

УДК 629.735.45, 621.833.24  
DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-45-54

## Проблемы динамики авиационных зубчатых передач

Д. В. Калинин, кандидат технических наук, Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова; МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва Россия

*Актуальность исследования динамики зубчатых передач повышается с развитием конструкций редукторных приводов – увеличением их быстроходности и повышением удельной передаваемой нагрузки. В стандартизованных методиках вопрос оценки динамических нагрузок в зубчатых передачах рассматривается ограниченно и требует значительной доработки. В статье описываются известные типы поломок и последствия высокой динамической нагруженности при работе редукторов авиационных двигателей. Проведен обзор существующих методик оценки динамики редукторов, а также предложен оригинальный подход к моделированию динамических процессов в зубчатых передачах, определению динамических нагрузок и собственных частот колебаний, сформированный на опыте исследования поломок и доводки высоконагруженных авиационных зубчатых колес. Сформулированы рекомендации по снижению виброактивности зубчатых передач на этапе проектирования, а также качественные подходы к анализу технического состояния трансмиссий на основе методов вибродиагностики. Описана динамическая модель цилиндрической зубчатой передачи, рассматривающая в качестве основного источника возбуждения крутильных колебаний и динамических нагрузок переменную жесткость зацепления. Расчет функции жесткости зацепления пары зубчатых колес с помощью метода конечных элементов позволяет оценивать влияние параметров геометрии зубьев, в том числе и микрогеометрии, например, профильной модификации. С помощью разработанной динамической модели сформулированы рекомендации к снижению уровней шума и вибраций в цилиндрических зубчатых передачах, а также диагностический признак развития усталостных трещин в ножке зуба. Динамическая модель была валидирована при экспериментальных исследованиях на натурном стенде ФАУ «ЦИАМ имени П. И. Баранова» с проведением динамического тензометрирования зубчатых колес.*

**Ключевые слова:** динамическая модель, зубчатые передачи, собственные частоты, усталостная прочность.

### Введение

Достоверность и точность расчетных методик в области проектирования зубчатых передач можно оценить по статистике распределения дефектов, возникающих при эксплуатации машин и зубчатых механизмов. Наиболее редко в современных конструкциях редукторов, обусловленные низкой изгибной прочностью зубьев, особенно в условиях прогнозируемых внешних нагрузок со стороны привода. Медленно развивающиеся процессы усталостного выкрашивания зубьев обусловлены деформациями зубчатых колес и опор, не учитываемых при аналитических расчетах, нарушением условий смазки и другими эксплуатационными особенностями и эффективно прогнозируются в ходе жизненного цикла изделия. Расчетные методики отечественных и иностранных стандартов позволяют с высокой точностью определять значения коэффициентов запаса прочности по данным критериям.

Более сложными в прогнозировании являются поломки зубчатых колес, вызванные повышенными динамическими нагрузками в зацеплении. Такие нагрузки могут быть обусловлены

как внешними факторами, связанными с неравномерной нагруженностью зацеплений вследствие монтажных и технологических погрешностей, дисбалансом роторов, крутильными колебаниями приводных валов, так и внутренними, в том числе возникновением резонансных колебаний зубчатых колес [1–3]. С другой стороны, высокие динамические нагрузки в зацеплении приводят не только к возникновению поломок передач, но могут служить причиной возникновения резонансных колебаний и нерасчетного нагружения других узлов машины, таких как валы, подшипники и корпусные детали.

**Цель** исследования – разработка новой методики и подхода к оценке динамических нагрузок в зубчатых передачах, позволяющих учитывать влияние на нагрузки в зацеплении и уровни виброактивности передач их геометрических параметров, точности и конструкции редуктора.

### Актуальность исследований динамики зубчатых передач

Особенностью поломок и дефектов, вызванных повышенными динамическими нагрузками в зубчатых передачах, является сложность выявления их причин и установления реальной

последовательности развития процесса разрушения. В первую очередь такая ситуация связана с недостаточно изученным вопросом об источниках возбуждения колебаний в зацеплении и связи амплитуды и состава возбуждаемых вибраций с геометрическими и эксплуатационными параметрами передачи.

На рисунке 1 представлен вид разрушения конического зубчатого колеса центрального

привода авиационного двигателя в результате резонансных колебаний по изгибным формам полотна. Такой вид поломки является одним из наиболее распространенных для конических передач современных двигателей и обусловлен невозможностью полной отстройки собственных частот конструкции зубчатого колеса из рабочего диапазона частот вращения.

