

УДК 629.735.45:621.833(031)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИФУРКАЦИЙ ВИБРАЦИЙ В АВИАЦИОННЫХ ТРАНСМИССИЯХ

© 2015 В. Л. Дорофеев, В. В. Голованов, С. Г. Гукасян,
Д. В. Дорофеев, В. Г. Сторчак, И. А. Афанасьев

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

В трансмиссионной системе авиационного двигателя в качестве передачи крутящего момента от двигателя к агрегатам применяются зубчатые передачи. В процессе нагружения их зубьев возникают различные силы. Зубчатые колёса, входящие в состав трансмиссионной системы авиационного двигателя, состоят из таких элементов, на которые действует как жёсткая, так и мягкая восстанавливающие силы. Скачкообразное изменение жёсткости при изменении числа пар зубьев, находящихся в зацеплении, является причиной параметрических колебаний зубчатых колёс. Из этого следует, что трансмиссия является не только нелинейной, но и параметрической колебательной системой. Максимальная амплитуда при прохождении резонанса не реализуется, когда быстро изменяется частота вращения. И на стационарном режиме, при одинаковых значениях частоты вращения, можно регистрировать два различных значения колебаний. Эта двойственность называется бифуркацией. В авиационных трансмиссиях нередко наблюдаются бифуркации вибраций. В статье теоретически доказано существование бифуркаций вибраций в авиационных трансмиссиях и описано экспериментальное исследование, подтверждающее теоретические выводы о наличии бифуркаций колебательных процессов в зубчатых передачах. Определены бифуркационные параметры.

Зубчатые передачи, вибрации, бифуркации, бифуркационный параметр.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-183-192

Трансмиссионная система авиационного двигателя состоит из механических и электрических частей. Для передачи крутящего момента от двигателя на винты или к агрегатам обычно применяются зубчатые передачи. Трансмиссия, или, по определению, передача крутящего момента выполняется множеством зубьев ведущих колёс, последовательно входящих в силовое зацепление с зубьями парного колеса системы и таким образом, передающих крутящий момент, а также изменяющих угловую скорость ведомых колёс.

В процессе циклического нагружения зубьев возникают силы, периодически

действующие на опоры и на все детали трансмиссионной системы. Под действием этих сил детали деформируются.

Поскольку деформации регистрируются как функции времени, а возбуждающие силы задаются как функции угла поворота ведущего звена, то авиационная трансмиссия – это нелинейная динамическая система.

Известно [1], что в нелинейных системах при медленном уменьшении или увеличении частотного или силового параметра происходит скачок амплитуды колебаний так, как показано на рис. 1.

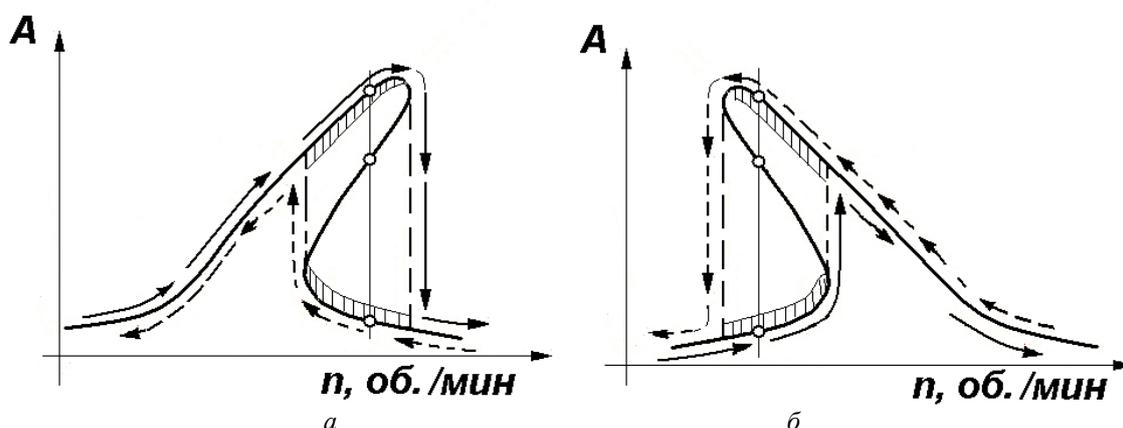


Рис. 1. Амплитудная зависимость при жёсткой (а) и мягкой (б) упругой силе

Кривые, показанные на рис. 1, соответствуют простейшим нелинейным колебательным системам, описываемым, например, уравнением Дуффинга. Результатом решения этого уравнения является не одно, а три значения амплитуды, которые показаны на рис. 1 круговыми

