

УДК 621.039.6

ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ УЗЛОВ МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ВИБРОСИГНАЛОВ

М.А. Иванова, А.Г. Соколова, Г.В. Долаберидзе, Т.В. Медведева

Введение. Отработку алгоритмов диагностирования машинного оборудования без проведения сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований в полевых условиях в ряде случаев целесообразно проводить путем имитационного моделирования вибросигналов. Воздействие на виброакустический сигнал эксплуатационных дефектов при развитии деградиционных процессов в узлах машинного оборудования иногда полезно моделировать в виде временной последовательности случайных импульсов. Это связано с тем, что усталостный износ контактирующих поверхностей сопровождается появлением в вибросигнале выбросов, амплитуда и частота следования которых определяются видом дефекта и степенью его развития. Для раннего обнаружения эксплуатационных повреждений машин предлагается использовать метод дискриминантного анализа клипированных по амплитуде вибросигналов [1-3], обладающий рядом достоинств по сравнению с известными методами, в связи с чем в докладе приводятся результаты сравнительного анализа возможностей дискриминантного и других методов обработки сигналов при обнаружении зарождающихся дефектов.

Предлагаемый способ обнаружения дефектов связан с решением задачи о выбросах, а именно, с определением среднего числа выбросов случайного процесса, превышающих по амплитуде заданный уровень, называемый порогом клипирования сигнала по амплитуде, средней длительности выбросов и средней величины различных амплитудных параметров сигнала. Для оценки возможностей предлагаемого метода построены модели вибросигналов, имитирующие воздействие на вибрационный сигнал эксплуатационных повреждений контактирующих поверхностей типа задира, абразивного износа, питтинга.

На практике для обнаружения эксплуатационных повреждений на ранней стадии чаще всего применяют следующие стандартные характеристики вибросигнала: среднеквадратическое значение СКЗ (совпадающее со стандартным отклонением σ при нулевом математическом ожидании), пик-фактор РР, коэффициент эксцесса Е. Модифицированный статистический анализ сигналов - дискриминантный анализ - предполагает расчет безразмерных амплитудных дискриминантов I_D как функцию отношения статистических характеристик текущего клипированного вибросигнала $(x_i^{(T)} - \Pi)^C$ к аналогичным эталонным характеристикам $(x_j^{(H)} - \Pi)^C$ в исходном (или нормальном) состоянии механизма с учетом числа отсчетов сигнала K , амплитуда которых превышает заданный порог клипирования Π .

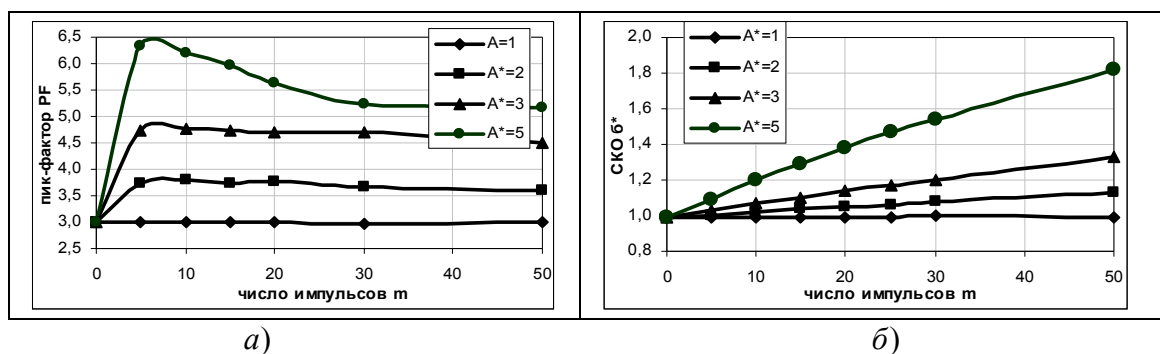
$$I_D = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^{(T)} - \Pi)^C}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j^{(H)} - \Pi)^C} \cdot \left(\frac{K^{(T)}}{K^{(H)}} \right) \quad (1)$$

