

Сундуков А. Е. **ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА И ВЕЛИЧИНЫ БОКОВОГО
ЗАЗОРА НА ВИБРАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ
РЕДУКТОРА ГТД**

ООО «ПКФ «ТСК»

ул. Ново-Садовая, 381, корп.1, этаж 3,
г. Самара, 443125,
Российская Федерация

sunduckov@mail.ru

Шахматов Е. В.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, 443086,
Российская Федерация

shakhm@ssau.ru

Основными дефектами редукторов авиационных газотурбинных двигателей является износ боковых поверхностей зубьев и соответствующий рост величины бокового зазора. Основная опасность износа зубьев заключается в генерации вибрации, приводящей к усталостным поломкам элементов конструкции двигателя. На примере гармоник пересопряжения зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты» (f_{z1}) и субгармоник одна треть f_{z1} и две треть f_{z1} от неё, а также составляющей, вызывающей усталостные поломки элементов конструкции двигателя, показано изменение вибрационного состояния двигателя при развитии дефектов. Оценена чувствительность рассматриваемых составляющих к данным дефектам. Показана потенциальная опасность составляющей две треть от зубцовой частоты.

Ключевые слова: планетарный редуктор; износ зубьев; боковой зазор; вибрационное состояние редуктора

1 Введение

Редукторы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) предназначены для обеспечения увеличения крутящего момента и оптимальной частоты вращения воздушных винтов и вентиляторов. Работа в широком диапазоне передаваемой нагрузки и частот вращения роторов при стационарных и переходных режимах делает их наиболее нагруженными узлами ГТД. Наиболее распространёнными их дефектами являются износ боковых поверхностей зубьев и соответствующий рост величины бокового зазора [1]. Развитие данных дефектов существенно увеличивает и без того достаточно высокую их виброактивность. Рост величины износа боковых поверхностей зубьев приводит к генерации колебаний, вызывающих усталостные поломки элементов конструкции двигателей [2,3].

2 Постановка задачи и метод

Целью работы является оценка влияния режима работы двигателя на вибрационное состояние редуктора. Исследовалась вибра-

ция с вибропреобразователя, установленного на стыке картеров турбокомпрессора и редуктора. Ось чувствительности ориентирована в вертикальном направлении (ось Y). Исследовалось вибрационное состояние одной из модификаций двигателя НК-12. Наибольший износ зубьев его редуктора происходит в паре «солнечная шестерня – сателлиты». В работе [4] для данного случая была предложена имитационная математическая модель вибрационного состояния редуктора при развитии износа боковых поверхностей зубьев этой пары. Из анализа модели следует, что при этом происходит рост интенсивности трёх гармонических рядов, параметров амплитудной и частотной модуляции и вибрационного шума. Выполненные ранее исследования показали, что наиболее значимый рост интенсивности происходит в ряду, включающем субгармоники от зубцовой частоты [5]. Первая составляющая этого ряда определяется произведением числа сателлитов (в нашем случае три) на частоту вращения солнечной шестерни в приведенном движении. Широко используемая в диагностике износа интенсивность кратных зубцовых гармоник в рассматриваемом случае

имеет крайне низкое значение, соизмеримо с интенсивностью вибрационного шума. Соответствующие данные представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Гармоника	Интенсивность, м/с ²
f_{z1}	14.93
$2 f_{z1}$	2.44
$3 f_{z1}$	0.48
$4 f_{z1}$	0.38
$5 f_{z1}$	0.05

Здесь f_{z1} - зубцовая гармоника пересопряжения зубьев пары «солнечная шестерня – сателлиты».

Как видно из представленных данных, уверенно идентифицировать можно только первые две гармоники. Поэтому для дальнейшего анализа были выбраны следующие составляющие:

- субгармоника зубцовой частоты ($1/3 f_{z1}$);
- субгармоника зубцовой частоты ($2/3 f_{z1}$);
- зубцовая гармоника (f_{z1});
- гармоника, вызывающая усталостные поломки элементов конструкции двигателя ($f_{изн}$) [3].