маркерами. Среднее значение – неустойчивое, поэтому на практике не регистрируется. Два других проявляются на амплитудных характеристиках, показанных на рис. 2, а и 2, б при медленном увеличении, а на рис. 2, в и 2, г при медленном уменьшении частоты вращения.

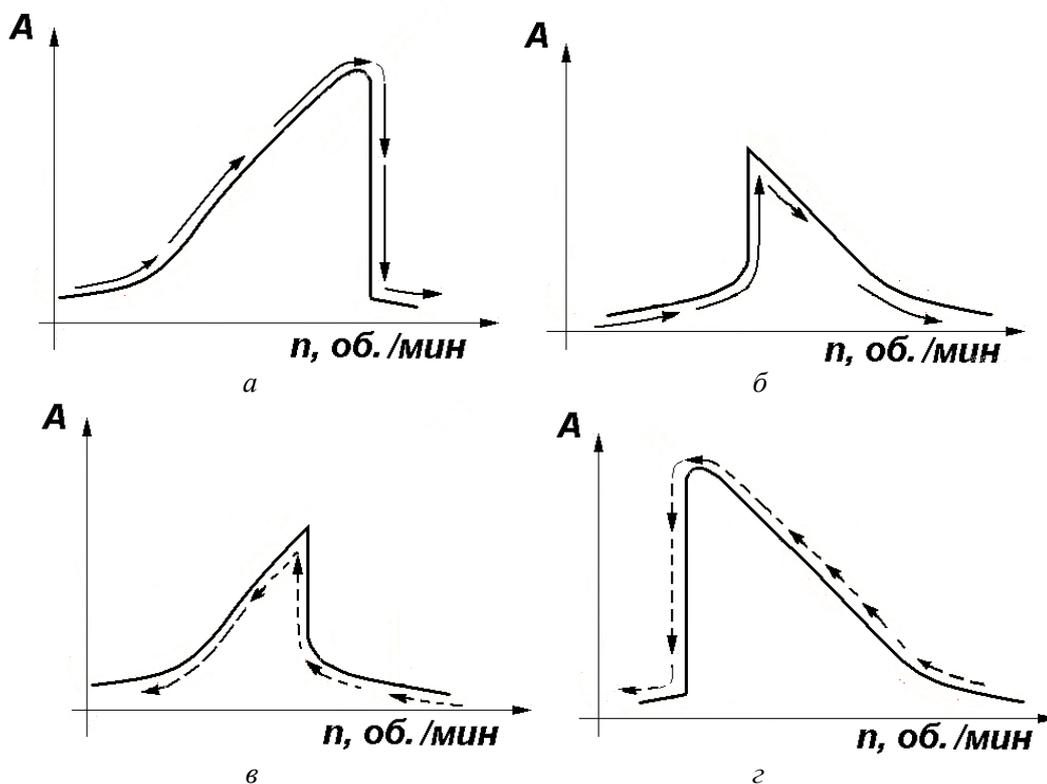


Рис. 2. Амплитудная характеристика при увеличении (а,б) и уменьшении (в,г) частоты вращения для жёсткой (а,в) и мягкой (б,г) упругой силе

Зубчатые колёса, составляющие трансмиссионную систему авиационного двигателя, состоят из элементов, на которые действует как жёсткая, так и мягкая восстанавливающая силы. Также большое влияние оказывает скачкообразное изменение жёсткости при изменении числа пар зубьев, находящихся в зацеплении. Часто именно это изменение рассматривают как основную причину параметрических колебаний зубчатых колёс. Следовательно трансмиссия является не только нелинейной, но и параметрической колебательной системой.

