

## ЛИТЕРАТУРА

1 СТБ 5.2.03-2000 Порядок проведения сертификации колесных транспортных средств, предметов их оборудования и частей; 2 Правила Европейской Экономической Комиссии Организации Объединенных Наций №№ 24, 49; 3 Сертификат об утверждении типа средства измерений № 1951. – Республика Беларусь; 4 Новые программные продукты ведущих фирм: Номенклатурный сборник (каталог) по зарубежным и отечественным приборам, средствам автоматизации и технологическому оборудованию: НСК-11/ Информприбор. - Москва, 1996-25 с.

УДК 620.178.53

**В.Л. Басинюк**

### **ОЦЕНКА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

К одному из основных источников виброакустической активности трансмиссий на основе зубчатых передач можно отнести динамические процессы, сопровождающие взаимодействие зубьев шестерен в процессе передачи крутящего момента. Уровень и спектральный состав генерируемого шума и вибраций представляют самостоятельный интерес с позиций обеспечения экологической безопасности эксплуатации объекта. Как правило, их предельно допустимые уровни регламентируются техническими требованиями на изделие и в настоящее время являются одним из основных способов защиты внутренних рынков индустриально развитых стран от аналогичной отечественной продукции внешних производителей.

Как показывает анализ результатов исследований, проведенных в ИМИНМАШ НАН Беларуси [1-3] и Институте машиноведения РАН [4] параметры шума и вибраций, в определенной мере могут служить основой для комплексной, а, в ряде случаев, и более информативной оценки качества изготовления и сборки, как самих зубчатых передач, так и узлов на их основе и трансмиссии в целом. В ряде случаев на основе анализа этих данных с использованием специальных методик выделения и обработки информативных составляющих сигнала можно с высокой степенью достоверности определить действительную нагруженность зубчатых передач, их техническое состояние и прогнозируемый или остаточный ресурс.

Таким образом, обеспечение при изготовлении технических требований к уровню и спектральному составу шума и вибраций, генерируемых как зубчатыми передачами, так и другими, взаимосвязанными с ними узлами и системами объекта, во многом определяет не только соответствие изделия требованиям безопасности по виброакустическим параметрам, но и качество его изготовления и сборки, а также конкурентоспособность и ликвидность.

Вместе с тем, виброакустические характеристики трансмиссий на основе зубчатых передач являются наиболее сложным объектом для расчета и прогнозирования на стадии проектирования и разработки технологического обеспечения изготовления, поскольку они затрагивают практически все аспекты их

функционирования от выбора наиболее рациональных параметров отдельных элементов, включая геометрию зубчатых колес и механической системы в целом, до разработки, с учетом влияния технологических факторов на виброакустические характеристики, процессов изготовления и сборки основных деталей и узлов.

Поэтому при создании новых или существенной модернизации существующих технических решений для решения этой задачи в полном объеме, как правило, проводятся дорогостоящие стендовые, полигонные и эксплуатационные испытания. Однако и в этом случае, при отсутствии требуемой комплексной системы контроля качества изготовления и сборки зубчатых передач, не гарантируется обеспечение требуемых параметров виброакустической активности трансмиссии.

При изготовлении зубчатых колес в СНГ, в основном, используется поэлементный контроль качества их изготовления. В технологиях, приобретенных в рамках лицензионных соглашений за рубежом, к нему добавляется оценка виброакустических параметров, производимых на всех стадиях производства и сборки зубчатых передач. Ее использование позволяет осуществить их оперативную разбраковку и на основе этого обеспечить с высокой степенью достоверности определение источника и причин повышенных шумов и вибраций, а также, если это технически возможно и экономически целесообразно, устранить обнаруженные отклонения с использованием наиболее экономически рациональных и технически приемлемых способов.

