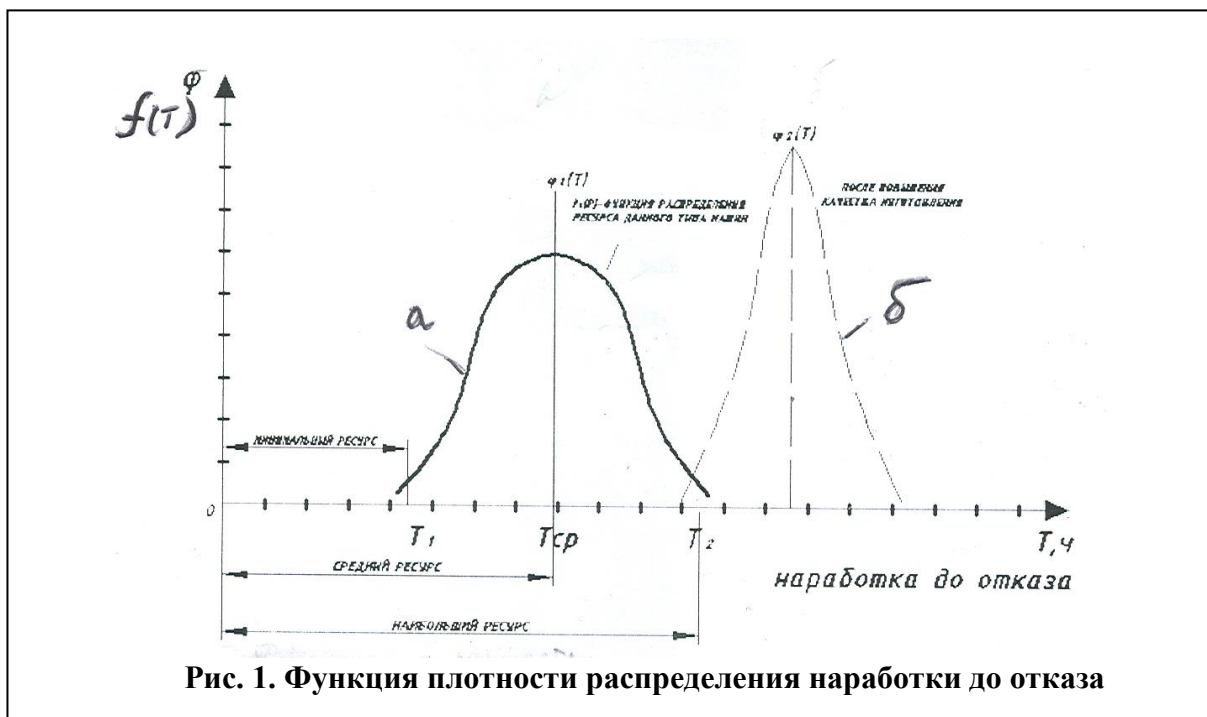


Рис. 1. Функция плотности распределения наработки до отказа

Нередко случается так, что у машин с низким ресурсом отдельные элементы и детали конструкции не вызывают особых сомнений относительно качества их изготовления. В связи с этим причиной низкой долговечности можно считать погрешность сборки. Одна из основных задач технологического процесса сборки – обеспечить точность относительного расположения исполнительных поверхностей деталей сборочной единицы в пространстве. Необходимо отметить, что выявить

дефекты сборки путем прямых измерений в реальных производственных условиях бывает весьма трудно. Поэтому нередки случаи, когда машины со скрытыми дефектами попадают на предприятия и, хотя они могут вначале выполнять свои функции, однако, наработка их до отказа непредсказуема.

Для предварительной безразборной оценки качества изготовления разных машин одного типоразмера предлагается использовать интенсивность вибраций (среднее значение виброскорости), измеренных в широком диапазоне частот: от 10 до 1000 Гц. в соответствии с ИСО 10816-1-97 [4]. В этом случае, после предварительного анализа конструкции объекта, определяются контрольные точки, несущие наибольшую информацию о машине. Количество таких точек, в соответствии с предлагаемой методикой, не ограничивается. Пусть, например, за некоторый промежуток времени изготовлено n машин. Выполнив измерения среднеквадратичного значения виброскорости в m точках, получим следующую матрицу.

$$\|a_{ij}\| (i = 1 \dots m; j = 1 \dots n), \quad (1)$$

где n – число машин, а m – число точек измерения.