При быстром изменении параметра (частота вращения) максимальная амплитуда при прохождении резонанса не реализуется. Поэтому после выхода на стационарный режим амплитуда колебаний

может иметь как минимальное, так и максимальное значение, и при одинаковых значениях параметра можно регистрировать два различных значения колебаний. Эта двойственность и называется бифуркацией.

Одной из первых работ, в которой были получены расчётные параметры бифуркационных процессов, была [2].

Частота вращения колёс – не единственный бифуркационный параметр трансмиссии. Другой важный параметр – нагрузка. Принудительным изменением шага воздушного винта можно, сохраняя постоянную скорость вращения, изменять крутящий момент, передаваемый зубчатой передачей. Если в линейной параметрической системе при медленном увеличении силы, приложенной к системе,

Результаты расчёта показаны на рис. 5. Пунктирной линией обозначена амплитудная характеристика при медленном увеличении частоты вращения, сплошная линия соответствует уменьшению частоты вращения.

Результаты расчёта показали, что бифуркации есть вблизи основного резонанса и третьего субгармонического резонанса.

Более подробный расчёт временных процессов выполнен для частоты вращения 3000 об/мин. Результаты показаны на рис. 6-8.

Более подробный расчёт временных процессов выполнен для частоты вращения 3000 об/мин. Результаты показаны на рис. 6-8.

