



Определение бокового зазора шестерён планетарного редуктора как источника вибрации в ГТД с использованием сигнала штатного тахометра

А. Е. Сундуков

кандидат технических наук, технический директор
ООО «ПКФ «ТСК»; г. Самара;
email: sunduckov@mail.ru

Е. В. Шахматов

академик Российской академии наук, заведующий кафедрой
автоматических систем энергетических установок имени
академика РАН Владимира Павловича Шорина;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва, г. Самара;
email: shakhm@ssau.ru

Показано, что анализ сигналов штатных тахометрических датчиков входного и выходного валов планетарного редуктора ГТД позволяет оценивать величину бокового зазора зубчатого зацепления пары «солнечная шестерня – сателлиты». Установлена возможность выявления тенденций изменения высокочастотных составляющих, несущих информацию о техническом состоянии редуктора. Полученные результаты существенно упрощают процедуру контроля технического состояния редуктора по исследуемому параметру в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; дифференциальный редуктор; боковой зазор; датчики частоты вращения роторов; диагностические признаки

Цитирование: Сундуков, А. Е. Определение бокового зазора шестерён планетарного редуктора как источника вибрации в ГТД с использованием сигнала штатного тахометра / А. Е. Сундуков, Е. В. Шахматов // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 96-104. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-96-104

Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) находят применение в различных отраслях, от авиации до судостроения, благодаря своей эффективности и надёжности. Одним из ключевых узлов таких двигателей является планетарный редуктор, обеспечивающий преобразование и передачу крутящего момента от турбокомпрессора (ТК) к конечному исполнительному механизму, например воздушному винту. Для стабильной и безопасной эксплуатации этих систем крайне важно своевременно выявлять и предотвращать износ компонентов, включая контроль величины бокового зазора в зубчатых зацеплениях.

Боковой зазор зубчатой пары «солнечная шестерня – сателлиты» играет критическую роль в работе планетарного редуктора, так как его изменения могут свидетельствовать о развивающихся дефектах. Увеличение зазора может привести к нежелательным последствиям, таким как повышенные вибрации, снижение эффективности и даже разрушение отдельных элементов конструкции. Однако диагностика подобных изменений в условиях эксплуатации сопряжена с определёнными трудностями.

Традиционные подходы, такие как вибродиагностика [1], зачастую требуют установки сложного оборудования, что увеличивает затраты на диагностику. Известные способы диагностики данного дефекта по наличию двух гармонических рядов с шагами, равными частотам вращения шестерни и колеса [2, 3], требуют выполнения виброизмерений и могут быть вызваны другими дефектами. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов, которые позволяли бы эффективно оценивать состояние редуктора, используя имеющиеся ресурсы, например штатные тахометрические датчики. Настоящее исследование посвящено изучению такой возможности и разработке подходов к оценке состояния зубчатого зацепления на основе анализа сигналов штатных тахометрических датчиков вращения валов редуктора.

Постановка задачи и метод решения

На рассматриваемых двигателях в качестве тахометрических используются два датчика ДТЭ-2. Их назначение – выдача электрических сигналов в виде трёхфазного тока с частотой, пропорциональной частоте вращения валов двигателя. Датчик практически не имеет методической погрешности. Инструментальная погрешность связана с трением в опорах, небалансом ротора. Ротор датчика приводится во вращение через редуктор. Тогда основной вклад в погрешность оценки частоты вносит погрешность кинематической цепи привода датчика. Её расчёт выполнен в соответствии с ГОСТ 21098-82. Оценка по методу максимума-минимума даёт следующие результаты:

- для датчика частоты вращения ТК – 2,7%;
- для вала заднего винта (ВЗВ) – 4,8%.

С учётом основной погрешности датчика суммарное значение соответственно составляет 3,1 и 5%. Учитывая, что погрешность измерения интенсивности вибрации не должна превышать 15%, сигналы ДТЭ-2 наравне с вибрационными можно использовать в диагностике технического состояния редуктора ГТД [4], в том числе для оценки величины бокового зазора пары «солнечная шестерня – сателлиты». Анализировались данные по 15-ти отремонтированным двигателям с осреднением по пяти значениям величины бокового зазора.