Исследовался весь диапазон стационарных режимов работы двигателя: малый газ (МГ), 0.4 номинального (0.4Ne), 0.7 номинального (0.7Ne), 0/85 номинального (0.85Ne), номинальный (Ne) и максимальный (Max). Следует отметить, что частота вращения турбокомпрессора (и соответственно солнечной шестерни) на режиме малого газа примерно на 20% меньше частоты вращения на остальных стационарных режимах работы двигателя. Интенсивность составляющих (амплитудное значение) оценивалось по данным автоспектра с разрешением по частоте 1.76 Гц. Исследовались два двигателя с минимальным (0.30 мм) и максимальным (0.43 мм) боковыми зазорами, выбранные из 18 отремонтированных двигателей, и два двигателя с минимальным суммарным полным износом (0.018 мм) и максимальным (0.036), выбранные из 15 двигателей, пришедших в ремонт на завод-изготовитель [3].

На рисунках 1–8 представлены получен-

ные зависимости.

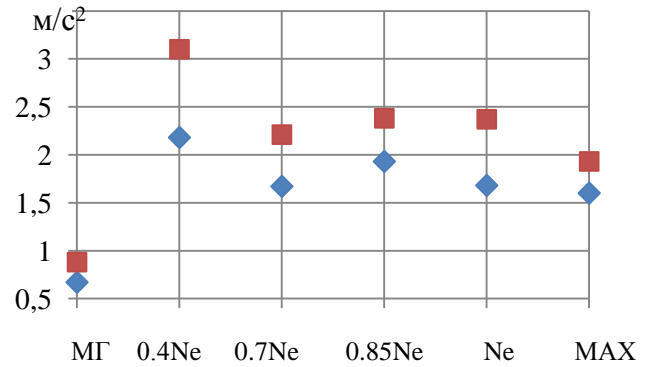


Рисунок 1. Зависимость интенсивности составляющей $1/3 f_{z1}$ от режима работы двигателя при двух вариантах бокового зазора: \blacklozenge - 0.30 мм, \blacksquare - 0.43 мм

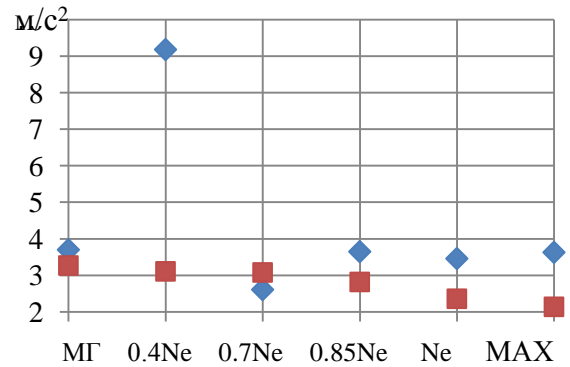


Рисунок 2. Зависимость интенсивности составляющей $2/3 f_{z1}$ от режима работы двигателя при двух вариантах бокового зазора: \blacklozenge - 0.30 мм, \blacksquare - 0.43 мм

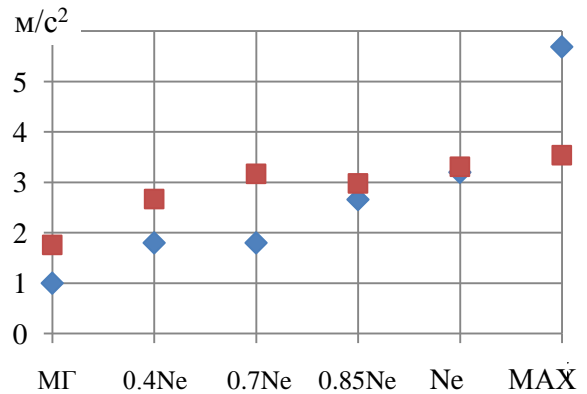


Рисунок 3. Зависимость интенсивности составляющей f_{z1} от режима работы двигателя при двух вариантах бокового зазора: \blacklozenge - 0.30 мм, \blacksquare - 0.43 мм