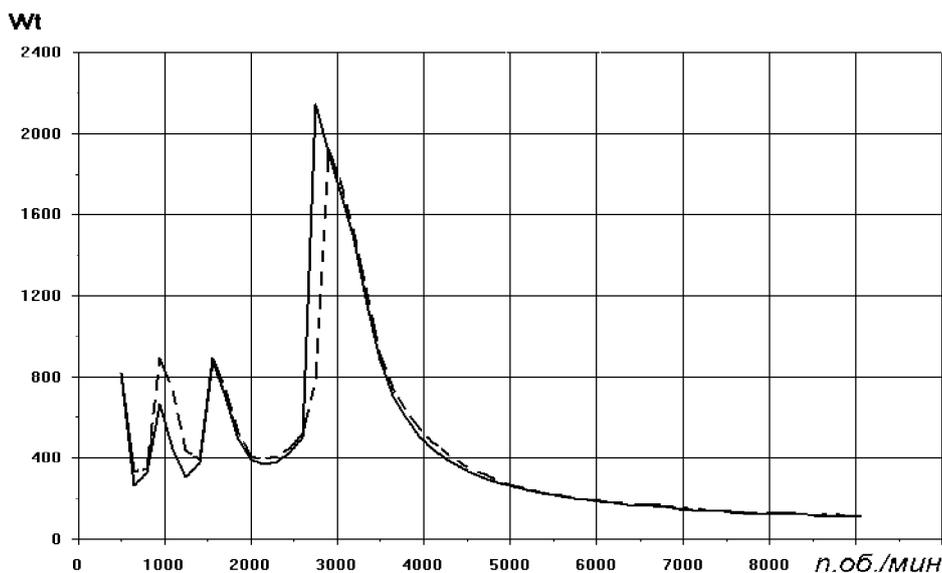


Рис. 5. Амплитудная характеристика при медленном изменении частоты вращения

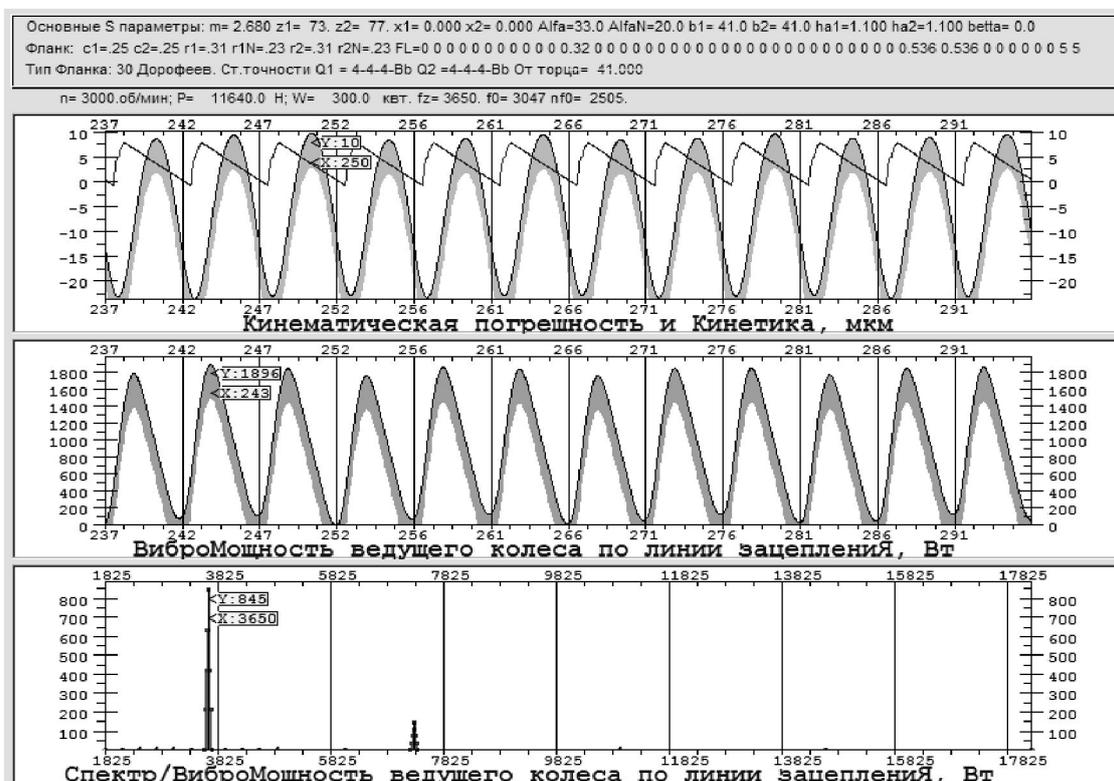


Рис. 6. Результаты расчёта кинематической погрешности и вибрации зубчатых колёс

Анализ показывает, что независимо от того, увеличивается или уменьшается частота вращения, в средней части линии зацепления контакт зубьев размыкается.

За один теоретический цикл зацепления зубья имеют два цикла нагружения.

Исследовались также характеристики колебаний при двукратном увеличении нагрузки.

Результаты расчёта (рис. 9) показали, что бифуркации есть только вблизи третьего субгармонического резонанса. Вблизи основного резонанса бифуркаций нет. Результаты более подробного анализа временных процессов для частоты вращения 3000 об/мин показаны на рис. 10-12.