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты расчёта дисперсии девиации частот вращения роторов ТК и ВЗВ на режиме N max

Таблица 1 – Результаты расчёта дисперсии девиации частот вращения роторов ТК и ВЗВ на режиме N max

Боковой зазор	Дисперсия		$D_{ВЗВ} - D_{ТК}$, Гц
	$D_{ТК}$, Гц	$D_{ВЗВ}$, Гц	
0,30	0,00182	0,029	0,027
0,33	0,00172	0,035	0,033
0,37	0,00209	0,018	0,016
0,40	0,00226	0,016	0,014
0,45	0,01469	0,001	0,013
Корреляция	0,78	-0,93	-0,92

Оценка дисперсии девиации частот осуществлялась путём выделения из сигналов тахометрических датчиков частот вращения валов в полосе $f_{вр} \pm 2$ Гц, оценки текущего значения частот и последующего расчёта дисперсий. Графический вид полученных данных представлен на рисунках 1–3.

Рост дисперсий D_{TK} логичен при увеличении бокового зазора в паре «солнечная шестерня – сателлиты». Падение $D_{ВЗВ}$ с ростом величины бокового зазора в указанной паре связано с соответствующим его уменьшением в паре «шестерня – вал – эпицикл».

Графический вид полученных зависимостей представлен на рисунках 1–3.

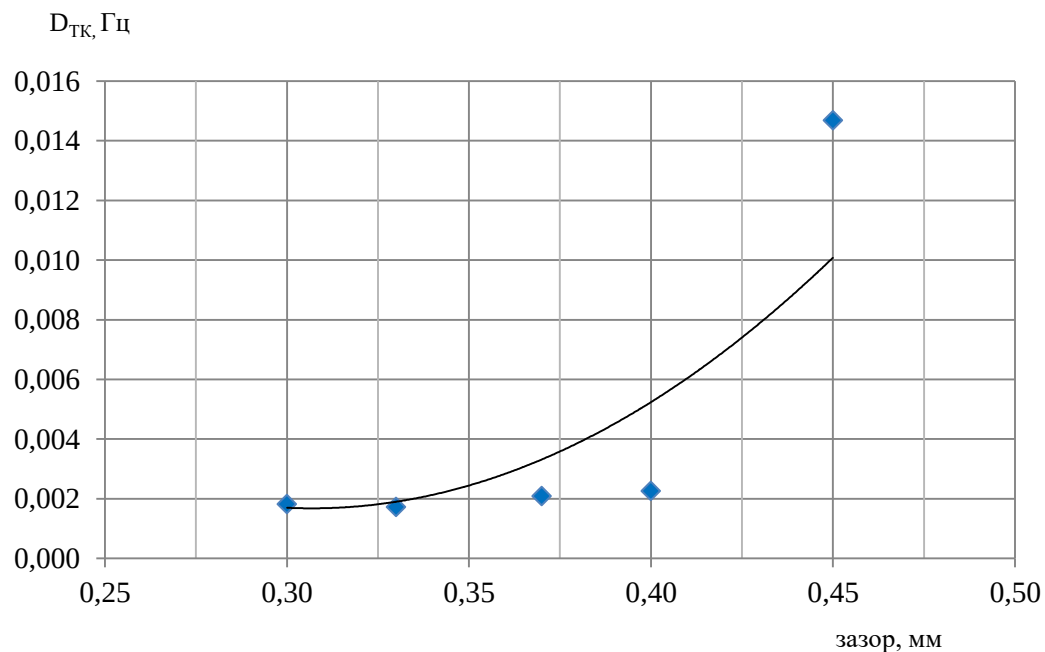


Рисунок 1 – Зависимость дисперсии девиации частоты вращения ротора турбокомпрессора от величины бокового зазора