Интенсивность вибрации должна быть равна или меньше некоторого максимально допустимого значения $P_{j\max}$. Нижний предел для таких параметров не устанавливается, а обуславливается принятыми технологическими процессами изготовления и сборки. В соответствии с разработанной Г.И. Солодом методикой [1], такие параметры относятся к параметрам, заданным в виде «не более...». При этом уровень вибрационного состояния i – й машины в j – й контрольной точке определяется по формуле:

$$k_{ij} = 1 - \frac{(a_{ij} - P_{j\min})^2}{(P_{j\max} - P_{j\min} + \Delta_j)^2}, \quad (2)$$

где a_{ij} – действительное значение интенсивности вибраций в j – й контрольной точке i -й машины; $P_{j\min}$ – минимально достижимое значение интенсивности вибраций в j – й точке, которое может быть достигнуто при полном соблюдении технологического регламента; $P_{j\max}$ – максимально допустимое значение интенсивности вибрации в этой точке.

Первоначально, до накопления необходимого объема экспериментальных данных, максимально допустимое значение интенсивности вибрации можно принять в соответствии с рекомендациями ИСО 10816-1-97 для различных классов машин.

Минимально достижимое значение интенсивности вибраций в j -й контрольной точке определяется как:

$$a_{\delta j} = \min_{1 \leq i \leq n} \{a_{ij}\}. \quad (3)$$

Совокупность $\{a_{ij}\} (j=1,2...m)$ в дальнейших расчетах используется как модель базовой машины, в которой реализованы лучшие показатели при сборке. В частном случае такая машина является гипотетической. Для такой машины уровень динамического качества по принятому показателю интенсивности вибраций равен единице.

Уровень динамического качества i – й машины в j – й контрольной точке определяется по формуле:

$$k_{ij} = \frac{a_{\delta j}}{a_{ij}}. \quad (4)$$

Формула (4) дает возможность оценить уровень состояния каждой из n машин во всех m контрольных точках.

Чтобы оценить состояние машины в целом, необходимо определить значение обобщенной вибрационной характеристики [1]. Тогда уровень динамического качества i – й машины, служащий для оценки качества сборки определяется по формуле:

$$K_i = \frac{\sqrt{m \sum_{j=1}^m \left[k_{ij} \left(\sum_{j=1}^m k_{ij} - k_{ij} \right) \right]^2}}{(m-1)^2 \sum_{j=1}^m k_{ij}}. \quad (5)$$

Выявление причин повышенных вибраций в отдельных точках осуществляется на втором этапе вибрационного контроля.

Метод решения задачи по выявлению дефектов и причин повышенной вибрации в отдельных точках заключается в сравнении текущего m -мерного вектора – спектра сигнала \vec{S}_m с эталонным $\vec{S}_{эм}$ и распознавании на этой основе дефектных состояний (задача вибродиагностики). Поэтому в контролируемой точке машины осуществляется частотный анализ вибросигнала, а обработка спектральных характеристик выполняется по той же методике оценки качества [2]. При этом в «матрицу качества» следует подставлять величины амплитуд гармоник вибросигнала для разных машин.

Таким образом, признаком совершенства конструкции машины и высокого качества ее изготовления является низкий уровень колебаний, генерируемых ею и воспринимаемых нами как сопутствующий фактор при выполнении своих функций. По мере износа деталей, инициатором которого часто оказывается фреттинг [3], в динамических свойствах машины начинают происходить неуловимые без применения специальной аппаратуры изменения. Например, нарушается центровка валов, в сопряженных деталях увеличиваются зазоры, изменяется характер посадок, нарушается баланс роторов, возможно заклинивание пар трения и т.п. Все эти факторы приводят к увеличению энергии механических колебаний, которая при рассеивании в отдельных элементах объекта

может приводить к возникновению резонансов и увеличению динамических нагрузок на подшипники. Возрастающие вибрации, в свою очередь, приводят к повышению интенсивности износа трибосопряжений. Причины и следствия усиливают друг друга, в результате чего наступает полный выход объекта из строя.