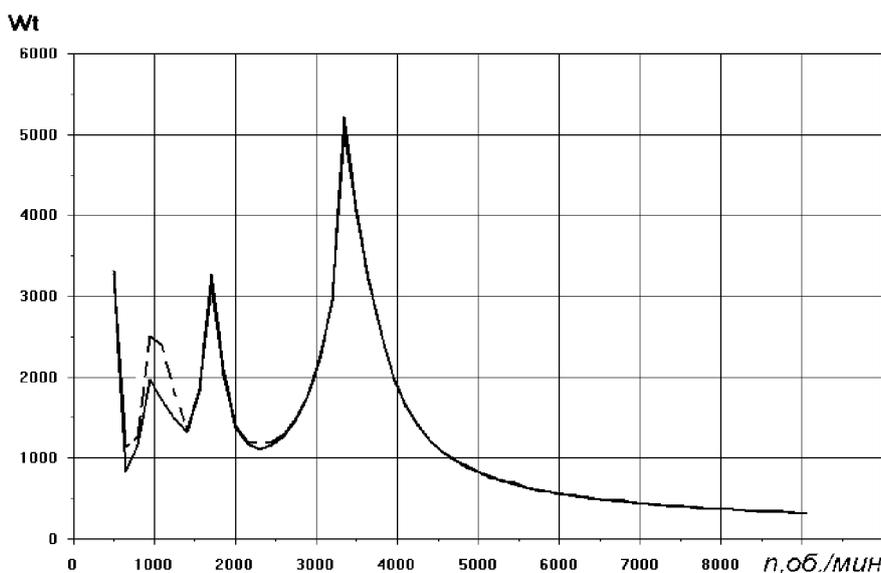


Рис. 9. Амплитудная характеристика при двукратном увеличении нагрузки

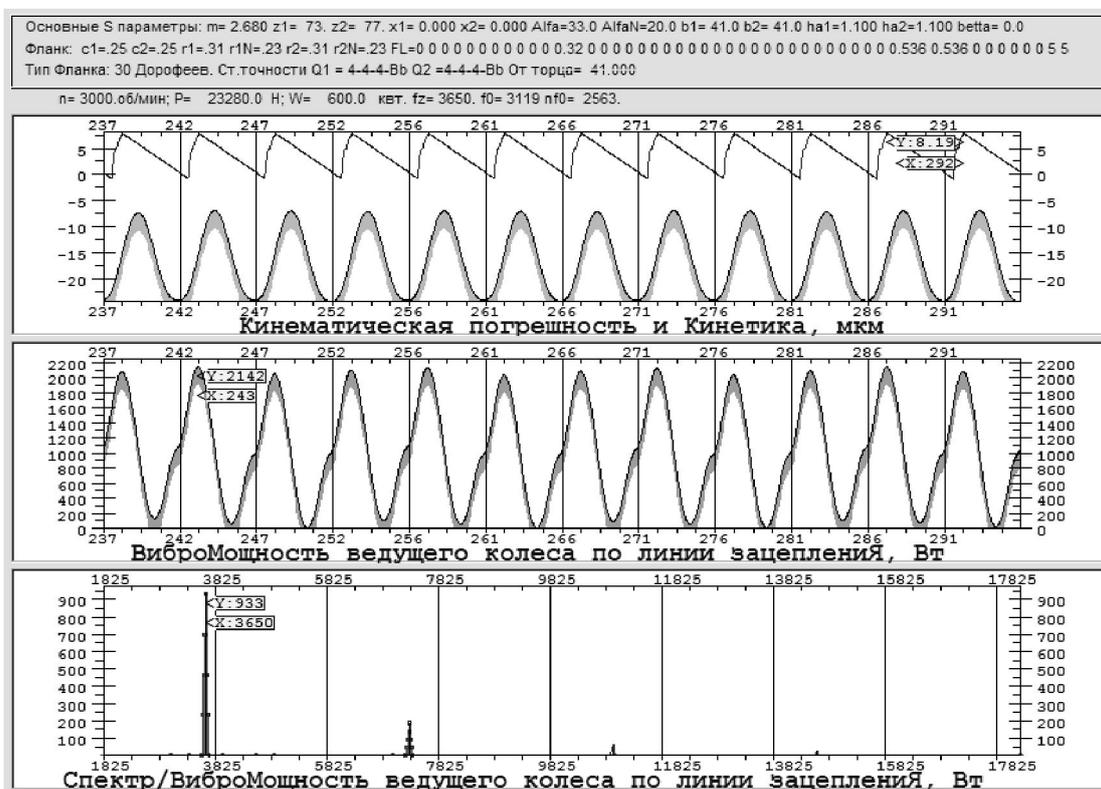


Рис. 10. Результаты расчёта кинематической погрешности и вибрации зубчатых колёс

Процесс зацепления более нагруженной зубчатой передачи не сопровождается размыканием контакта. За один теоретический цикл зацепления зубья имеют только один цикл нагружения, что является более благоприятным фактором для повышения надёжности зубчатых передач.

Важно то, что, несмотря на двукратное увеличение нагрузки, контактные изгибные напряжения и вибрации увеличились незначительно.

Для подтверждения бифуркаций и развития метода расчёта динамических

колебательных процессов на испытательном стенде для зубчатых передач и редукторов У-394 ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (рис. 13) были проведены испытания зубчатых колёс. В процессе испытаний осуществлялась запись уровней вибраций в вертикальном, горизонтальном и осевом направлениях. Для экспериментального исследования динамических процессов в зубчатых передачах была построена (рис. 14) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) по виброускорениям при увеличении и уменьшении частоты вращения колёс.

