



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРА ОГИБАЮЩЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

В. А. МАРТЫНОВСКИЙ

Рассмотрена диагностика подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов по сигналу вибрации подшипника, в основном, высокочастотной. Показано, что анализ спектра огибающей высокочастотной вибрации позволяет выявлять дефекты сборки, а также оценивать уровень и прогнозировать развитие дефектов на самой ранней стадии их развития.

The paper deals with diagnostics of bearings with detection and identification of defects by the bearing vibration signal, mainly, high frequency. It is shown that analysis of the spectrum of the envelope of high-frequency vibration allows revealing assembly defects, as well as evaluation of the level and forecasting defect propagation at the earliest stage of their propagation.

Практические задачи диагностики подшипников качения в процессе их эксплуатации решаются, как правило, одним из трех основных способов. В первом используются алгоритмы обнаружения дефектов по росту температуры подшипникового узла, во втором — по появлению в смазке продуктов износа, а в третьем — по изменению свойств вибрации (шума). Наиболее полная и детальная диагностика подшипников с обнаружением и идентификацией дефектов на ранней стадии их развития выполняется по сигналу вибрации подшипника, в основном, высокочастотной.

Природа вибрации подшипников качения.

Подшипник качения является источником сил двух основных видов — кинематических и сил трения. У части дефектных подшипников качения иногда появляется и третий вид сил — ударного типа. Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами.

1. Частотой перекачивания f_n тел качения по наружному кольцу (наличие этой составляющей вибрации определяется тем, что вал «подпрыгивает» на каждом теле качения):

$$f_n = f_c Z = \frac{1}{2} f_{в.р} \left(1 - \frac{d_{т.к}}{d_c} \cos \alpha \right) Z \approx 0,4 f_{в.р} Z,$$

где $f_{в.р}$ — частота вращения ротора; f_c — частота вращения сепаратора; $d_c \approx (d_n + d_b)/2$ — диаметр сепаратора (диаметр окружности, проходящей через центры тел качения), d_n , d_b — наружный и внутренний диаметры подшипника; $d_{т.к}$ — диаметр тела качения; α — угол контакта тел качения с дорожками качения; Z — число тел качения.

2. Частотой перекачивания f_b тел качения по внутреннему кольцу (эта составляющая вибрации появляется, если вал (внутреннее кольцо подшипника) не идеально круглый, а, например, имеет локальный износ; тогда вал «проваливается» на каждом теле качения, когда оно попадает в зону износа)

$$f_b = (f_{в.р} - f_c) Z = \frac{1}{2} f_{в.р} \left(1 + \frac{d_{т.к}}{d_c} \cos \alpha \right) Z \approx 0,6 f_{в.р} Z.$$

При этом всегда $f_n + f_b = Z f_{в.р}$.

3. Частотой вращения сепаратора f_c (эта составляющая вибрации появляется, если одно из тел качения имеет меньший или больший диаметр; тогда вал «проваливается» или «подпрыгивает», когда это тело оказывается под ним)

$$f_c = \frac{1}{2} f_{в.р} \left(1 + \frac{d_{т.к}}{d_c} \cos \alpha \right) = \frac{1}{Z} f_n \approx 0,4 f_{в.р}$$

4. Частотой вращения тела качения $f_{т.к}$ (если тело качения не круглое, а имеет гранность, то с этой частотой вал либо «подпрыгивает», либо «проваливается»)

$$f_{т.к} = \frac{1}{2} f_{в.р} \frac{d_c}{d_{т.к}} \left(1 + \frac{d_{т.к}^2}{d_c^2} \cos^2 \alpha \right).$$

В вибрации проявляются обычно четные гармоники этой частоты.

Рассмотренные выше частоты соответствуют силам кинематического происхождения. Если подшипник новый и все поверхности качения «круглые», то можно ожидать только вибрацию на частотах $k f_n$ (неровная «дорога»). Если есть дефекты, причем достаточно большие, то вал будет «подпрыгивать», при этом каждый вид дефекта вызывает колебания определенной частоты.