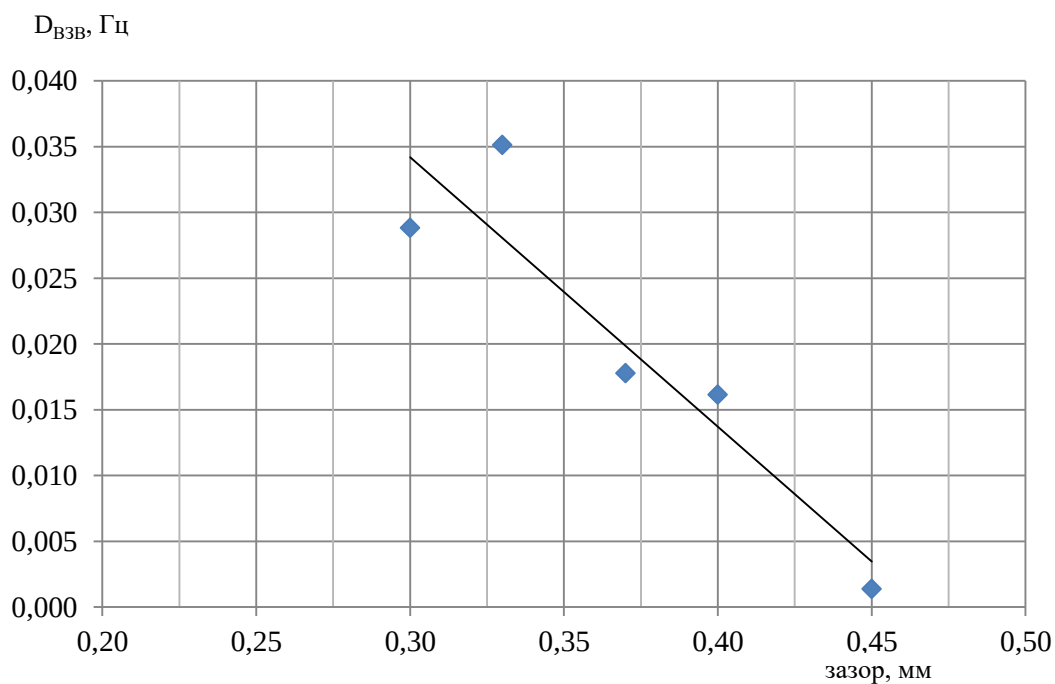


Рисунок 2 – Зависимость дисперсии девиации частоты вращения вала заднего винта от величины бокового зазора

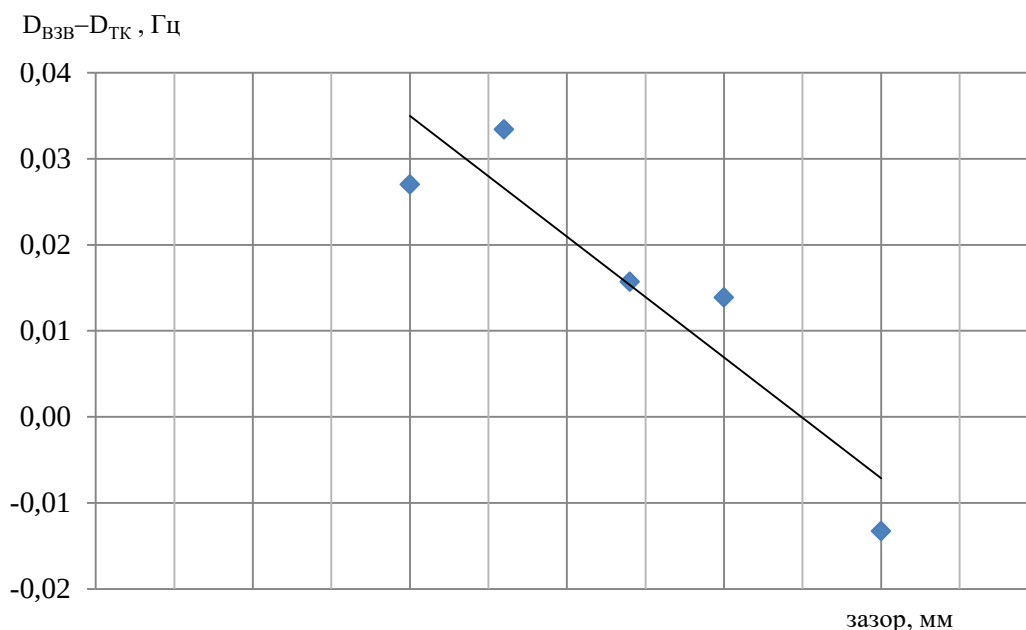


Рисунок 3 – Зависимость разницы дисперсий величины бокового зазора

Соответствующие аналитические выражения и значения коэффициентов корреляции (r) имеют вид:

- дисперсия ТК $y = 0,409x^2 - 0,251x + 0,040$, $r = 0,68$;
- дисперсия ВЗВ $y = -0,204x + 0,095$, $r = -0,82$;
- разность дисперсий $y = -0,280x + 0,119$, $r = -0,81$.