При развитии неисправности, в машине происходит изменение динамических процессов, а это отражается в изменении сил, действующих на детали машин. В результате происходит изменение, как уровня механических колебаний, так и формы их спектра [2].

Тот факт, что вибросигналы несут в себе большой объем информации о техническом состоянии машины, является основой применения результатов регулярных измерений и анализа механических колебаний в качестве показателя состояния технологического оборудования и индикатора необходимости проведения технического обслуживания. Причем, поскольку неисправности выявляются на ранних стадиях их развития, воздействия, требуемые для поддержания исправного технического состояния, во многих случаях оказываются весьма простыми и дешевыми. Например, практически часто бывает достаточно заменить смазку или ввести в нее легирующую присадку, чтобы вызвать залечивание дефектов, возникших на телах качения или беговых дорожках подшипника. Такой подшипник способен без его замены работать еще в течение длительного времени. Это означает, что надлежащим образом осуществляемый и организованный процесс регулярного измерения и анализа параметров вибраций открывает возможности перехода к индивидуальному техническому обслуживанию машины на основании прогнозирования его ресурса. Такой контроль ее ресурса будем называть *активным контролем технического состояния машин*.

Основой такого подхода является система вибромониторинга, т.е. периодический вибрационный контроль, включающий ЭВМ с соответствующим программным обеспечением, позволяющим следить за состоянием машины, ее узлов и механизмов в процессе эксплуатации.



Рис. 2. Схема системы вибромониторинга

Структурная схема системы вибромониторинга показана на рис. 2. Заметим, что главным действующим лицом этой системы является механик, хорошо знающий свое оборудование и все его «болевые точки» и который несет ответственность за его работоспособность.

В результате вибромониторинга анализируются трендовые характеристики изменения параметров вибросигнала, на основании которых и принимается решение о необходимости принятия тех или иных мер ремонтно-восстановительных воздействий.

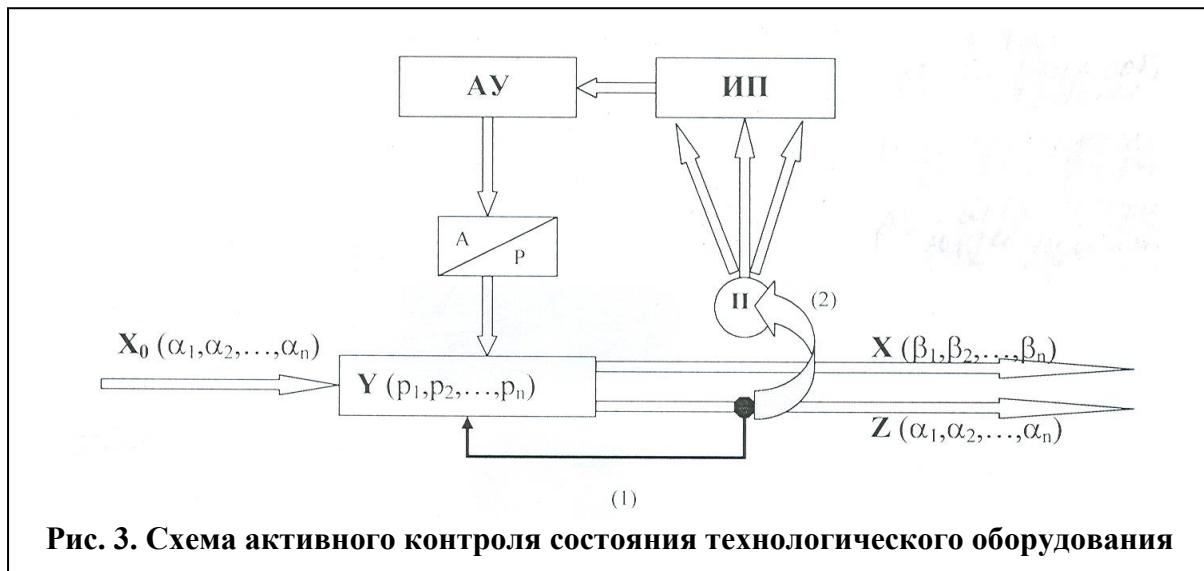


Рис. 3. Схема активного контроля состояния технологического оборудования

На рис. 3. Показан объект управления, представляющий собой некоторую машину, предназначенную для выполнения заданных функций. Техническое состояние машины будем характеризовать многомерным вектором $\vec{Y}(p_1, p_2 \dots p_n)$, где $p_1, p_2 \dots p_n$ – структурные параметры всех ее элементов, учитывающие точность их изготовления, качество поверхностей, трение и т.д.