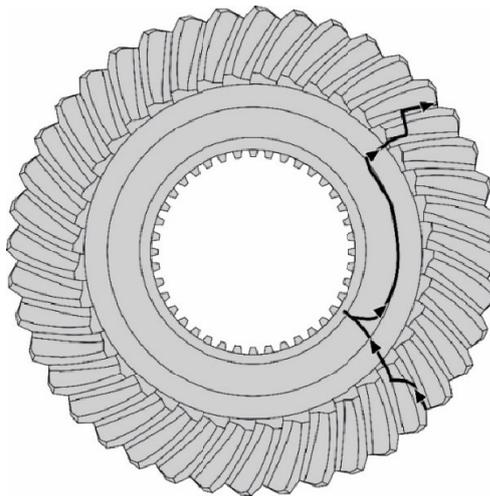


Рис. 1. Характерный вид развития усталостной трещины в полотне конического зубчатого колеса в результате его резонансных колебаний по изгибным формам

Fig. 1. Characteristic view of fatigue crack development in the web of a bevel gear as a result of its resonant vibrations on bending forms

Исследования причин разрушения конических колес по примеру, представленному на рисунке 1, выявили зависимость уровней динамических напряжений при резонансных колебаниях от параметров топологии рабочих поверхностей зубьев, когда отклонение их отводов на 0,1 мм приводило к повышению динамических напряжений в 3 раза.

Изучение вопросов динамического состояния зубчатых колес в составе трансмиссий позволяет расширять представление о процессах возбуждения вибраций при пересопряжении зубчатых колес и их распространении на остальные детали механизмов и машин. Анализ вибрационного состояния редукторов, в первую очередь ответственных изделий, таких как авиационная техника, представляет перспективное направление диагностики, повышение информативности которого требует разработки моделей физической взаимосвязи технического состояния деталей трансмиссии с параметрами возбуждаемых вибраций.

На рисунке 2 представлена схема основных направлений исследований в области динамики зубчатых колес.

Высокие динамические нагрузки, возбуждаемые в зацеплениях зубчатых передач, приводят к снижению их ресурсных показателей, негативно влияют на долговечность подшипников, шлицевых соединений и других деталей привода, возникновению непрогнозируемых поломок. При этом поломки вследствие высоких динамических напряжений чаще всего происходят в результате возникновения резонансных колебаний как самих зубчатых колес, так и деталей машин, подверженных воздействию вибраций со стороны передач.

В качестве основных источников возбуждения колебаний в системе зубчатых передач в исследованиях выделялись следующие:

- зацепления (накопленная погрешность шага, профильная погрешность зубьев);
- ударное взаимодействие при кромочном контакте зубьев, вызванном отклонением их геометрии в результате деформаций под нагрузкой;
- переменная жесткость зацепления, вызванная попарным нахождением в контакте различного числа контактируемых зубьев;
- сила трения в зацеплении и др.