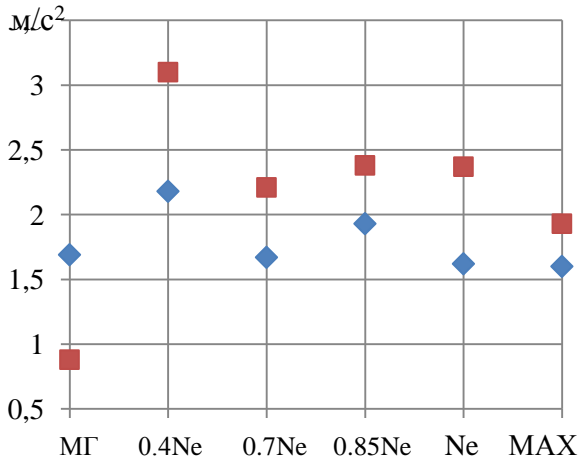


Рисунок 4. Зависимость интенсивности составляющей $f_{изн}$ от режима работы двигателя при двух вариантах бокового зазора: \blacklozenge – 0.30 мм, \blacksquare – 0.43 мм

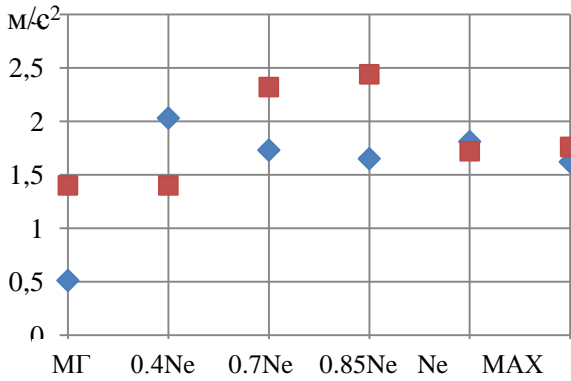


Рисунок 5. Зависимость интенсивности составляющей $1/3 f_{z1}$ от режима работы двигателя при двух вариантах износа: \blacklozenge – 0.018 мм, \blacksquare – 0.036 мм

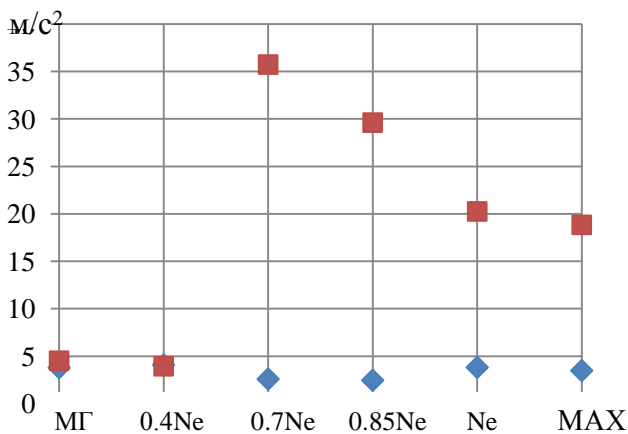


Рисунок 6. Зависимость интенсивности составляющей $2/3 f_{z1}$ от режима работы двигателя при двух вариантах износа: \blacklozenge – 0.018 мм, \blacksquare – 0.036 мм

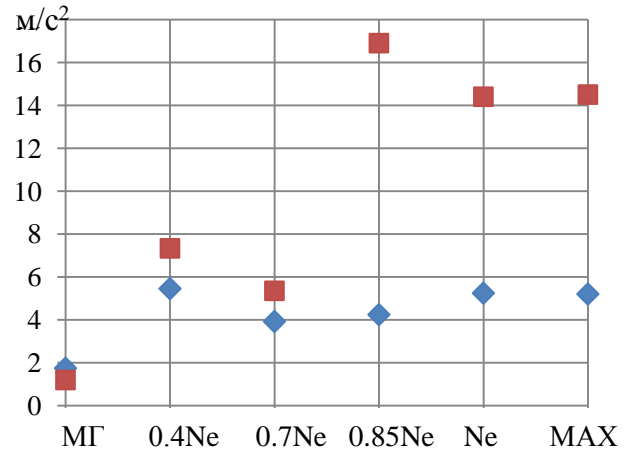


Рисунок 7. Зависимость интенсивности составляющей f_{z1} от режима работы двигателя при двух вариантах износа: \blacklozenge – 0.018 мм, \blacksquare – 0.036 мм