Методы диагностики подшипников качения. В зависимости от вида дефекта в низкочастотной части спектра будет наблюдаться рост уровня вибрации на частотах, характерных для бездефектного подшипника, или же будут появляться новые составляющие на частотах, рассмотренных выше, и/или на их кратных гармониках или на их субгармониках, и/или на частотах, представляющих собой сочетание известных составляющих вибрации подшипника. Появление в низкочастотной области спектра гармонических составляющих, указывающих на наличие различных видов дефектов подшипника, дает возможность идентифицировать вид дефектов, а наблюдение за ростом уровней этих составляющих позволяет в ряде случаев оценить степень развития этих дефектов. Таким образом, каждый вид дефекта характеризуется определенным набором составляющих с повышенным уровнем вибрации, что и является диагностическим признаком конкретного вида дефекта. Этим обус-



ловлен первоначальный большой интерес к анализу низкочастотной вибрации для диагностики подшипников. Однако следует отметить и ряд недостатков, присущих диагностике по составляющим низкочастотного спектра вибрации.

1. *Сложность выделения составляющих вибрации, указывающих на наличие дефектов.* Из-за слабого затухания при распространении низкочастотной вибрации она приходит к точке измерения от всех узлов механизма, соседних машин и даже от проходящего вблизи транспорта. Обычно низкочастотная часть спектра вибрации сильно «затемнена» наличием большого числа составляющих как от контролируемой машины, так и от другого оборудования. При этом часть составляющих, не принадлежащих диагностируемому узлу машины, может совпадать по частоте с его составляющими, что значительно затрудняет обнаружение и идентификацию дефектов.

2. *Сложность обнаружения зарождающихся дефектов.* Это обусловлено тем, что на низких частотах механизм колеблется как единое целое, и для того, чтобы его раскачать, нужны довольно большие силы, что характерно для развитых дефектов, а дефекты в начальной стадии их развития практически не проявляются в низкочастотной области спектра.

3. *Невозможность диагностики по однократным измерениям.* При анализе низкочастотных составляющих решение о наличии дефектов принимается исходя из отличия уровней составляющих вибраций от их эталонных значений, полученных для исправных объектов. Однако такой прием может эффективно использоваться при постоянном мониторинге уровня вибрации контролируемой машины или оборудования, но не позволяет оценить их техническое состояние по однократным измерениям. Это обусловлено тем, что абсолютные значения уровней низкочастотных составляющих даже для однотипных машин одного выпуска могут отличаться во много раз. Поэтому эталонные уровни низкочастотных составляющих вибрации у каждой машины свои.

4. *Наличие возможных резонансов диагностируемой машины.* Составляющие спектра уровня вибраций, возникающих в машине при появлении того или иного вида дефекта, могут совпасть с часто имеющимися в низкочастотной области резонансными частотами собственных колебаний отдельных узлов машин, что приводит к резкому росту уровня вибрации на соответствующей частоте. Это обстоятельство также может существенно исказить результаты диагноза или даже привести к ложным заключениям.

На средних частотах, в отличие от низких, машина колеблется уже не как единое целое. В этом случае ее можно представить в виде системы с распределенными параметрами. Отличительной особенностью вибрации на средних частотах является наличие большого числа собственных форм колебаний не только целой машины или оборудования, но и отдельных их узлов, что затрудняет определение амплитуд вынуждающих сил по результатам измерения амплитуды колебаний на оп-

ределенной частоте. Это усложняет выделение диагностической информации, заложенной в пространственных характеристиках вибрации. Поэтому параметры вибрации в области средних частот редко используются в качестве диагностических. Исключением является случай, когда у исправного объекта одна из составляющих вибрации в области средних частот отсутствует и появляется лишь при наличии определенного вида дефекта.

Затруднения при выделении диагностической информации из низко- и среднечастотной вибрации, возможные ее искажения и сложность локализации дефекта — все это определяет повышенный интерес к высокочастотной вибрации. Одним из определяющих преимуществ использования этой области частот является быстрое затухание высокочастотной вибрации в процессе ее распространения, что позволяет «увидеть» только диагностируемый узел. В области высоких частот проявляется действие сил трения и микроудары в подшипнике качения, возбуждающие не гармонические колебания, а случайные. На первый взгляд, в высокочастотной области спектра диагностическая информация практически отсутствует в отличие от низкочастотной области, богатой гармоническими составляющими, непосредственно связанными с конструктивными параметрами диагностируемых узлов, а также наличием определенных видов дефектов. Но оказывается, что силы трения, возбуждающие высокочастотную случайную вибрацию, стационарны только при отсутствии дефектов. В бездефектных узлах трения стационарна и случайная высокочастотная вибрация — ее мощность постоянна во времени. При наличии дефектов силы трения, а также мощность вибрации изменяются во времени, т. е. появляется модуляция мощности высокочастотной вибрации (рис. 1).