Частотный диапазон линейной части амплитудно-частотной характеристики сигналов с исследуемых датчиков не превышает 100 Гц. Однако, при анализе качественных данных (анализ тенденций) можно исследовать более широкий диапазон частот.

В работе [5] была предложена имитационная модель вибрации, генерируемой парой «солнечная шестерня – сателлиты» дифференциального редуктора одного из турбовинтовых двигателей при наличии дефектов. Одной из наиболее интересных компонент этой модели является ряд гармоник с шагом kf_p^* . Здесь $k = 1, 2, 3, \dots$, f_p^* – частота вращения солнечной шестерни в приведённом движении. В таблице 2 представлены данные по гармоникам данного ряда со значениями $r > 0,80$ в зависимостях их интенсивности от величины бокового зазора. Их графические зависимости представлены на рисунках 4–8.

Таблица 2 – Данные по гармоникам данного ряда со значениями $r > 0,80$ в зависимостях их интенсивности от величины бокового зазора

Боковой зазор, мм/ Кратность гармоник	8,205	10,94	16,41	21,88	27,35
0,30	0,040	0,290	0,026	0,013	0,012
0,33	0,046	0,290	0,037	0,032	0,026
0,37	0,083	0,240	0,038	0,031	0,031
0,40	0,077	0,275	0,045	0,038	0,039
0,45	0,077	0,155	0,045	0,058	0,042

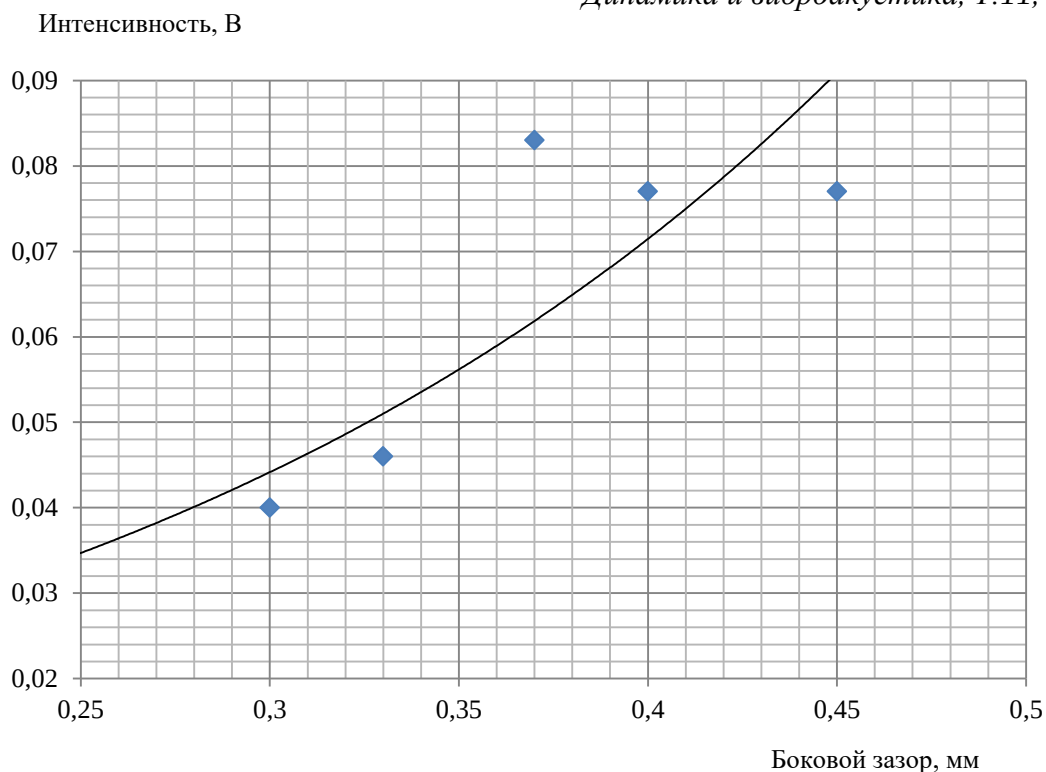


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности гармоники с кратностью 8,205 от величины бокового зазора