Показатель степени C используется для обозначения порядка моментной характеристики клиппированного сигнала: «математического ожидания» при $C=1$, которому соответствует индекс превышения порога клиппирования по амплитуде, - дискриминант $I_D = I_s$; «дисперсии» при $C=2$ и, соответственно, - дискриминант $I_D = I_d$; «квазиэкссесса» при $C=4$ и, соответственно, - дискриминант $I_D = I_e$, обладающих различной чувствительностью к зарождающимся дефектам, и тем большей, чем больше порядок C . Для обнаружения дефекта на ранней стадии развития наиболее эффективны дискриминанты I_d и I_e . Для повышения чувствительности дискриминантов к выбросам в формулу (1) введено отношение числа выбросов, превышающих порог клиппирования Π в текущем и исходном состояниях объекта – (K^T/K^H) .

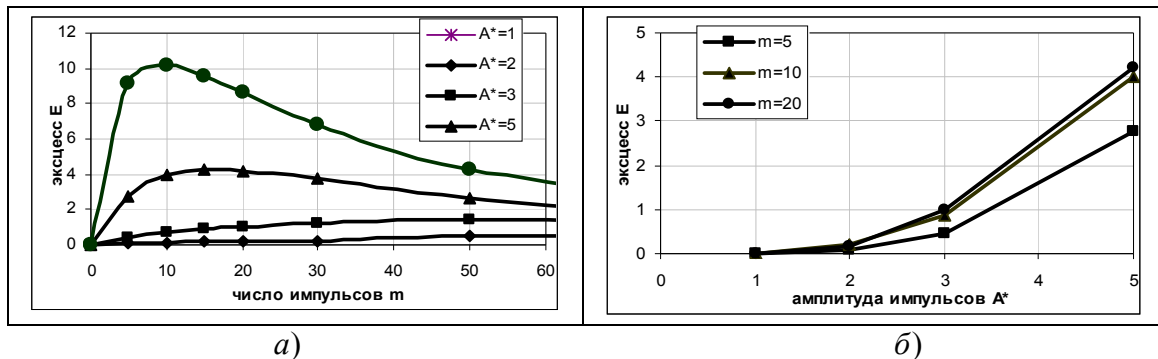
Исследование свойств имитационных моделей базируется на статистическом анализе временных процессов в дискретной форме, который включает в себя вычисление как стандартных характеристик, так и модифицированных, клиппированных по амплитуде сигналов. Отсекая часть сигнала, лежащую ниже порога клиппирования, можно уменьшить влияние помех от собственной вибрации машины и усилить влияние импульсов, связанных с развитием дефекта.

Обобщённая имитационная модель вибросигнала. Простейшая модель вибросигнала при наличии эксплуатационного повреждения узла машины представляет собой периодическую последовательность импульсов амплитуды A_n на фоне белого шума с нормальным законом распределения и среднееквадратическим отклонением $\sigma_{ш}$. Число отсчетов временной реализации модели $N=2048$, число импульсов m меняется в зависимости от поставленной задачи.

В ряде систем мониторинга в качестве основного диагностического признака зарождающихся дефектов используется пик-фактор PF , равный отношению пикового значения к стандартному отклонению сигнала. Однако, если с ростом относительной амплитуды импульсов A^* пик-фактор растёт (рис.1а), то с увеличением их числа – уменьшается, что объясняется ростом дисперсии сигнала при увеличении числа импульсов. Таким образом, однозначной тенденции изменения пик-фактора с ростом амплитуды импульсов и их количества, т.е. с деградацией состояния механизма, не наблюдается. Относительное (нормированное к эталонному значению) среднееквадратическое отклонение σ^* (рис.1,б) растёт монотонно с ростом амплитуды импульсов и их количества, однако ощутимые изменения этого признака наблюдаются лишь при значимых амплитудах импульсов и большом их количестве.