Глубину модуляции m случайного амплитудно-модулированного сигнала вибрации $x(t)$ можно определить в процентах, используя среднее значение огибающей:

$$m = \frac{\bar{x}_{\max}(t) - \bar{x}_{\min}(t)}{\bar{x}_{\max}(t) + \bar{x}_{\min}(t)} \cdot 100 \%,$$

где $\bar{x}_{\max}(t)$, $\bar{x}_{\min}(t)$ — соответственно максимальное и минимальное значение огибающей сигнала.

При изменении вида дефекта частота модуляции изменяется. Чем больше степень развития дефекта, тем больше глубина модуляции. Следовательно, частота модуляции определяет вид дефекта, а глубина модуляции — степень его развития (рис. 2).

Таким образом, наиболее полная информация содержится в огибающей высокочастотного сигнала (рис. 3). По ней можно наблюдать за развитием одновременно всех имеющихся дефектов по уровню превышения отдельных гармонических составляющих на определенных частотах над фоном. Таким образом, появляется возможность определения глубины модуляции для каждого из имеющихся дефектов. Это позволяет определять степень развития всех дефектов и идентифицировать их вид. Следовательно, можно прогнозировать состояние ди-

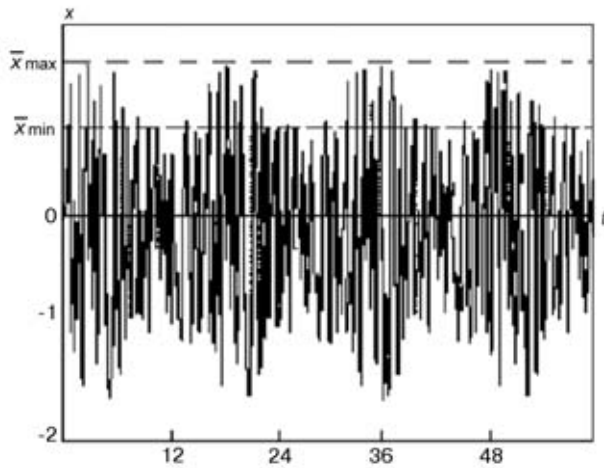


Рис. 1. Случайный амплитудно-модулированный сигнал

агностируемого узла, так как каждый вид дефекта имеет свою скорость развития. В таблице приведены диагностические признаки дефектов подшипников качения, т. е. частоты составляющих спектра огибающей высокочастотной вибрации. Одиннадцать видов перечисленных дефектов определяются методом огибающей, и только недостаток или избыток смазки, а также ухудшение ее свойств обнаруживаются по изменению общего уровня высокочастотной вибрации.

К достоинствам метода анализа параметров модуляции высокочастотной случайной вибрации, т. е. спектрального метода огибающей, следует отнести следующие.

1. *Возможность локализации дефекта.* Она определяется свойством высокочастотной вибрации быстро затухать при распространении, что позволяет оценивать техническое состояние именно того узла, вблизи которого установлен датчик вибрации. По этой же причине спектр огибающей высокочастотной вибрации не «затемнен» составляющими от других узлов контролируемой машины или оборудования, что повышает достоверность диагноза.

2. *Высокая чувствительность.* При спектральном анализе низко- и среднечастотной вибраций для достоверного обнаружения развитых дефектов нужны относительно большие силы, возбуждающие вибрацию, в то же время в случае высокочастотной вибрации для изменения ее параметров требуются гораздо меньшие силы. Поэтому наличие даже зарождающихся дефектов приводит к появлению модуляции высокочастотной вибрации контролируемого узла, а следовательно, к появлению гармонических составляющих в спектре огибающей этой вибрации.