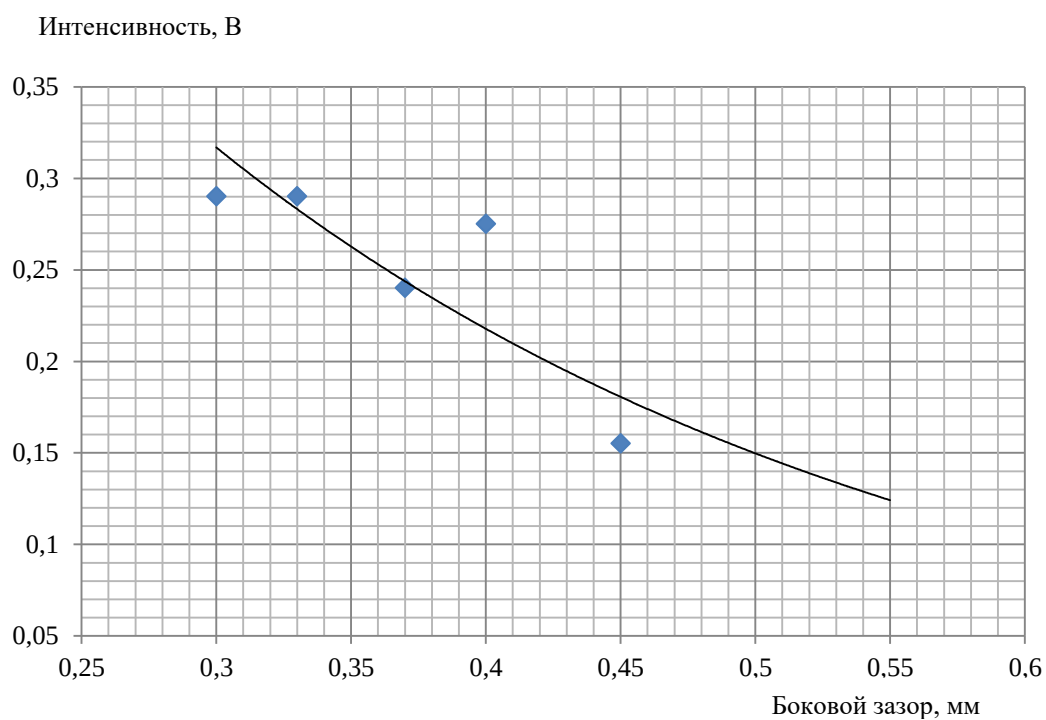


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности гармоники с кратностью 10,94 от величины бокового зазора