Поэлементный контроль качества изготовления зубчатых колес можно отнести к наиболее разработанному и технологически обеспеченному аспекту их изготовления, осуществляемому с применением ручных, полуавтоматических и автоматических измерительных средств. При наличии соответствующих экономических и технических возможностей в ряде случаев могут быть использованы технически сложные и дорогостоящие контрольные средства типа зубоизмерительных машин фирмы «Клингелнберг», стоимость которых достигает 1...1,5 млн. «Евро» и более. Это позволяет не только произвести комплексную уточненную проверку всех параметров изготавливаемых шестерен, но и осуществить с использованием микропроцессорных средств их обработку и представление в удобном для дальнейшего использования виде. Однако применение таких средств вряд ли целесообразно при организации сквозного контроля выпускаемой продукции на всех стадиях технологического процесса обработки зубьев и требует высококвалифицированного сопровождения. Кроме того, использование этих средств ориентировано на контроль отдельных зубчатых колес, что не всегда гарантирует достижение требуемых параметров виброакустической активности после сборки трансмиссии, на которую существенное влияние оказывает сама сборка и триботехнические параметры взаимодействия зубчатых колес в передаче. Более того, контроль качества изготовления шестерен с использованием приведенных средств носит статический характер, а на шум и вибрации, генерируемые зубчатыми передачами, существенное влияние оказывают скоростные и нагрузочные режимы их функционирования и связанные с ними деформации зубьев и элементов механической системы, которые приводят к изменению исходных геометрических параметров и оказывают существенное влияние на динамику взаимодействия зубчатых передач. Все это в целом ограничивает возможности использования результатов поэлементного контроля зубчатых колес в процессе их производства для прогнозирования виброакустических параметров трансмиссии при ее функционировании в условиях реальных скоростных и нагрузочных режимов работы.

Поэтому более целесообразно сочетание поэлементного контроля отдельных зубчатых колес с комплексной оценкой на специализированных стендовых комплексах качества изготовления и сборки узлов и трансмиссий в сборе по виброакустическим

параметрам. Это позволяет создать близкие к эксплуатационным, а, в ряде случаев, и более информативные, с позиций выявления отклонений от регламентированных технической документацией, параметров функционирования зубчатых передач, включая их действительную нагруженность и условия смазываемости.

При реализации этого подхода необходимо учитывать следующее.

На генерируемые зубчатыми передачами вибрации и шум наиболее существенное влияние оказывают следующие основные факторы (рис.1):

- исходная и фактическая, связанная с деформациями при нагружении элементов конструкции, точность изготовления и сборки как зубчатых передач, так и связанных с ними элементов трансмиссии;
- скоростные, нагрузочные режимы и трибологические условия функционирования зубчатых передач в трансмиссии;
- колебания жесткости зубьев в зацеплении, кромочные и срединные удары при пересопряжениях зубьев;
- конструкционные особенности зубчатых передач и трансмиссии в целом, в частности их инерционно-жесткостные характеристики, а также инерционно-жесткостные характеристики связанного с ними стендового оборудования, на котором при изготовлении осуществляется контроль виброакустических характеристик.