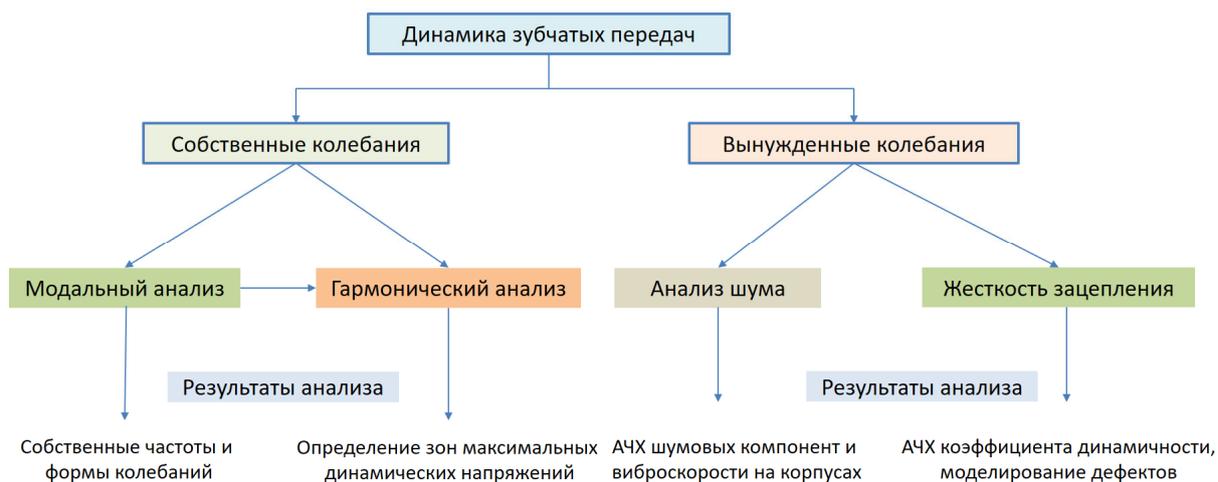


Рис. 2. Направления исследований динамики зубчатых передач

Fig. 2. Research directions of gear dynamics

В работах А. И. Петрусевича, М. Д. Генкина, далее развитых Б. Ф. Шорром, в качестве основного источника возбуждения рассматриваются ударные процессы в зацеплении зубьев в соответствии с ударным методом оценки динамических нагрузок. О. И. Косарев в качестве основного источника возбуждения колебаний рассматривает кинематическое возбуждение параметрических колебаний, обусловленное переменной жесткостью зацепления и технологическими погрешностями в зацеплении, создающими дополнительное кинематическое возбуждение. Такой подход условно называется вибрационным методом расчета динамических нагрузок в зацеплении. Математический аппарат этого метода был развит в работах Н. А. Ковалева и Б. М. Абрамова, где показана возможность существования разрывных параметрических колебаний в зацеплении зубьев. Однако получение точного решения дифференциальных уравнений в данном методе возможно только при значительных приближениях, одним из которых является представление жесткости зацепления в виде гармонической или пульсирующей кусочно-линейной функции. Значительный вклад в повышение точности моделирования процесса зацепления и анализа податливости зубьев был внесен В. Л. Дорофеевым.

Динамические модели передач с сосредоточенными параметрами в виде двух дисков, соединенных упругодемпсирующей связью, приведены в работах А. Kahraman и R. Parker. Источником возбуждения в таких системах является статическая кинематическая погрешность (или трансмиссионная ошибка), которая включает в себя все факторы, приводящие к от-

клонению относительного углового положения колес от номинального, в том числе и деформации зубьев под нагрузкой. Точность этих моделей ограничена использованием приближенных аналитических зависимостей для описания функции жесткости зацепления и влияния на нее конструктивных параметров зацепления.

В работах Э. Л. Айрапетова и М. Д. Генкина, посвященных исследованию динамики планетарных редукторов, предложен метод динамических податливостей, предполагающий разбиение динамической системы планетарного механизма на подсистемы, связанные условиями совместных деформаций в местах соединения подсистемы с сосредоточенными параметрами и подсистемы с распределенными параметрами для модели венцовой шестерни. В данных работах недостатком динамической модели планетарного механизма также является упрощенное моделирование функции жесткости зацепления, при котором невозможно проследить взаимосвязь между параметрами зацепления и уровнем динамических нагрузок в планетарном механизме, а также большое число неизвестных данных о податливости элементов системы.

В ЦИАМ имени П. И. Баранова с 2010 г. разрабатываются оригинальные динамические модели зубчатых передач на основе сочетания методов конечных элементов (МКЭ) для определения функции жесткости зацепления и аналитических зависимостей для систем крутильных и изгибных колебаний масс с сосредоточенными параметрами. Разработаны динамические модели цилиндрических зубчатых передач [4–6], конических передач, в том числе включающих

демпферы сухого трения, а также модели планетарных механизмов.

### **Динамическая модель цилиндрической зубчатой передачи**

Существующие методики оценки динамических нагрузок, основанные на ударной теории, рассматривают процесс кромочного удара и так называемого срединного контакта зубьев передач, вызываемого нерасчетным входом вершин зубьев в контакт вследствие ошибок окружного шага. Согласно этой теории модифицированные зубчатые передачи, изготовленные с высокой точностью, должны иметь незначительное динамическое возбуждение, заметно отличающиеся от уровня динамических нагрузок в передачах, выполненных без модификации. Однако на практике динамическое возбуждение зубчатых колес имеет отличное от данной гипотезы поведение. В ударной теории подробно не рассматривается реальный процесс деформации вершин зубьев, имеющей отличную от средней в зацеплении жесткость, радиус кривизны и направление силы в зацеплении зубьев, контактирующих вне теоретической линии зацепления. Кроме того, авиационные зубчатые колеса в настоящее время изготавливаются с 4-й степенью точности и выше, в связи с чем погрешности профиля и окружного шага таких зубчатых колес ниже деформации зубьев под нагрузкой.

Разработка точной динамической модели авиационных зубчатых колес требует подробного определения и качественного моделирования источников возбуждения в зубчатом зацеплении. Среди основных источников возбуждения в зацеплении зубчатых колес выделяются:

- переменная жесткость зацепления, обусловленная изменением числа контактных пар зубьев, передающих нагрузки в течение периода зацепления;
- технологические погрешности, определяющие отклонение геометрии реальных поверхностей зубьев от теоретической;
- внешнее силовое возбуждение.

Первые два источника возбуждения колебаний являются внутренними и могут быть описаны как кинематическое возбуждение, выраженное через отклонение реальных угловых положений зубчатых колес от номинальных. В иностранной литературе для этого отклонения используется термин «статическая кинематическая погрешность» (STE), значение которого отлично от используемого в отечественной практике.