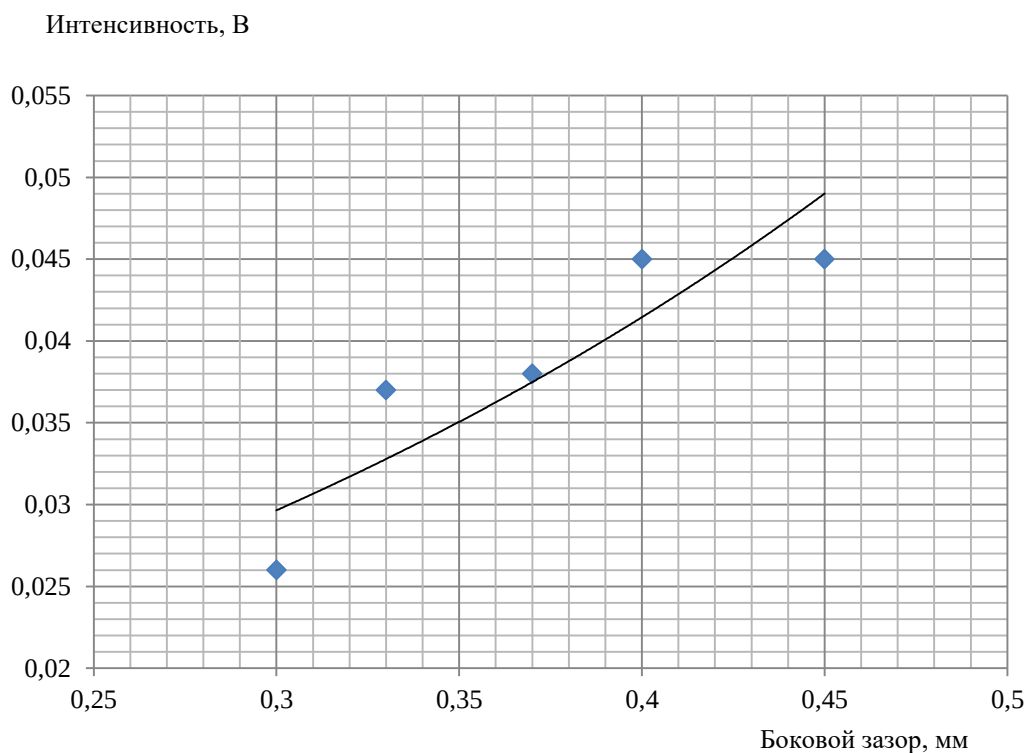


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности гармоники с кратностью 16,41 от величины бокового зазора

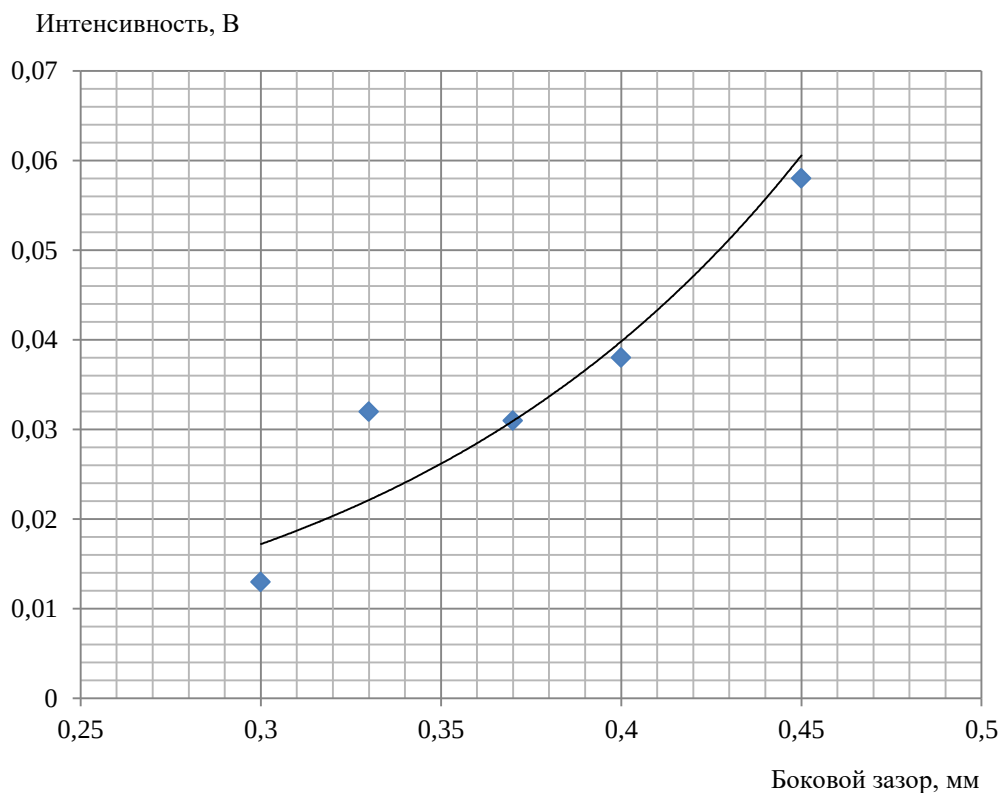


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности гармоники с кратностью 21,88 от величины бокового зазора