3. *Высокая достоверность определения вида и величины каждого из дефектов.* Если сравнивать метод огибающей со спектральными методами анализа низко- и среднечастотной вибраций, то высокая достоверность определяется использованием не абсолютных значений составляющих вибрации, как при спектральном анализе, а относительных (парциальных глубин модуляции). При изменении уровня вибрации, например, из-за изменения коэффициента усиления или изменения чувствительнос-

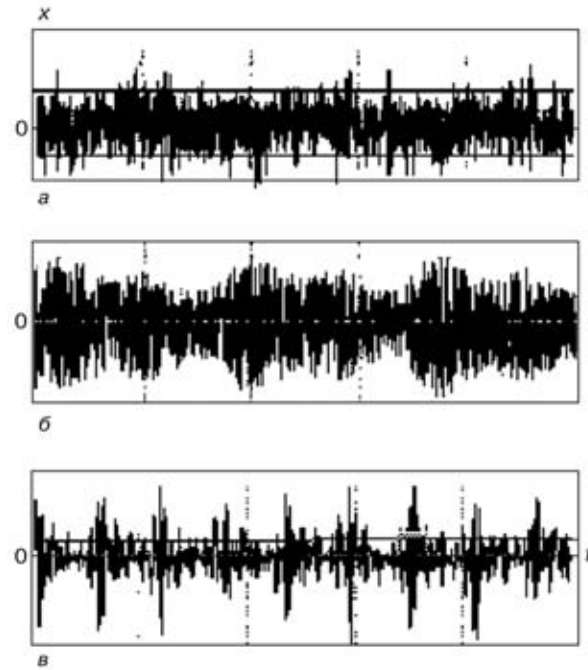


Рис. 2. Временные сигналы высокочастотной вибрации подшипников качения: а — исправного; б — с износом поверхности трения; в — с раковинной на поверхности качения

ти датчика, глубина модуляции, обусловленная появлением дефекта, остается неизменной. В отличие от известного метода анализа высокочастотной вибрации, названного методом резонансной демодуляции, где рассматриваются собственные колебания контролируемого узла, при использовании метода огибающей анализируются вынужденные колебания, полностью передающие характеристики колебательных сил и тем самым — свойства и отличительные признаки дефектов, что также по-

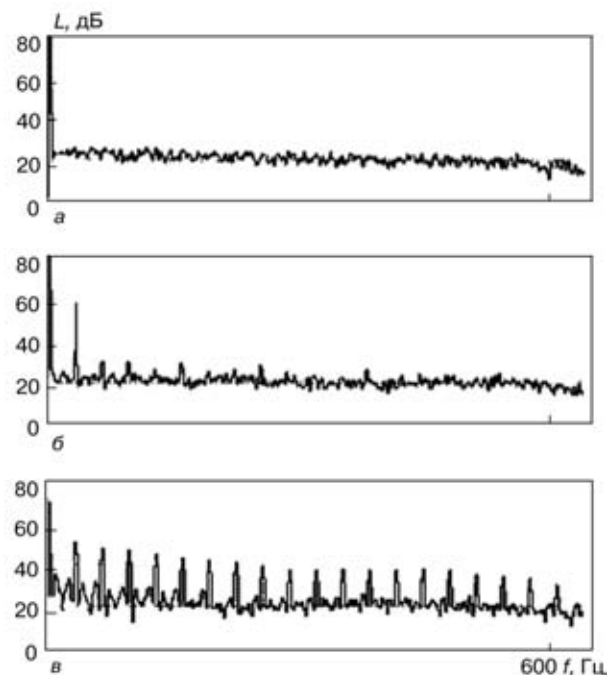


Рис. 3. Спектры огибающей сигналов высокочастотной вибрации подшипников качения: а — исправного; б — с износом поверхности трения; в — с раковинной на поверхности качения



Частоты составляющих спектра огибающей сигнала вибрации, используемых для обнаружения и идентификации дефектов подшипников качения по однократным измерениям вибрации