Составляющую кинематической погрешности, обусловленную деформацией зубьев под нагрузкой, будем рассчитывать через функцию переменной жесткости зацепления. Не зависящую от нагрузки технологическую составляющую кинематической погрешности выразим далее через периодическую функцию с помощью вероятностного метода, учитывающего заданную точность изготовления зубчатых колес.

Также в модели необходимо учитывать возможное внешнее силовое возбуждение. Источниками внешнего возбуждения в передаче являются флуктуации крутящего момента двигателя или нагрузки, несоосности и несбалансированности вращающихся масс. В некоторых исследованиях к источникам внешнего возмущения относится также сила трения в зацеплении зубьев, изменяющаяся по сложному полигармоническому закону, учитывающему изменения за фазу зацепления значения коэффициента трения, плечо силы трения, а также разнонаправленность действия сил трения в соседних зубьях [7, 8].

Кинематическое возбуждение, обусловленное переменной жесткостью зацепления, представляющей собой полигармоническую функцию, объясняет характерный вид амплитудно-частотных характеристик реальных зубчатых передач, имеющих ярко выраженные резонансы как на основной, так и на кратной зубцовой гармонике. При работе передачи на резонансе рост динамических нагрузок в зацеплении не происходит с безграничным возрастанием, хотя влияние трения в зацеплении зубьев является несущественным, что доказано экспериментально. Причиной выявленных особенностей, характерных для нелинейных колебаний, может являться как зависимость жесткости зацепления от передаваемой нагрузки, так и присутствие бокового зазора в зацеплении, допускающего возможность размыкания зубьев. Оба явления рассматриваются в настоящей главе.

В дальнейшем будем считать колеса цилиндрических передач по умолчанию прямозубыми с допущением, что при моделировании динамики косозубых колес будет отличным только характер изменения жесткости зацепления за цикл пересопряжения зубьев.

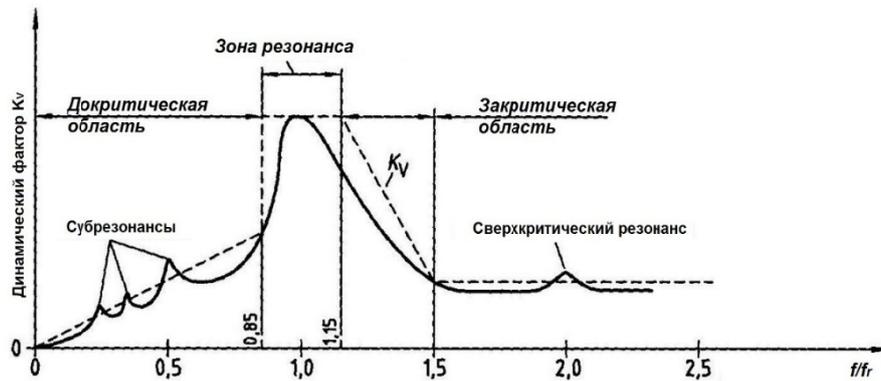
Представим зацепление пары цилиндрических зубчатых колес как механическую систему с шестью степенями свободы, состоящую:

- из двух зубчатых колес, представляемых жесткими дисками массой  $m_1$  и  $m_2$  и моментами инерции  $J_1$  и  $J_2$  соответственно, соединенными упругодемпфирующей связью с переменной

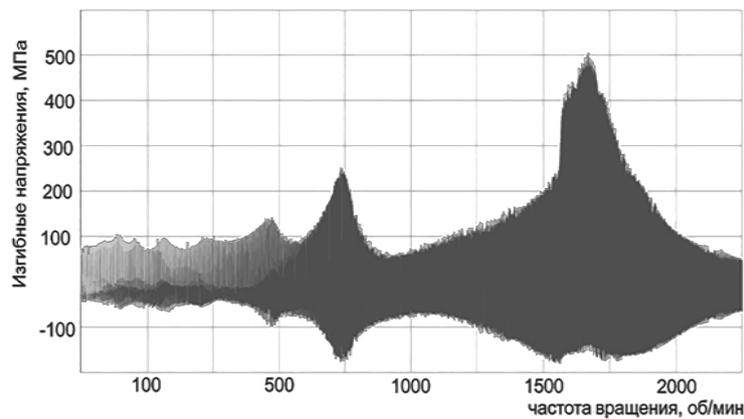


На рисунке 4 представлено сравнение зависимостей для динамических нагрузок в зацеплении, полученных экспериментально, с помощью МКЭ и на основе разработанной динамической модели (рис. 4, *b*). Как видно из амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) для всех трех вариантов, основной резонанс проявляется с характерным нелинейным видом пика значений динамических напряжений. Данная нели-