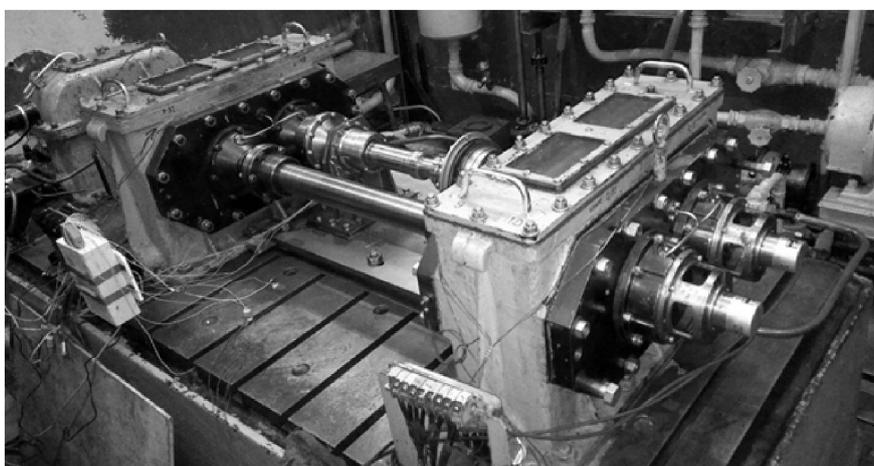


Рис. 13. Испытательный стенд для зубчатых передач и редукторов У-394

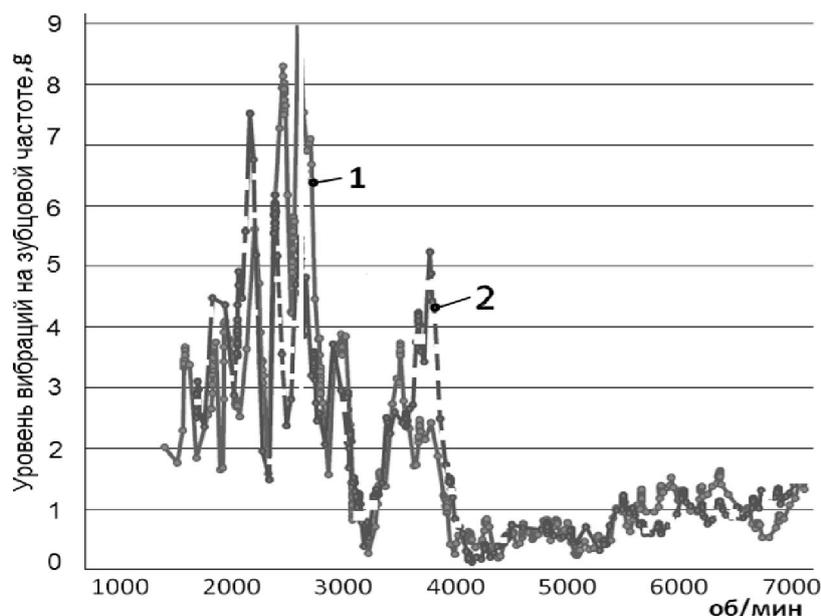


Рис. 14. АЧХ: сплошная линия (1) соответствует медленному увеличению частоты вращения; пунктирная линия (2) соответствует уменьшению частоты вращения

Существенная разница амплитуд виброускорений для одной точки при увеличении и уменьшении частоты вращения ведомой шестерни подтверждает наличие бифуркационных процессов в испытуемых зубчатых передачах.

Выводы

1. Теоретически доказано существование бифуркаций вибраций в авиационных трансмиссиях.
2. Экспериментальные исследования

подтвердили теоретические выводы о наличии бифуркаций колебательных процессов в зубчатых передачах.

3. Основными бифуркационными параметрами являются частота вращения колес при медленном её изменении и нагрузка.

4. Экспериментально на одной и той же частоте вращения были зарегистрированы бифуркационные колебания, отличающиеся по амплитуде в два раза.

Библиографический список

1. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М.: Издательство иностранной литературы, 1952. 264 с.
2. Дорофеев В.Л. Основы расчёта нагрузок и напряжений, действующих в зацеплении цилиндрических зубчатых передач // Вестник машиностроения. 1983. № 3. С. 14-16.
3. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Дорофеев Д.В. Система моделирования «AEROFLANK» & прямой синтез износостойких и малошумных зубчатых передач // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми механічного приводу. 2013. №40(1013). С. 39-48.