Порядковый номер	Вид дефекта	Частота основных признаков	Частота дополнительных признаков
1	Обкатывание наружного (неподвижного) кольца	$f_{в.р}$	Нет роста ВЧ
2	Неоднородный радиальный натяг	$2kf_{в.р}$	»»
3	Перекося наружного (неподвижного) кольца	$2f_n$	—
4	Износ наружного кольца	f_n	Рост ВЧ
5	Раковины, трещины на наружном кольце	kf_n	»»
6	Износ внутреннего кольца	$kf_{в.р}$	»»
7	Раковины, трещины на внутреннем кольце	kf_v	$kf_{в.р}, k_1 \pm k_2 f_{в.р}$
8	Износ тел качения и сепаратора	kf_c	$k(f_{в.р} - f_c)$, рост ВЧ
9	Раковины, сколы на телах качения	$2kf_{т.к}$	$2k_1 f_{т.к} \pm k_2 f_c$, рост ВЧ
10	Сложный (составной) дефект	$kf_n + k_1 f_c$ или $kf_n + k_1 f_v$ или $kf_n + k_1 f_{в.р}$ или $kf_n + f_{в.р}/k_2$	Рост ВЧ
11	Проскальзывание кольца	$kf_{в.р}, k > 10$; рост ВЧ	Нет других составляющих
12	Дефект смазки	Рост ВЧ	Нет сильных дефектов поверхностей качения
13	Неидентифицированный дефект	Рост других гармонических составляющих	

Примечание. ВЧ — высокочастотная область спектра вибрации; $k = 1, 2, 3, \dots$; $k_1 = 1, 2, 3, \dots$; $k_2 = 1, 2, 3, \dots$.

вышает достоверность идентификации вида дефекта и степени его развития.

4. *Возможность постановки диагноза и прогноза по однократным измерениям вибрации.* Она обусловлена использованием относительных измерений, т. е. измерений глубин модуляции высокочастотной вибрации. Знание предельных глубин модуляции, характеризующих каждый из возможных сильных дефектов, и скоростей развития каждого вида дефекта позволяет не только определять вид и степень развития каждого дефекта, но и прогнозировать время безаварийной работы контролируемого узла без предварительного построения эталонов. Исключение составляет только дефект смазки, для определения которого создается эталон (или по нескольким первым измерениям, обычно по трем, или по группе однотипных машин, обычно не менее пяти).

Таким образом, метод огибающей высокочастотной вибрации позволяет обнаружить, идентифицировать и прогнозировать состояние подшипников качения с дефектами, сопровождающимися появлением модуляции высокочастотной вибрации из-за изменения сил трения, а также высокочастотных импульсов из-за возникновения микроударов. Метод анализа высокочастотной вибрации, обусловленной только наличием микроударов, получивший название «метод ударных импульсов», широко известен еще с 1968 г. Основной вклад в развитие этого метода принадлежит фирме SPM. Оказывается, что наличие даже зарождающихся дефектов в подшипнике приводит к появлению высокочастотных импульсов, а следовательно, увеличению пиковых уровней в высокочастотном сигнале вибрации (при этом его среднеквадратичные уровни в общем случае могут даже оставаться неизменными). Таким образом, отношение пикового и среднеквадратичного значений, которое называется пик-фактором, может служить диагностическим признаком. В случае отсутствия ударных импульсов значение пик-фактора высокочастотной ви-

брации подшипника качения меньше пяти, а при наличии ударных импульсов этот показатель может быть выше десяти.

Метод ударных импульсов и реализующие его достаточно простые приборы, измеряющие пик-фактор (или некоторые его модификации, например, крест-фактор и т. п.) вибрации в диапазоне частот выше 25 кГц, широко используются для контроля состояния подшипников качения. Этот метод является чувствительным даже к зарождающимся дефектам, однако не все дефекты в подшипниках качения сопровождаются появлением ударных импульсов. Так, дефекты, не приводящие к продавливанию слоя смазки (например, дефекты монтажа), не могут быть обнаружены методом ударных импульсов. Но хорошо известно, что дефекты сборки в значительной степени влияют на ресурс подшипников качения. Ввиду того, что ударные импульсы могут появляться при различных видах дефектов, а также и при изменении качества смазки, рассматриваемый метод не дает возможности идентифицировать вид дефекта. Кроме того, метод ударных импульсов не позволяет осуществлять долгосрочный прогноз ввиду невозможности определять вид дефекта, поскольку различные дефекты имеют разные скорости развития. Следовательно, метод ударных импульсов позволяет контролировать состояние подшипников качения, но не диагностировать его.