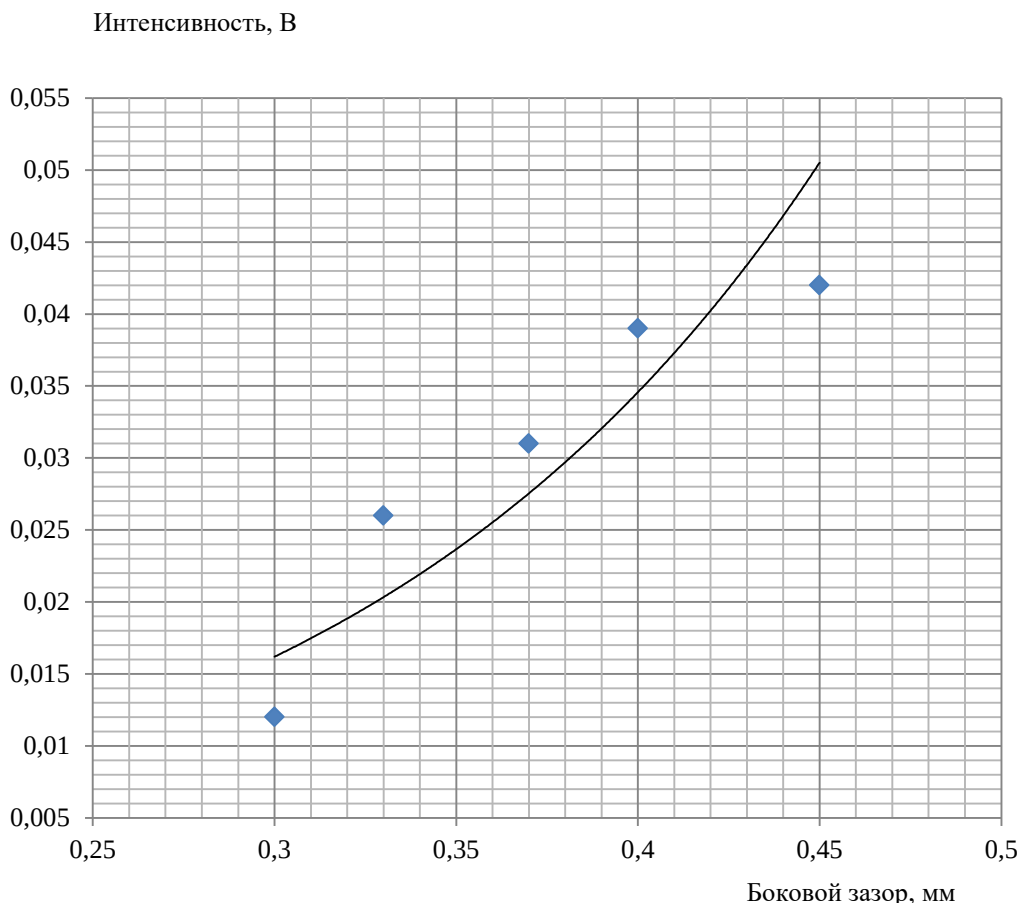


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности гармоники с кратностью 27,35 от величины бокового зазора

Соответствующие уравнения аппроксимации и значения коэффициентов r представлены ниже.

$$8,205 \ y = 0,0104e^{4,8153x}, \ r = 0,7;$$

$$10,94 \ y = 0,9751e^{-3,747x}, \ r = 0,7;$$

$$16,41 \ y = 0,0109e^{3,35x}, \ r = 0,77;$$

$$21,88 \ y = 0,0014e^{8,3904x}, \ r = 0,83;$$

$$27,35 \ y = 0,0017e^{7,5836x}, \ r = 0,79.$$

При выявлении устойчивой тенденции роста интенсивности любого из рассматриваемых диагностических признаков целесообразно перейти к оценке диагностических признаков величины бокового зазора по параметрам вибрации [1]. При этом следует отметить, что разброс амплитудно-частотных характеристик отдельных тахометрических датчиков не имеет значения, так как отслеживается в каждом случае только наличие устойчивой тенденции на рост интенсивности по конкретному ДЧВ.

При анализе дефектов данной зубчатой пары возникает проблема разделения износа и величины бокового зазора. Выполненный анализ показал, что субгармоника зубцовой частоты с кратностью 19,145, названная как составляющая износа [5], нечувствительна к изменению величины бокового зазора.