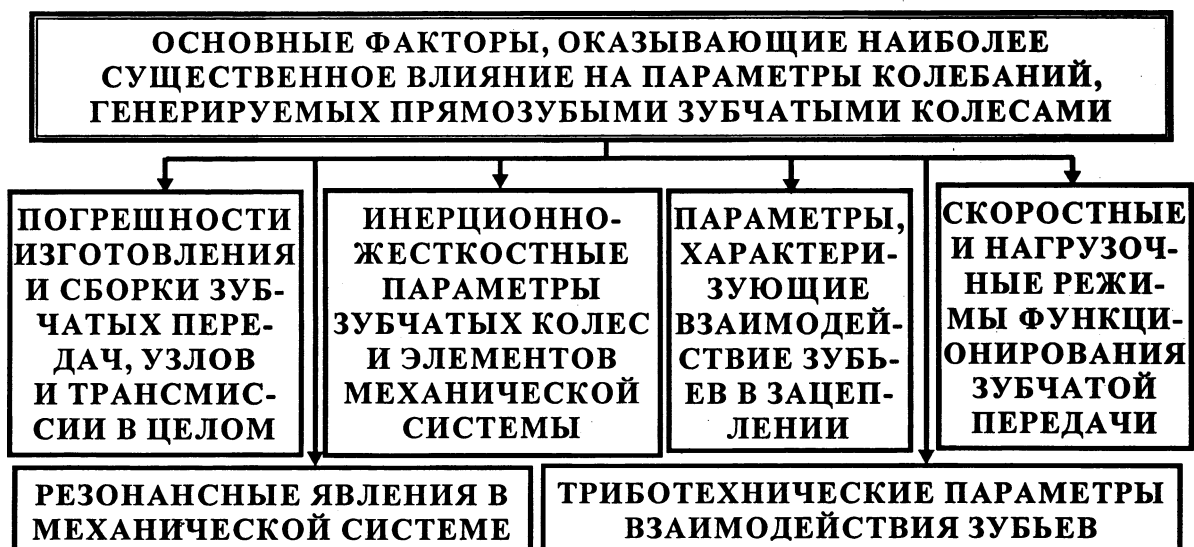


Рис.1. Основные факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на виброакустические характеристики трансмиссии на основе зубчатых передач

К этому необходимо добавить то, что в амплитудном спектре могут присутствовать также шум и вибрации, генерируемые не только зубчатыми колесами, но и внутренними и внешними элементами конструкции, источником возбуждения колебаний которых являются динамические процессы, протекающие в зубчатых передачах при их функционировании. Кроме того, на регистрируемые параметры и получаемые результаты существенное влияние могут оказывать условия и методики их съема, алгоритмы предварительной и окончательной обработки контролируемых параметров.

С позиций влияния точности изготовления и сборки на виброакустическую активность зубчатых передач, возможность идентификации точностных и виброакустических параметров, оценки реальной динамической нагруженности и прогнозирования ресурса необходимо отметить следующее.

В соответствии с ГОСТ 1643-81 при изготовлении зубчатых колес и передач на их основе соответствующими допусками регламентируются:

- кинематическая точность, характеризующая максимальную величину погрешности угла поворота зубчатого колеса за оборот или угла рассогласования вращения входного и выходного валов передачи с учетом ее передаточного числа, возникающая при изготовлении зубчатых колес как следствие радиальных и тангенциальных погрешностей обработки;

- плавность работы, вызывающая погрешность угла поворота при нахождении зуба или пары зубьев в зацеплении, обусловленная погрешностями шага зацепления в основном из-за отклонений профиля зубьев или их расположения в окружном направлении (при их формировании методом копирования);

- показателями, определяющими контакт зубьев в передаче, на который наиболее существенное влияние оказывают погрешности направления, по отношению к оси посадочного отверстия, и формы образующей, а также отклонения в направлении осей посадочных отверстий под подшипниковые узлы в корпусных деталях;

- нормы бокового зазора, обусловленные, в основном, отклонениями от номинальных значений толщины зуба и межосевого расстояния в зубчатой передаче.

*Оценка кинематических погрешностей с использованием виброакустических параметров.*

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований параметры взаимодействия зубчатых колес, связанные с кинематическими погрешностями изготовления зубчатых передач, могут проявляться в вибрациях, генерируемых с оборотными частотами на подшипниковых узлах и корпусных деталях при относительно высоких уровнях нагружения зубчатых передач. Вместе с тем, при этом на них накладываются колебания, связанные с дисбалансами масс валов и шестерен. В большей мере они проявляются в вынужденных крутильных колебаниях, возникающих в механической системе при функционировании зубчатых передач и трансмиссии в целом, поэтому для их регистрации в ряде случаев более удобны средства контроля углов рассогласования вращения входного и выходного валов. Использование параметров вибраций так же возможно, однако для этого необходимы специальные методики выделения и обработки соответствующих составляющих вибрационного сигнала.