Из всех приведенных методов наиболее эффективным и чувствительным методом диагностики подшипников качения является метод анализа спектра огибающей его высокочастотной вибрации. Однако если подшипник находится в стадии деградации и в нем имеется целый ряд развитых дефектов, модуляция его высокочастотной вибрации приобретает случайный характер в результате суперпозиции многих модуляционных процессов. В этом случае высокочастотная вибрация вновь ставится стационарным процессом с постоянной во времени мощностью. Поэтому для того, чтобы по одиночным



измерениям обнаружить и предаварийные состояния подшипников, наиболее целесообразно, кроме метода огибающей, использовать и спектральный анализ их низко- и среднечастотной вибраций. В этом случае окончательный диагноз ставится по результатам совместного спектрального анализа вибрации (при этом эталон может быть построен по группе однотипных машин, обычно из пяти машин) и спектрального анализа огибающей ее высокочастотных составляющих.

Следует отметить, что диагностические признаки, характеризующие вид дефекта подшипника или определенное сочетание дефектов, могут определенным образом изменяться в зависимости от вида нагрузки, действующей на подшипник. Можно выделить четыре основных вида нагрузки:

1) радиальную статическую на одну точку поверхности качения (на одно тело качения, например, подшипник качения в машине горизонтального исполнения);

2) ту же на две противоположные точки поверхности качения, например, в подшипнике с перекосом наружного кольца;

3) ту же на все тела качения, например, в машине вертикального исполнения или с осевым поджатием подшипника;

4) вращающуюся, действующую на одно тело качения, например, подшипник качения в машине с неуравновешенным ротором или боем вала.

Кроме возможного изменения нагрузки на вращающийся узел существует еще целый ряд особенностей, которые следует учесть при постановке диагноза и прогноза.

1. Часть диагностических признаков, используемых для идентификации одного вида дефекта, может совпадать с диагностическими признаками другого вида, что требует дополнительно оценивать вероятность правильного определения вида каждого дефекта.

2. Возможно изменение частоты вращения подшипника, которая определяет значения всех без исключения частот подшипниковой вибрации и кратных им частот.

3. Возможны ошибки при определении конструктивных характеристик диагностируемого узла, например, числа тел качения или диаметров поверхностей качения в определенном типе подшипника, что искажает расчетные значения ряда подшипниковых частот, а следовательно, и диагностических признаков.

4. Характеристик сопрягаемых узлов (например, их дефектов) на нагрузки, передаваемые на диагностируемый подшипник, что в свою очередь может изменить свойства процессов, модулирующих вибрацию подшипника.

Учет всех перечисленных особенностей приводит к тому, что для постановки только одного диагноза следует проанализировать более пятисот



Рис. 4. Простейшая переносная система диагностики вращающегося оборудования производства АО ВАСТ: 1 — сборщик данных — анализатор СД-12; 2 — персональный компьютер типа Notebook; 3 — интерфейсный кабель для обеспечения связи между анализатором и компьютером; 4 — датчик вибрации

различных признаков и параметров, а это возможно при использовании систем диагностики с искусственным интеллектом.

Технические средства для диагностики подшипников качения по вибрации. Диагностика технического состояния по вибрации широко и очень эффективно используется на практике. Можно выделить системы диагностики и прогноза состояния роторного оборудования, разработанные АО ВАСТ (г. Санкт-Петербург) совместно с фирмой Vibro Tek, Inc. Они позволяют оценивать техническое состояние не только подшипников качения, основные методы диагностики которых были рассмотрены выше, но и такие узлы, как подшипники скольжения, роторы, механические передачи, в т. ч. зубчатые и ременные, машины постоянного тока, синхронные машины, асинхронные двигатели, насосные агрегаты, компрессоры, турбины и т. д.

Структура простейшей переносной системы автоматической диагностики вращающегося оборудования показана на рис. 4. Для машин, частота вращения которых в момент измерения вибрации точно неизвестна, используется, кроме датчика вибрации, еще и датчик оборотов ротора.

ВЫВОДЫ

Анализ спектра огибающей высокочастотной вибрации является эффективным методом диагностики подшипников качения, позволяющим:

1) выявлять дефекты сборки;

2) выявлять, оценивать уровень дефектов эксплуатации и прогнозировать их развития, причем на самой ранней стадии их развития.

Такой анализ рационально проводить с использованием компьютерных программ автоматической диагностики.