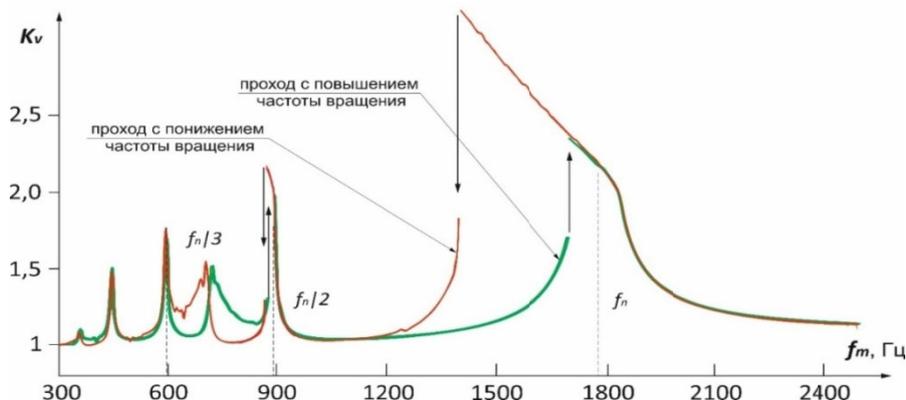
нейность динамической системы обусловлена возможностью разрыва контакта зубьев в пределах бокового зазора и учитывается условием потери контакта. При этом максимальное значение динамических напряжений на резонансах будет различаться в зависимости от направления изменения частоты вращения колес (рис. 4, *c*) и практически не зависеть от уровня демпфирования в системе.



a



b



c

Рис. 4. Сравнение АЧХ коэффициента динамичности в цилиндрических зубчатых колесах: *a* – методика DIN 3990; *b* – решение транзитной задачи МКЭ; *c* – гибридная динамическая модель

Fig. 4. Comparison of dynamic coefficient curve in spur gears: *a* - DIN 3990 methodology; *b* - solution of FEM transient dynamic; *c* - hybrid dynamic model

Разработанная модель позволяет с высокой точностью определять коэффициент внутренней динамической нагрузки в цилиндрических передачах при незначительных затратах машинного времени в сравнении с аналогичным типом расчета, выполняемым явными методами динамики в МКЭ.

На основе описанного подхода разработаны динамические модели цилиндрических и конических зубчатых передач, систем зубчатых передач, в том числе планетарных. Использование в качестве исходных данных для характеристик жесткости элементов редуктора результатов моделирования МКЭ расширяет возможности подхода, позволяет переходить к моделям с распределенными параметрами, например, для учета податливости венцовой шестерни планетарного ряда [9, 10] или учета изгибных колебаний дисков зубчатых колес. С помощью разработанной модели зацепления объяснен ряд случаев поломок авиационных зубчатых колес, вызванных повышенным вибровозбуждением в зацеплении зубьев вследствие влияния параметров микрогеометрии и топологии рабочих поверхностей [11–13], а также разработана методика выбора параметров профильной модификации зубьев.

#### **Применение результатов динамического моделирования в диагностике**

Оценка технического состояния деталей трансмиссии средствами диагностики проводится на основе накопления информации о сигналах различной физической природы, прямо или косвенно отражающих процессы, развивающиеся при работе изделий и развитии дефектов. Зубчатые передачи и узлы трансмиссий диагностируются следующими методами:

- измерение температуры масла и опор;
- измерение давления масла;
- индикация давления в маслосистеме;
- визуальный и ультразвуковой осмотры;
- индикация наличия стружки в масле;
- измерение и анализ вибраций.

Наиболее распространенные методы, такие как измерение температуры и давления масла, анализ наличия стружки позволяют получить диагностическую информацию в большинстве случаев по факту возникновения дефекта в зубчатой передаче или подшипниках, поэтому являются преимущественно системами сигнализации. Визуальный осмотр и ультразвуковой контроль выполняются в промежутках в нерабочем состоянии.

Вибродиагностика используется на различных этапах жизненного цикла изделия. В серийном производстве анализ вибраций использует-

ся при контроле-сдаточных и доводочных испытаниях с целью проверки качества и стабильности изготовления сборки изделий и их узлов, выявления причин повышенных динамических нагрузок и вибраций узлов с выявлением факторов, их вызывающих, а также раннего обнаружения неисправностей и недостатков конструкции в процессе стендовых испытаний [14–16].

Сложность оценки эффективности систем диагностики, основанных на виброметрировании корпусных деталей редукторов, обусловлена практически полным отсутствием экспериментально подтвержденных и верифицированных диагностических признаков с привязкой к конкретным видам дефектов зубчатых передач. Современная концепция развития средств диагностики часто основывается на накоплении информации о результатах виброметрирования конкретных образцов изделий с последующей обработкой и отслеживанием трендов изменений (пассивная вибродиагностика). Альтернативным подходом к повышению эффективности средств вибродиагностики является развитие сложных математических моделей для оценки динамического отклика системы с введением артефактов, имитирующих дефекты деталей (активная вибродиагностика) [17, 18].