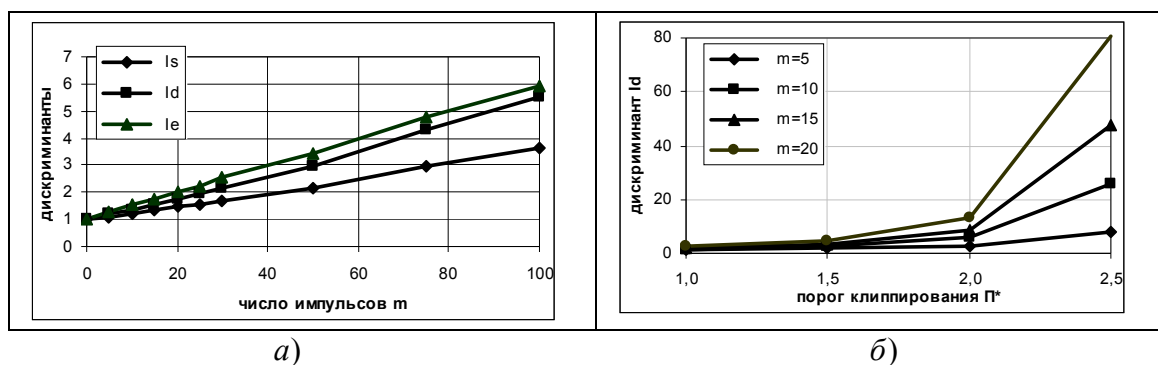
Особенно чувствителен к изменению структуры сигнала за счёт роста амплитуд и числа импульсов коэффициент эксцесса E . На рис.2,*а* и 2,*б* представлены семейства



зависимостей коэффициентов эксцесса E от числа импульсов m в сигнале и их амплитуд $A^*_и$ (в относительном масштабе). С ростом амплитуды импульсов при фиксированном их количестве эксцесс растёт, тогда как с увеличением числа импульсов эксцесс проходит через максимум и уменьшается, т.е. не может использоваться в качестве однозначного признака степени деградации машины.

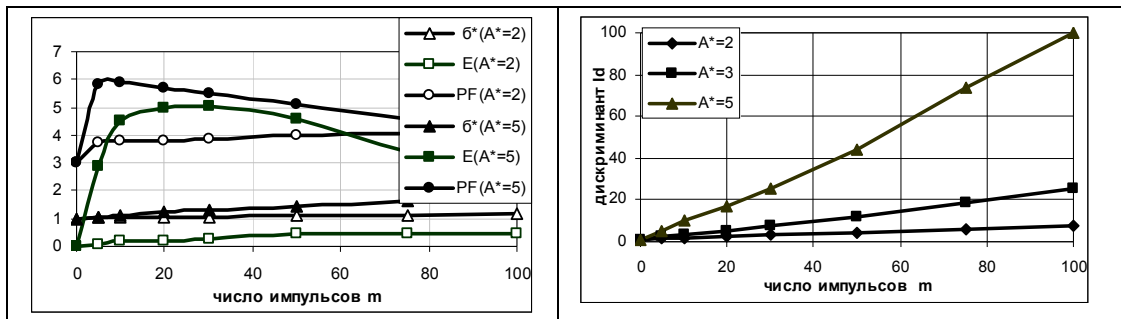
Иначе ведут себя в тех же условиях безразмерные амплитудные дискриминанты (рис.3,*а*), где представлены зависимости дискриминантов I_s , I_d , I_e от числа импульсов m , когда их амплитуды не превышают амплитуды шумовой составляющей сигнала ($A^*=2,5$) при пороге клиппирования $\Pi^*=1$. Все дискриминанты монотонно растут, наибольшей чувствительностью обладает дискриминант I_e . При расчёте дискриминантов в качестве эталонного был принят сигнал в отсутствие импульсов.

Чувствительность дискриминантов увеличивается с ростом порога клиппирования (рис.3,*б*), поскольку, чем больше порог клиппирования сигнала, тем больше отношение полезного сигнала к помехе, которую представляет собой шумовой сигнал. Таким образом, даже когда амплитуды импульсов не выходят за рамки максимальной амплитуды случайного шума, дискриминант обнаруживает их наличие.