Многомерный вектор $\vec{X}_0(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$ учитывает количество и свойства поступающего на вход машины продукта; вектор $\vec{X}(\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n)$ характеризует количество и свойства выходного продукта, а вектор $\vec{F}(t)$ учитывает внешние возмущающие воздействия. Многомерный вектор $\vec{Z}(\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n)$ отображает вибрационные состояния технологического оборудования. Здесь $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ – параметры вибраций, замеренные в различных точках машины. Влияние вибраций на изменение технического состояния машины, показано контуром обратной связи (1). В том случае, если с помощью датчиков (П) производится измерение вибраций, для чего служит измерительный прибор (ИП), и производится анализ вибраций объекта (АУ), а также осуществляется автоматически или в ручную (А или Р), управляющее воздействие на машину с целью поддержания

динамического качества на заданном уровне, то при этом реализуется контур обратной связи (2). В реализации этого контура обратной связи и состоит задача вибромониторинга.



Рис. 4. Алгоритм технологии вибромониторинга

Предложенный алгоритм трехуровневого контроля при вибромониторинге может быть применен на всех стадиях жизненного цикла машины: при ее разработке, доводки машины по результатам виброконтроля опытного образца (улучшения динамических характеристик конструкции); при производстве – контроль качества изготовления (входном контроле комплектующих, например, электродвигателей, редукторов и контроль собранных изделий), и, наконец, на стадии эксплуатации (контроль качества монтажа и ремонта, контроль точности регулировки), а также в процессе осуществления технического обслуживания на основании индивидуального слежения за состоянием машин и прогнозированием их ресурса. Схема трехуровневого алгоритма вибромониторинга приведена на рис. 5.

На первом уровне контроль производится по среднеквадратичному значению виброскорости в широкой области частот (от 10 до 1000 Гц) согласно рекомендациям стандарта ISO 2373 (допусковый предварительный контроль). В случае обнаружения на первом уровне признаков ухудшения состояния объекта осуществляется переход на второй уровень контроля. При этом осуществляется частотный анализ вибросигнала с помощью быстрого Фурье-преобразования (БФП). Далее весь частотный диапазон разбивается на m частотных зон, в каждой из которых находится обобщенное значение спектральной характеристики.