*Оценка погрешностей изготовления, характеризующих плавность работы зубчатой передачи.*

Погрешности плавности работы при использовании виброакустических методов контроля наиболее достоверно могут быть определены при анализе амплитудных значений зубцовых и собственных колебаний, генерируемых зубчатыми колесами. Используемые при этом методические подходы условно можно разделить на следующие группы:

- оценка качества изготовления и сборки зубчатых передач по усредненным во времени уровням шума или вибраций, осуществляемая на специальном стендовом оборудовании в помещении, обеспечивающем приемлемые уровни помех и искажений исходного сигнала, и, в основном, ориентированная на комплексную оценку качества изготовления, позволяющая осуществить разбраковку зубчатых передач на «годные», «ограниченно годные» и «бракованные», для чего необходимо предварительное определение для «годной» по параметрам точности зубчатой передачи уровня генерируемых ими, при заданных режимах и условиях функционирования, шума или вибраций;

- анализ амплитудных спектров вибраций, позволяющий при определенных условиях и с использованием различных методов обработки спектров в отдельных случаях получить количественные (при значениях информативных частот, меньших

200...400 Гц), а в основном только качественные характеристики, косвенно отражающие интегральную точность изготовления и сборки зубчатых передач [4];

- анализ, с использованием методов математической статистики, амплитудных значений колебаний, генерируемых отдельными парами зубьев на зубцовых частотах, для реализации которого также необходимо применение специальных методик съема и обработки диагностических данных [1-3], однако реализация этого подхода позволяет выявить отклонения каждого зуба, что обеспечивает существенное повышение информативности контроля, а так же выбор технически обоснованного и наиболее экономически целесообразного метода устранения выявленных отклонений.

К основным причинам варьирования амплитудных значений колебаний на зубцовой частоте можно отнести влияние погрешности шага зацепления на характер взаимодействия зубьев, включая реально реализуемый коэффициент торцевого перекрытия и, связанный с ним диапазон колебаний жесткости зацепления. При определенных условиях на амплитудные значения вынужденных колебаний могут оказывать так же влияние кромочные и срединные удары, возникающие при пересопрежении зубьев.

#### *Оценка погрешностей контакта.*

Отклонения, определяющие соответствие точности изготовления передачи нормам контакта, оказывают весьма ограниченное влияние на вибрации, генерируемые зубчатой передачей, однако при определенных условиях наличие погрешностей этого типа могут быть выявлены при комплексном анализе шума и вибраций, одновременно зарегистрированных и анализируемых с учетом реального масштаба времени [5]. Это связано с тем, что погрешности контакта могут сказываться на трибологических параметрах взаимодействия рабочих поверхностей зубьев и, как следствие, генерируемом ими шуме, а в значительно меньшей проявляться в вибрациях. Отклонения формы зуба могут сказываться также на фактическом коэффициенте перекрытия и, как следствие, проявляться в амплитудных спектрах вынужденных и собственных колебаний.