Опыт эксплуатации зубчатых механизмов в составе машин показывает, что процесс развития дефекта от момента зарождения до возникновения поломки длится в течение времени, достаточного для безопасного останова машины, в том числе летательного аппарата с выполнением аварийной посадки. Возможность раннего обнаружения возникновения дефекта детали в процессе эксплуатации позволяет качественно повысить уровень безопасности ответственных изделий, а также продлить их жизненный цикл.

На основе разработанной динамической модели проведены расчеты для моделей передач с внесенными дефектами и по результатам сформированы гипотезы о значениях частот в спектральном составе вибраций, наиболее чувствительных к одному из наиболее опасных видов отказа зубчатых колес – развитию усталостной трещины в ножках зубьев. На испытательных стендах ЦИАМ данная гипотеза была подтверждена в ходе испытаний с доведением до усталостной поломки зубьев [19], в ходе которых амплитуда контролируемой частоты в спектре увеличилась более чем в 3 раза, то есть она может эффективно контролироваться штатными средствами диагностики по измерениям с датчиков вибраций. Важно отметить, что

изменения в спектральном составе сигналов вибраций на основе выбранного признака при работе передачи проявились ранее, чем изменения в сигналах динамических напряжений у впадин зубьев; это позволяет остановить работу передачи до момента ее разрушения, что особенно актуально для редукторов вертолетов и авиационных двигателей. Для проверки последнего утверждения был проведен набор дополнительных экспериментов на зубчатых передачах с внесенной у впадин зубьев рисккой для инициирования процесса развития усталостных трещин. Во всех случаях на основе контроля значения амплитуды вибраций на выбранном частотном диапазоне испытания останавливались при ее росте в 2 раза и более. При этом не происходило разрушения зубчатых колес или изменений в работе передачи, однако результаты металлографических исследований установили развитие усталостной трещины в корне зуба на длину более половины ширины зуба на диаметре впадин.

### Выводы

1. Разработаны и валидированы гибридные динамические модели зубчатых передач, рассматривающие в качестве основного источника возбуждения крутильных колебаний в зубчатых передачах переменную жесткость зацепления как составляющую статической кинематической погрешности. Предложенный подход позволяет оценивать влияние макро- и микрогеометрии профилей зубьев на динамическую активность передач.

2. Повышение надежности зубчатых передач путем исключения дефектов, вызванных высокими и непрогнозируемыми динамическими нагрузками, может быть достигнуто за счет исключения резонансных режимов работы инструментами отстройки собственных частот, применением передач с высоким коэффициентом перекрытия в зацеплении, введением профильной модификации зубьев.

3. Верификация динамических моделей зубчатых передач является необходимым этапом для перехода к разработке эффективных диагностических показателей активных методов вибродиагностики трансмиссий.

### Библиографические ссылки

1. Комплексная фрактодиагностика авиационных конических зубчатых колес / Н. В. Туманов, Н. А. Воробьева, А. И. Калашникова, Д. В. Калинин, Е. В. Кожаринов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84, № 2, С. 55–63. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-2-55-63

2. *Zimeng Liu, Hongxu Tian, Hui Ma, Cheng Chang, Hansheng Song, Wenkang Huang, Jiazan Zhu, Pengyu Yan, Changqing Hu, Tianyu Zhao, Zhike Peng* (2024) Simulation and experimental analysis of traveling wave resonance of flexible spiral bevel gear system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 224 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112071> (accessed: 15.08.2024).

3. *Яковкин В. Н., Нихамкин М. Ш., Саженков Н. А.* Математическое моделирование демпфера сухого трения для зубчатого колеса газотурбинных двигателей. Ч. 1 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2022. № 70. С. 140–149. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.13

4. Математическое моделирование демпфера сухого трения для зубчатого колеса газотурбинного двигателя. Ч. 2 / В. Н. Яковкин, А. Б. Пищальников, И. И. Соколов, М. Ш. Нихамкин, Н. А. Саженков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2022. № 70. С. 150–159. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.14

5. *Yakovkin V.N., Besschetnov V.A.* (2021) Verification of a Mathematical Model of a Dry Friction Damper for a GTE Blade. *Journal of Physics: Conference Series: materials of International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020)*, 2021, vol. 1891, p. 012037.0.

6. *Кожаринов Е. В., Калинин Д. В., Голованов В. В.* Снижение вибронпряженности авиационных зубчатых передач // Авиационные двигатели. 2020. № 6. С. 57–64.