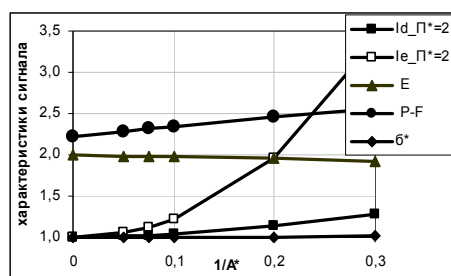
Результаты моделирования задир. Задир контактирующих поверхностей механизма приводит к нарушению периодичности движения деталей механизма и появлению в вибросигнале выбросов, амплитуды и количество которых в единицу времени растут с развитием дефекта. Имитационная модель вибросигнала – сумма белого шума, со стандартным отклонением $\sigma_{ш}$, и импульсной последовательности амплитуды $A_{и}$. Семейство зависимостей статистических характеристик сигнала нормированного стандартного отклонения σ^* и коэффициента эксцесса E от числа импульсов m в сигнале для двух значений относительных амплитуд A^* представлено на рис.4,*а* и

дискриминантов I_d - на рис.4,б. Если амплитуды импульсов $A_{и}$ не превышают амплитуды шумовой составляющей ($3b_{ш}$), изменения b^* , PF и E - незначительны, в



противном случае эксцесс E и пик-фактор PF представляют собой хотя и чувствительные, но неоднозначные характеристики, не позволяющие количественно оценить изменение технического состояния объекта. По данным характеристикам можно обнаружить развитие задира только на ранней стадии при условии непрерывного отслеживания изменения параметров со временем наработки машины. Дискриминанты I_d при относительном пороге клиппирования $\Pi^*=1.5$ (рис.4,б), монотонно растут даже при значениях амплитуды импульсов, не превышающих максимальную амплитуду шумовой составляющей сигнала.

Результаты моделирования абразивного износа. Абразивный износ контактирующих поверхностей работающего механизма (например, зубчатой передачи) сопровождается нарушением микро- и макро-геометрии деталей, следствием чего является рост значимости шумового компонента в сигнале. Имитационная модель вибросигнала при абразивном износе контактирующих поверхностей представляет собой аддитивное сложение ряда импульсов единичной амплитуды $A_{и}$, имитирующих вход зубьев в зацепление прямозубой передачи, и нормального шумового процесса, имитирующего влияние абразивного износа зубьев. Отношение среднеквадратического значения $b_{ш}$ шумовой составляющей и амплитуды импульса $A_{и}$ меняется от 0 до 0.3. В данной модели информативной составляющей степени износа зубьев является уровень шума $b_{ш} \ll A_{и}$, где $A_{и}$ отображает амплитуду вибровозбуждения при пересопряжении зубьев в зацеплении. Поэтому для оценки малого изменения глубины модуляции вибросигнала за счёт износа зубьев в пределах $0,1 \div 0,3$ целесообразно использовать высокочувствительный дискриминант I_e . Изменение стандартных безразмерных параметров сигнала b^* , E, PF и амплитудных дискриминантов I_d , I_e с ростом шумового компонента ($1/A^*$) в вибросигнале, моделирующего степень износа поверхностей, представлено на рис.5.

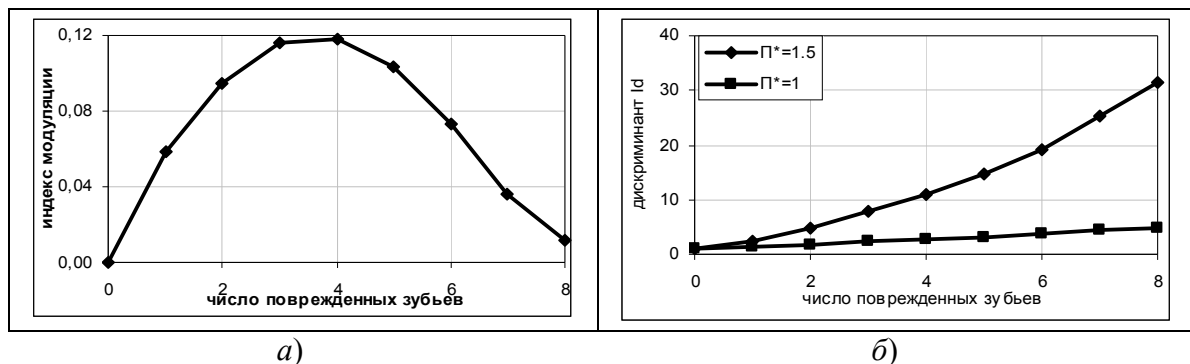


В отличие от монотонно растущих дискриминантов (при пороге клиппирования $\Pi^*=2$), стандартные параметры остаются практически без изменения даже при максимальном отношении шума к амплитуде импульсов.