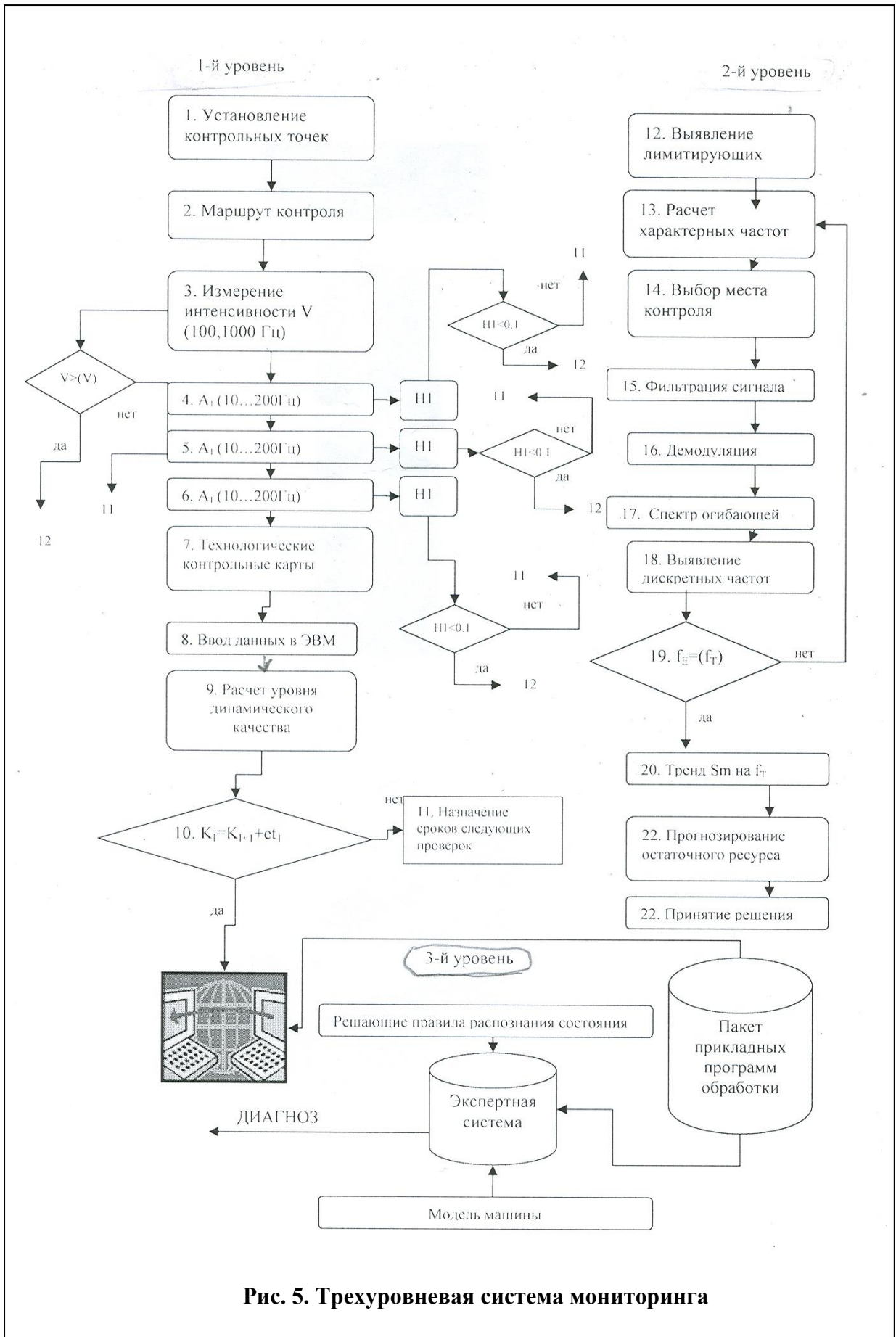


Рис. 5. Трехуровневая система мониторинга

Третий (уточняющий) этап виброконтроля выполняется на основании узкополосных спектральных характеристик, полученных с наибольшей разрешающей способностью, позволяемой прибором (не менее 1200 линий) статистическими методами осуществляется распознавание образов. Задачей этого этапа является точная локализация источников вибраций. Третий этап по существу и представляет собой вибродиагностику.

Применение системы вибромониторинга позволяет:

- резко уменьшить вероятность аварий;
- предотвратить внезапные отказы оборудования;
- исключить необходимость демонтажа, разборки и вскрытия оборудования для проверки его технического состояния;
- повысить экономические показатели работы предприятий за счет сокращения потерь продукции и сокращения затрат на ремонт и запасные части;
- своевременно принять эффективные меры по повышению ресурса лимитирующих узлов (например, замена смазки или введение присадок; применение технологий модифицирующих физико-механические свойства контактирующих поверхностей);
- перейти от календарного планового техобслуживания к обслуживанию по прогнозируемому состоянию;
- повысить динамическое качество машин, снизить уровень их шума и вибрации.

При этом затраты, связанные с внедрением системы вибромониторинга, относительно невелики и окупаются, как правило, в течение 6-7 месяцев.

Условием достижения указанных выше преимуществ является правильная организация системы технического обслуживания и ремонта предприятия, основанная на активном контроле и прогнозировании технического состояния оборудования. При этом очень важно иметь подготовленный персонал, обученный технологии виброконтроля состояния машин и хорошо понимающий цели и задачи своей деятельности.

Список литературы

1. **Солод Г.И.**, Основы квалиметрии / М.: МГИ, 1991.
2. **Островский М.С.** Триботехнические основы обеспечения качества функционирования горных машин / М.: МГИ, 1994.
3. **Островский М.С.** Фреттинг как причина снижения надежности горных машин.
4. **Стандарт ИСО 10816-97.** Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибраций на невращающихся частях.