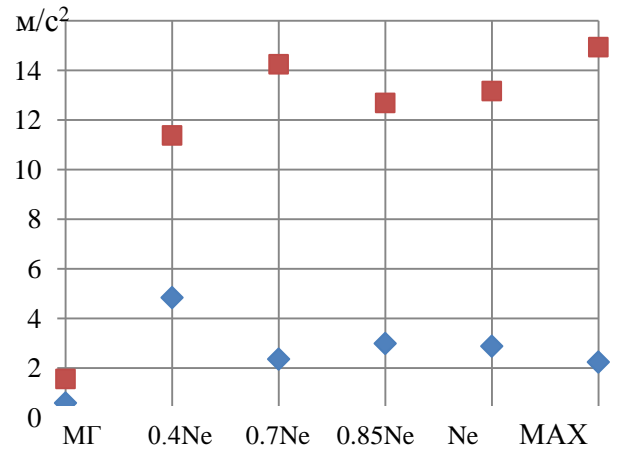


Рисунок 8. Зависимость интенсивности составляющей $f_{изн}$ от режима работы двигателя при двух вариантах износа: \blacklozenge – 0.018 мм, \blacksquare – 0.036 мм

3 Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов позволяет сделать несколько замечаний:

- увеличение режима работы двигателя приводит к росту (в среднем) составляющих f_{z1} (боковой зазор) и $f_{изн}$ и f_{z1} (износ);
- изменение максимальной интенсивности рассмотренных гармоник составило: для бокового зазора $1/3 f_{z1} - 1.42$ раза, $2/3 f_{z1} - 0.36$ раза, $f_{z1} - 0.62$ раза, $f_{изн} - 1.35$ раза, для износа: $1/3 f_{z1} - 1.20$ раза, $2/3 f_{z1} - 8.77$ раза, $f_{z1} - 2.95$ раза, $f_{изн} - 3.09$ раза.

Как видно из полученных данных наибольшая чувствительность к увеличению бокового зазора отмечается для составляю-

шей f_{z1} , к росту величины износа $2/3 f_{z1}$, f_{z1} , $f_{изн}$. Обращает на себя внимание существенное превышение максимальных значений интенсивности составляющей $2/3 f_{z1}$ над остальными как для бокового зазора так и для износа. Как показано в [3] поломки элементов конструкции двигателя происходят на частоте составляющей $f_{изн}$ при превышении её интенсивности определённого уровня. Однако существенно больший рост интенсивности составляющей $2/3 f_{z1}$ даёт основание рассматривать её как потенциально опасный источник вибрации. Вопрос проявления от неё поломок связан с возможностью возбуждения крутильных колебаний вращающейся системы двигателя.

4 Заключение

В среднем монотонный рост интенсивности вибрации с увеличением режима работы двигателя из двенадцати рассмотренных составляющих отмечается только для гармоник f_{z1} (боковой зазор) и $f_{изн}$ и f_{z1} (износ).

Помимо составляющей $f_{изн}$, потенциально опасную с точки зрения поломок элементов конструкции двигателя может представлять составляющая $2/3 f_{z1}$. Поэтому в случае необходимости отстройки собственных частот элементов конструкции компрессора двигателя от частоты составляющей $f_{изн}$ необходимо исключить их приближение к частоте составляющей $2/3 f_{z1}$.

Список использованных источников

[1] Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник / В. И. Алексеев, В. М. Ананьев, М. М. Булыгина [и др.] ; под редакцией Э. Б. Вулгакова. Москва : Машиностроение, 1981. – 374 с.