Результаты моделирования питтинга контактирующих поверхностей. Влияние питтинга контактирующих поверхностей на вибросигнал рассмотрено на примере прямозубой зубчатой передачи с передаточным отношением $i=1$ и числе зубьев $Z=8$. Имитационная модель вибросигнала на зубцовой частоте передачи с учётом проявления питтинга зубьев представлена синусоидальным процессом с

зубцовой частотой f_z и амплитудой A_z , модулированным частотой вращения $f_{вр}$ повреждённого колеса, с добавлением нормально распределённого шумового процесса (как проявления работы механизма в целом), где $\sigma_{ш}$ -среднеквадратическое отклонение шума. Степень повреждения зубьев в сигнале задавалась увеличением амплитуды A_z^* от 0 до 0.7. Появление ямки выкрашивания на одном из зубьев шестерни (**локальный дефект**) приводит к росту амплитуды ударного возбуждения при входе зубьев в зацепление, соответствующему всплеску амплитуды и появлению боковых модуляционных составляющих в спектре сигнала в окрестности зубцовой частоты. Влияние степени повреждения зуба на глубину модуляции сигнала I_m незначительно (в пределах $0 \div 0.2$), диапазон же изменения дискриминанта I_d в десятки раз превышает диапазон изменения индекса модуляции (в отличие от практически не меняющихся стандартных параметров).

С развитием питтинга ямки выкрашивания появляются на поверхности нескольких зубьев (**распределённый дефект**). В модели количество повреждённых зубьев по периметру колеса последовательно увеличивалось от 0 до 8, что в текущем сигнале проявлялось ростом числа всплесков амплитуды и ростом индекса амплитудной модуляции ($I_m = 0 \div 0.12$), который использовался в качестве диагностического признака. Результаты имитационного моделирования показали, что с ростом числа повреждённых зубьев индекс модуляции изменяется не монотонно, а имеет максимум, когда число поврежденных зубьев колеса составляет половину от их общего количества (рис.6,а). Как и коэффициент эксцесса, индекс модуляции является неоднозначной функцией, тогда как дискриминант (рис.6,б) с увеличением числа повреждённых зубьев растёт монотонно.



Выводы

- На основе результатов имитационного моделирования вибросигналов проведено сравнение возможностей использования различных статистических характеристик вибрационных процессов в машинах для обнаружения зарождающихся эксплуатационных повреждений контактирующих поверхностей узлов машинного оборудования типа задира, абразивного износа и выкрашивания.
- Сопоставлены реакции стандартных статистических характеристик (стандартного отклонения, пик-фактора, коэффициента эксцесса, индекса амплитудной модуляции) и амплитудных дискриминантов на развитие повреждений. Показано, что чувствительность амплитудных дискриминантов к появлению выбросов в сигнале значительно выше, чем у стандартных характеристик, а характер зависимости от степени деградации механизма – монотонный.
- Продемонстрирована возможность обнаружения в вибросигнале с помощью амплитудных дискриминантов импульсных сигналов, лежащих ниже уровня

шумовой помехи, что делает целесообразным использование дискриминантного анализа вибросигналов при обнаружении зарождающихся эксплуатационных дефектов машинного оборудования.

Литература

1. Sokolova Asja, Balitsky Felix, Sensitive and noise-immune vibration discriminants for instability phenomena detection caused by incipient machinery deterioration, *Proc. of "The 1st International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery – ISCORMA-1"*, 20-24 August (2001), South Lake Tahoe, California, USA.
2. Использование многомерного анализа амплитудных дискриминантов вибрации машинного оборудования для обнаружения зарождающихся дефектов / Соколова А.Г., Долаберидзе Г.В., Иванова М.А., Панов С.Н., Балицкий Ф.Я., Сизарев В.Д. / Тезисы докладов, 1 с. // 3-я Международная выставка и конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». 17-18 марта 2004, Москва, ЦМС, с. 59.
3. Соколова А.Г. Алгоритм вибромониторинга машинного оборудования с адаптацией к базовому состоянию / Контроль. Диагностика № 11, 2005. С.30–40.

Институт машиноведения РАН, Россия, Москва