7. *Калинин Д. В., Темис Ю. М.* Анализ влияния сил трения в зацеплении на динамические нагрузки в зубчатых передачах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 6 (699). С. 32–43. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43

8. *Brethee K.F., Gu F., Ball A.D.* (2016). Frictional effects on the dynamic responses of gear systems and the diagnostics of tooth breakages. *Systems Science; Control Engineering*, no. 4(1), pp. 270–284 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1080/21642583.2016.1241728> (accessed: 15.08.2024).

9. *Пушкарев И. А.* Моделирование динамики планетарных передач с элементами повышенной податливости // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 43–48. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-43-48

10. *Andreas Beinstingel, Robert G. Parker, Steffen Marburg* (2022) Experimental measurement and numerical computation of parametric instabilities in a planetary gearbox. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 536 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117160> (accessed: 15.08.2024).

11. *Dorofeev D.V., Kalinin D.V., Kozarinov E.V.* (2021) Designing gears with minimal effective transmission error by optimizing the parameters of tooth modification. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1891. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012051

12. *Kalinin D.V.* (2021) Dynamic loading of spur gears with linear tooth profile modification: modelling

and experimental comparisons. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1891. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012051

13. Шеховцева Е. В., Шеховцева Т. В. Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 3. С. 16–25. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-16-25

14. Yu L, Yao X, Yang J, Li C. (2020) Gear Fault Diagnosis through Vibration and Acoustic Signal Combination Based on Convolutional Neural Network. [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3390/info11050266> (accessed: 15.08.2024).

15. Xueyi L.I., Jialin L.I., Yongzhi Q.U., David H.E. (2020) Semi-supervised gear fault diagnosis using raw vibration signal based on deep learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, is. 2, pp. 418-426 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.04.018> (accessed: 15.08.2024).

16. Xiaochi Luan, Gongmin Liu, Yundong Sha, Hongbin He, Xiaopeng Guo (2021) Experiment study on traveling wave resonance of fatigue fracture of high-speed bevel gear in aero-engine based on acoustic measurement method. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 511, p. 116345 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116345> (accessed: 15.08.2024).

17. Hanjun Jiang, Fuhao Liu, Jianqiang Zhang, Yaobing Li, Wenqiang Han, Jiahao Liu, Guimian Liu, Xihao Yang, Xia Kong (2024) Dynamics analysis of spur gears considering random surface roughness with improved gear body stiffness. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 158 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104583> (accessed: 15.08.2024).

18. Chen T., Wei P., Zhu C., Zeng P., Li D., Parker R. and Liu H. (2023) Experimental Investigation of Gear Scuffing for Various Tooth Surface Treatments. *Tribology Transactions*, no. 66 (1), pp. 35-46.

19. Калинин Д. В., Земсков А. А., Куц М. С. Анализ возможностей методов вибродиагностики для контроля технического состояния основных деталей трансмиссий вертолетов // Авиационные двигатели. 2022. № 4 (17). DOI: 10.54349/26586061-2022-4-05

## References

1. Tumanov N.V., Vorob'eva N.A., Kalashnikova A.I., Kalinin D.V., Kozharinov E.V. (2018) [Complex fractal diagnostics of aviation bevel gears]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, vol. 84, no. 2, pp. 55-63 (in Russ.). DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-2-55-63

2. Zimeng Liu, Hongxu Tian, Hui Ma, Cheng Chang, Hansheng Song, Wenkang Huang, Jiazan Zhu, Pengyu Yan, Changqing Hu, Tianyu Zhao, Zhike Peng (2024) Simulation and experimental analysis of traveling wave resonance of flexible spiral bevel gear system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 224 [Electronic

resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112071> (accessed: 15.08.2024).

3. Yakovkin V.N., Besschetnov V.A. (2021) [Mathematical modeling of a dry friction damper for a gear wheel of gas turbine engines. Part 1]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Aerokosmicheskaya tekhnika*, no. 70, pp. 150-159 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.14

4. Yakovkin V.N., Pishchal'nikov A.B., Sokolov I.I., Nihamkin M.Sh., Sazhenkov N.A. (2022) [Mathematical modeling of a dry friction damper for a gas turbine engine gear wheel. Part 2]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Aerokosmicheskaya tekhnika*, no. 70, pp. 150-159 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.14

5. Yakovkin V.N., Besschetnov V.A. (2021) Verification of a Mathematical Model of a Dry Friction Damper for a GTE Blade. *Journal of Physics: Conference Series: materials of International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020)*, 2021, vol. 1891, p. 012037.0.

6. Kozharinov E.V., Kalinin D.V., Golovanov V.V. [Reducing vibration stress of aircraft gears]. *Aviacionnye dvigateli*, no. 1 (6), pp. 57-64 (in Russ.).