Информация об авторах

Дорофеев Владислав Леонидович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отделения динамики и прочности авиационных двигателей, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vld@ciam.ru; vldo@bk.ru. Область научных интересов: динамика авиационных зубчатых передач.

Голованов Виктор Васильевич, начальник отдела авиационных приводов, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: vvg@ciam.ru. Область научных интересов: диагностика зубчатых передач.

Гукасян Сурен Гургенович, начальник сектора экспериментальных исследований, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: gsg@ciam.ru. Область научных интересов: исследование процессов разрушения зубчатых передач.

Дорофеев Дмитрий Владиславович, кандидат технических наук, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: dl@list.ru. Область научных интересов: компьютерные системы проектирования авиационных приводов.

Сторчак Виктория Геннадиевна, инженер сектора экспериментальных исследований, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: svg@ciam.ru. Область научных интересов: тензометрирование и исследование процессов разрушения зубчатых передач.

Афанасьев Иван Александрович, инженер второй категории, сектор экспериментальных исследований, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: u394@ciam.ru. Область научных интересов: роботы и робототехнические системы.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF VIBRATION BIFURCATIONS IN AVIATION TRANSMISSION GEARS

© 2015 V. L. Dorofeyev, V. V. Golovanov, S. G. Ghukasyan, D. V. Dorofeyev, V. G. Storchak, I. A. Afanasyev

Central Institute of aviation motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

Tooth gearings are used in transmission systems of aviation engines to carry the torque from the engine to the accessories. Various forces occur in the course of loading their teeth. The cogwheels making up a part of the transmission system of the aviation engine consist of elements affected both by the rigid and soft restoring forces. Spasmodic change of rigidity in the case of changing the number of engaged couples of teeth causes parametric vibrations of cogwheels. It follows from this that transmission is not only a nonlinear, but also a parametric oscillatory system. The maximum amplitude is not realized when passing the resonance in the case of quick changes of the rotation frequency. Two different values of fluctuation can be registered in the steady-state regime for identical values of the rotation frequency. This duality is called bifurcation. Bifurcations of vibrations can be quite often observed in aviation transmission gears. The existence of bifurcation of vibrations in aviation transmission gears is theoretically proved and the pilot study confirming theoretical conclusions about the existence of bifurcation of oscillatory processes in tooth gearings is described in the paper. Bifurcation parameters are determined.

Tooth gearings, vibrations, bifurcations, bifurcation parameter.

References

1. Stoker J. *Nelineynye kolebaniya v mekhanicheskikh i elektricheskikh sistemakh* [Nonlinear fluctuations in mechanical and electric systems]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ., 1952. 264 p.
2. Dorofeyev V.L. Calculation of the loads and stresses acting during the meshing of cylindrical gears. *Soviet Engineering Research*. 1983. V. 3, no. 3. P. 5-9.
3. Dorofeyev V.L., Golovanov V.V., Dorofeyev D.V. Sistem of modeling of «AEROFLANK» & direct synthesis of wearproof and quiet tooth gearings. *Visnik NTU «HPI». Ceriya: Problemi mekhanichnogo privodu*. 2013. No. 40(1013). P. 39-48. (In Russ.)

About the authors

Dorofeyev Vladislav Leonidovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Chief Researcher, the Department of Dynamics and Strength of Aviation Engines, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: vld@ciam.ru, vldo@bk.ru. Area of Research: dynamics of aviation tooth gearings.

Golovanov Victor Vasilyevich, Head of Department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: yvg@ciam.ru. Area of Research: diagnostics of tooth gearings.

Ghukasyan Suren Gurgenovich, Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: gsg@ciam.ru. Area of Research: processes of destruction of tooth gearings.

Dorofeyev Dmitry Vladislavovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of MATI (Moscow Aviation State University) named after K.E. Tsolkovskiy, Moscow, Russian Federation. E-mail: dl@list.ru. Area of Research: computer systems of designing aviation drives.

Storchak Victoria Gennadiyevna, engineer, Sector of Experimental Research, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: svg@ciam.ru. Area of Research: strain-gaging and processes of destruction of tooth gearings.

Afanasyev Ivan Aleksandrovich, second-rank engineer, Sector of Experimental Research, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: u394@ciam.ru. Area of Research: robots and robotic systems.