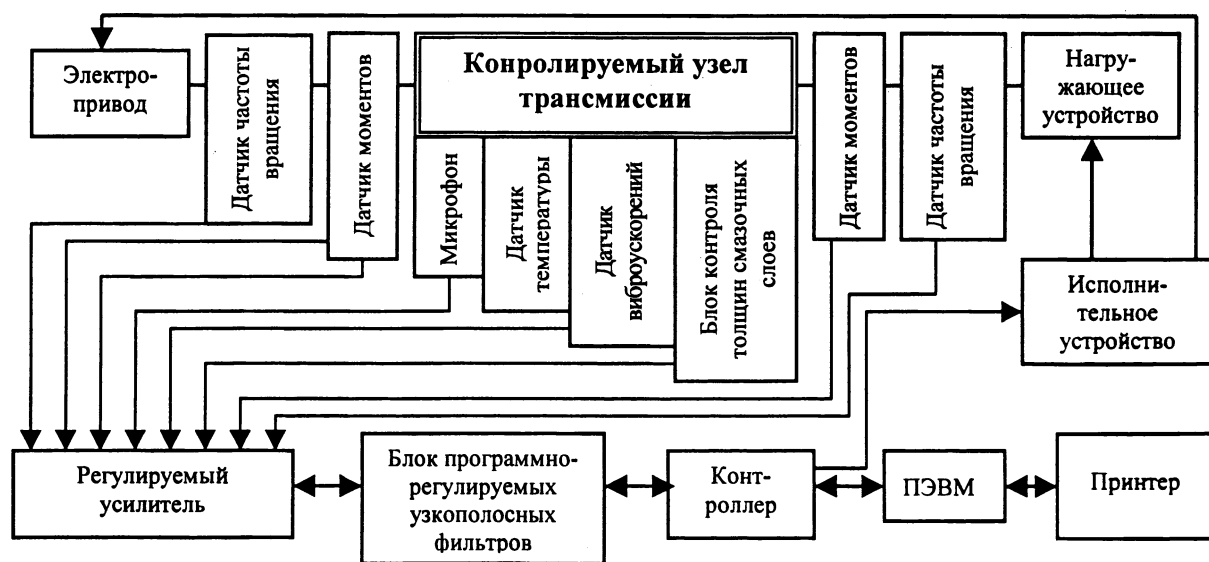


Рис. 2. Схема стенда для контроля качества изготовления и сборки узлов на основе зубчатых колес

*Погрешности бокового зазора* оказывают заметное влияние на шум и вибрации, генерируемые зубчатой передачей при его уменьшении ниже допустимого уровня или, при чрезмерном увеличении бокового зазора, в режиме холостого хода.

Наиболее полные и достоверные данные о качестве изготовления и сборки крупных узлов и трансмиссии в целом может быть получен при реализации стендового комплекса, приведенного на рис. 2, конструкция которого обеспечивает многопараметрический контроль их параметров функционирования.

В целом, определение наиболее технически и экономически рациональной схемы диагностирования определяется характером и конструктивными особенностями объекта и целью контроля, которые могут быть различны для каждого этапа изготовления и сборки узлов и трансмиссии в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вибромониторинг внутренней динамической нагруженности, точностных параметров и износов отдельных пар зубьев передач зацеплением// Я.В. Басинюк, Н.Н. Ишин, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич// Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение, Автоматизация, ЭВМ.–2001.– № 4(10).– С.48–53; 2. Пат. 4261 С2 ВУ, МПК G 01 М 13/02. Способ вибрационной диагностики нагруженности зубьев зубчатых передач при испытаниях/ О.В. Берестнев, Н.Н. Ишин, В.Л. Басинюк, Я.О. Берестнев, Я.В. Басинюк.–№ а 19980960; Заявл. 21.10.1998; Опубл. 30.12. 2001//Афіцыйны бюлетэнь/Дзярж.пат.камітэт Рэсп. Беларусь.– 2001. – №4. – С.171–172; 3. Пат. РБ 630 U, МПК 7 G 01 Н 17/00. Устройство для диагностики передач зацеплением/ Я.В. Басинюк, Н.Н. Ишин, И.Н. Усс, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич. – № и 20010116; Заявл. 17.05.2001; Опубл. 30.09.2002// Бюл. №3; 4. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М., 1987. – 288 с; 5. Свид. на пол. мод. RU 20963 U1, МПК 7 G 01 Н 17/00. Устройство для виброакустической диагностики передач зацеплением/ Я.В. Басинюк, Н.Н. Ишин, И.Н. Усс, В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, Л.М. Антюшня. – № 2001112940/20; Заявл. 11.05.2001; Опубл. 10.12.2001// Бюл. №34.

УДК 621.713

В.А. Нифагин, Д.В. Соломахо

### МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ ИХ КООРДИНАТНОМ КОНТРОЛЕ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Новые технологии, применяемые при проектировании, производстве, контроле качества приборов и машин, ставят высокие требования к качеству измерений. Повысить качество измерений возможно либо путем совершенствования существующих и разработки принципиально новых средств измерений, либо на основе рационализации методик выполнения измерений. На практике, исходя из сложившихся традиций, предпочтение, как правило, отдается первому варианту решения проблемы повышения качества измерений. Однако его реализация требует значительных материальных затрат и времени, что связано с необходимостью внедрения в практику измерений новых физических принципов, разработки новых и доработки конструкций существующих средств измерений, совершенствования технологических процессов их изготовления. В этом отношении более перспективным представляется второй путь