7. Kalinin D.V., Temis Yr.M. (2018). [Analysis of the influence of friction forces in engagement on dynamic loads in gear transmissions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*, vol. 6, no. 699, pp. 32-43 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43

8. Brethee K.F., Gu F., Ball A.D. (2016). Frictional effects on the dynamic responses of gear systems and the diagnostics of tooth breakages. *Systems Science. Control Engineering*, no. 4 (1), pp. 270-284 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1080/21642583.2016.1241728> (accessed: 15.08.2024).

9. Pushkarev I.A. (2018) [Modeling the dynamics of planetary gears with elements of increased compliance]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 21, no. 2, pp. 43-48. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-43-48

10. Andreas Beinstingel, Robert G. Parker, Steffen Marburg (2022) Experimental measurement and numerical computation of parametric instabilities in a planetary gearbox. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 536 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117160> (accessed: 15.08.2024).

11. Dorofeev D.V., Kalinin D.V., Kozharinov E.V. (2021) Designing gears with minimal effective transmission error by optimizing the parameters of tooth modification. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1891. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012051

12. Kalinin D.V. (2021) Dynamic loading of spur gears with linear tooth profile modification: modelling and experimental comparisons. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1891. DOI: 10.1088/1742-6596/1891/1/012051

13. Shekhovceva, E.V., Shekhovceva, T.V. (2023) [Design and technological engineering of working surfaces of gear wheels of gas turbine engines]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 3, pp. 16-25 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-16-25

14. Yu L, Yao X, Yang J, Li C. (2020) Gear Fault Diagnosis through Vibration and Acoustic Signal Combination Based on Convolutional Neural Network [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3390/info11050266> (accessed: 15.08.2024).

15. Xueyi L.I., Jialin L.I., Yongzhi Q.U., David H.E. (2020) Semi-supervised gear fault diagnosis using raw vibration signal based on deep learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, is. 2, pp. 418-426 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.04.018> (accessed: 15.08.2024).

16. Xiaochi Luan, Gongmin Liu, Yundong Sha, Hongbin He, Xiaopeng Guo (2021) Experiment study on traveling wave resonance of fatigue fracture of high-speed bevel gear in aero-engine based on acoustic measurement method. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 511, p. 116345 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116345> (accessed: 15.08.2024).

17. Hanjun Jiang, Fuhao Liu, Jianqiang Zhang, Yaobing Li, Wenqiang Han, Jiahao Liu, Guimian Liu, Xihao Yang, Xia Kong (2024) Dynamics analysis of spur gears considering random surface roughness with improved gear body stiffness. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 158 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2023.104583> (accessed: 15.08.2024).

18. Chen T., Wei P., Zhu C., Zeng P., Li D., Parker R. and Liu H. (2023) Experimental Investigation of Gear Scuffing for Various Tooth Surface Treatments. *Tribology Transactions*, № 66(1), pp. 35-46.

19. Kalinin D.V., Zemskov A.A., Kuc M.S. (2022) [Analysis of the capabilities of vibration diagnostics methods for monitoring the technical condition of the main parts of helicopter transmissions]. *Aviacionnye dvigateli*, no. 4 (17) (in Russ.). DOI: 10.54349/26586061-2022-4-05

### Problems of Aviation Gear Dynamics

*D.V. Kalinin*, PhD in Engineering, Central Institute of Aviation Motors; Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The relevance of gearing dynamics study increases with the development of gear drive designs: increasing their speed and specific transmitted load. As for the standard techniques, the question of dynamic load assessment in gears is considered partially and requires considerable improvement. The article describes the well-known types of failures and consequences of high dynamic loading during operation of aircraft engine gearboxes. A review of the existing assessment methods of gearbox dynamics is carried out, and an original approach to dynamic process modeling in gears, determining dynamic loads and natural vibration frequencies, based on the experience analysis of the breakdowns and development of highly loaded aircraft gears, is proposed. Recommendations for reducing gearing vibration activity at the design stage are formulated, as well as qualitative approaches to transmissiointechnical condition analysis on the basis of vibration diagnostic methods. A dynamic model of a spur gear, considering variable meshing stiffness as the main source of torsional vibration excitation and dynamic loads, is described. Meshing stiffness function analysis for a pair of gears by means of the finite element method (FEM) makes it possible to assess the influence of tooth geometry parameters, including microgeometry, for example, profile modification. The developed dynamic model is used to develop recommendations for noise and vibration level reduction in spur gears, and for diagnostic feature of fatigue crack propagation in the tooth fillet. The dynamic model was validated in experimental studies on the test bench of CIAM with gear dynamic strain-gauging.*

**Keywords:** dynamic model, gearings, natural frequency, fatigue strength.

Получено 01.11.2024

### Образец цитирования

*Калинин Д. В. Проблемы динамики авиационных зубчатых передач // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 45–54. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-45-54*

### For Citation

*Kalinin D.V. (2024) [Problems of Aviation Gear Dynamics]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 45-54 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-45-54*