Таким образом показано, что оценку тенденции технического состояния планетарного редуктора ГТД по величине бокового зазора его зубчатого зацепления можно проводить без постановки на двигатель вибропреобразователей. Это обстоятельство существенно упрощает

процедуру соответствующего контроля в условиях эксплуатации. Использование виброизмерений необходимо только при критическом росте исследуемых параметров.

Заключение

Использование сигналов штатных тахометрических датчиков частоты вращения валов редуктора позволяет:

- оценивать тенденции изменения величины бокового зазора в паре «солнечная шестерня - сателлиты» планетарного редуктора ГТД;
- существенно упростить контроль развития данного дефекта в процессе эксплуатации ГТД.

Список использованных источников

1. Крючков, А. Н. Вибродиагностика величины бокового зазора в зубчатом зацеплении дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27, №3. – С. 198-208.
2. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – Москва : Машиностроение, 1988. – 288 с.
3. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. / под ред. В. В. Клюева. – Т. 7, кн. 2. Вибродиагностика. – Москва : Машиностроение, 2005. – 828 с.
4. Авраменко, А. А. Использование сигналов с датчиков частоты вращения валов газотурбинного двигателя в диагностике технического состояния его редуктора / А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков / Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроение. – 2020. – Т. 19, №1. – С. 7-17.
5. А. Н. Крючков. Имитационная модель колебаний пары «солнечная шестерня – сателлиты» планетарного редуктора при наличии дефектов на боковых поверхностях зубьев / А. Н. Крючков, С. М. Плотников, А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Том 18, №4. – С. 87-95.

Determination flank clearance of gears of a planetary gearbox as a vibration source in a gas turbine engine using a standard tachometer signal

A. E. Sundukov | Candidate of Science (Engineering), CTO of PKF TSK JSC, Samara, Russian Federation;
email: sundukov@mail.ru

E. V. Shakhmatov | Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Power Plant Automatic Systems named after Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir Pavlovich Shorin; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
email: shakhm@ssau.ru

It is demonstrated that the analysis of signals from the “standard” tachometric sensors of the input and output shafts of the GTE planetary gearbox enables assessing the toothed gearing backlash value in the “sun gear – pinion gears” pair. The possibility of identifying trends in the changes of high-frequency components that carry information on the technical condition of the gearbox is established. The results obtained significantly simplify the procedure for monitoring the technical condition of the gearbox by the studied parameter under operating conditions.

Keywords: gas turbine engine; differential gearbox; backlash; rotor speed sensors; diagnostic indicators

Citation: Sundukov, A. E. and Shakhmatov, E. V. (2025), “Determination flank clearance of gears of a planetary gearbox as a vibration source in a gas turbine engine using a standard tachometer signal”, *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 11, no. 1, pp. 96-104. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-96-104. (In Russian; abstract in English)

References

1. Kryuchkov, A. N., Plotnikov, S. M., Sundukov, A. E. and Sundukov, E. V. (2020), “Vibration diagnostics of lateral clearance value in the toothed gearing of differential gearbox of a turboprop engine”, *Aerospace MAI Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 198-208. (In Russian)
2. Genkin, M. D. and Sokolova, A. G. (1988), *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic Diagnostics of Machines and Mechanisms], Mashinostroyeniye Publishing House, Moscow, 288 p. (In Russian)
3. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik v 7 tomah. Tom 7, kniga 2. Vibrodiagnostika* [Non-Destructive Testing: A Reference Book in 7 Volumes. Book 2. Vibration Diagnostics] (2005), ed. by V. V. Klyuyev, Mashinostroyeniye, Moscow, 829 p. (In Russian)
4. Avramenko, A. A., Kryuchkov, A. N., Plotnikov, S. M., Sundukov, E. V. and Sundukov, A. E. (2020), “Using signals from the gas-turbine engine shaft speed sensor in the diagnosis of the technical condition of its reduction gearbox”, *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, V. 19, no. 1. pp. 7-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-1-7-17. (In Russian)
5. Kryuchkov, A. N., Plotnikov, S. M., Sundukov, A. E. and Sundukov, E. V. (2019), “Simulation model of oscillations of the “sun gear – satellites” pair of turboprop engine planetary reduction gearbox in the presence of defects of tooth flanks”, *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 87-95. (In Russian)