[2] Курушин, М. И. Экспериментальные исследования причин возбуждения колебаний элементов турбовинтового двигателя с дифференциальным редуктором / М. И. Курушин, В. Б. Балякин, А. М. Курушин // Известия Самарского центра РАН. – 2014. – Т.16, №4. – С.132 – 136.

[3] Авраменко, А. А. Совершенствование методов вибродиагностики износа зубьев шестерён дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А. А. Авраменко, А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Самарско-

го университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т.17, №3. – С.16 – 26. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-16-26.

[4] Крючков, А.Н. Имитационная модель колебаний пары «солнечная шестерня-сателлиты» планетарного редуктора турбовинтового двигателя при наличии дефектов боковых поверхностей зубьев / А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т.18, №4. – С. 87-95. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-87-95.

[5] Сундуков, А.Е. Субгармоники зубцовой частоты в вибродиагностике износа зубьев редуктора газотурбинного двигателя / А. Е. Сундуков, Е. В. Шахматов // Динамика и виброакустика. – 2022. – Т.8, №2. – С. 6-11. DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-2-6-11.

**Sundukov A.E. EFFECTS OF WEAR AND FLANK CLEARANCE ON
VIBRATION BEHAVIOR OF GAS TURBINE ENGINE
GEARBOX**

PKF TSK

Novo-Sadovaya st. 381, korp.1,
Samara, 443011,
Russian Federation

sunduckov@mail.ru

Shakhmatov E.V.

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086,
Russian Federation

shakhm@ssau.ru

The key defect of aircraft gas turbine engine gearboxes is the tooth flank wear and the corresponding increase in the flank clearance. The main danger of tooth wear is vibration generation resulting in fatigue failures of the engine structural elements. Using the example of tooth harmonics in the re-mating of teeth of the “sun gear – satellite” pair with frequency f_{z1} and its sub harmonics with frequencies equal to one third and two thirds of it, as well as the vibration component that causes fatigue failures of engine structural elements, the change in the vibration state of the engine with the development of defects is shown. The sensitivity of the components under consideration to such defects is assessed. The potential danger of the component equal to two thirds of the tooth harmonics is revealed.

Keywords: planet gearbox; tooth wear; flank clearance; gearbox vibration behavior

References

- [1] Aviacionnye zubchatye peredachi i reduktory: Spravochnik [Aviation Gear Drives and Gearboxes: Reference tool] / V. I. Alekseev, V. M. Anan'ev, M. M. Bulygina [et al.] ; edited by E. B. Vulgakov. Moscow: Mashinostroenie Publ, 1981. – 374 p. (in Russian).
- [2] Kurushin, M. I. Experimental investigation of the courses of vibration excitation of elements of gas turbine engines with a differential reduction gearbox / M.I. Kurushin, V.B. Balyakin, A.M. Kurushin // Izvestiya Samarskogo centra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. – 2014. –Vol.16, №4. – P. 132 – 136. (in Russian).
- [3] Avramenko A. A., Refining methods of vibration diagnostics of wear of turbo-prop engine differential speed reduction unit gear teeth / A. A. Avramenko, A. N. Kryuchkov, S. M. Plotnikov, E. V. Sundukov, A. E. Sundukov // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2018. – Vol.17, №3. – P.16 – 26. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-16-26. (in Russian).
- [4] Kryuchkov, A. N. Simulation model of oscillations of the “sun gear – satellites” pair of turboprop engine planetary reduction gearbox in the presence of defects of tooth flanks / A. N. Kryuchkov, S. M. Plotnikov, A. E. Sundukov, E. V. Sundukov // VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. – 2019. – Vol.18, №4. – P. 87-95. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-87-95. (in Russian).
- [5] Sundukov, A. E. Tooth harmonics in the vibration diagnostics of gear tooth wear in a gas turbine engine / A. E. Sundukov, E. V. Shahmatov // Journal of Dynamics and Vibroacoustics. – 2022. – Vol.8, №2. – P. 6-11. DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-2-6-11. (in Russian).