

УДК 681.586

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0019

КОНТРОЛЬ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

©2021

Иванова Яна Александровна, аспирант кафедры радиотехники

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

(443086, г. Самара, ул. Московское шоссе 34, e-mail: ivanova.yaa@ssau.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены виды колебаний роторных систем в процессе работы турбоагрегата, обусловленные воздействием аэродинамических сил или сменой режимов работы. Крутильные колебания приводят к возникновению дополнительных динамических нагрузок и напряжений, которые в свою очередь снижают надежность и служат причиной аварийных повреждений элементов турбомашин, поэтому данные колебания представляют наибольший интерес. В данной статье предложена структурная схема автодинного преобразователя на диоде Ганна, позволяющая по параметрам выходного сигнала оценить характеристики крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин и сделан вывод о необходимости изучения влияния расположения датчика относительно оси вращения ротора, а также изучения влияния параметров отражающей поверхности.

Ключевые слова: крутильные колебания ротора, бесконтактный контроль, радиоволновый датчик, автодинный эффект, доплеровское смещение частоты, динамическая нагрузка, тензометрирование, торсиографы, диод Ганна.

TORSIONAL VIBRATION CONTROL OF ROTATING ELEMENTS OF TURBINE UNITS

©2021

Ivanova Yana Aleksandrovna, department of radio engineering, postgraduate

Samara National Research University named after academician S.P. Koroleva

(443086, Samara, Moskovskoye shosse, 34, e-mail: ivanova.yaa@ssau.ru)

Abstract. The article considers types of rotor systems oscillations in the process of turbine unit operation, caused by the influence of aerodynamic forces or change of operation modes. Torsional vibrations lead to the appearance of additional dynamic loads and stresses, which in turn reduce the reliability and cause emergency damage to elements of the turbomachine, so these vibrations are of greatest interest. In this article we propose the structural diagram of the autodyne converter on the Gann diode, which allows to estimate the characteristics of torsional oscillations of rotating elements of a turbomachine by the parameters of an output signal and the conclusion about necessity of studying influence of location of the transducer relative to the rotor rotation axis, and studying influence of parameters of the reflecting surface is made.

Keywords: rotor torsional oscillations, non-contact control, radio-wave sensor, autodyne effect, Doppler frequency shift, dynamic load, strain gauge, toriographs, Gunn diode.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется контролю параметров вращающихся узлов турбоагрегатов с целью увеличения длительности безотказной работы и повышения надежности. Во время работы турбомашин вращающиеся элементы совершают как вращательное движение, обусловленное работой системы и представляющее собой движение относительно оси вращения, так и колебательное, обусловленное воздействием аэродинамических сил или сменой режимов работы. По виду деформаций при колебательном движении различают продольные, изгибные, крутильные и сложные (связанные) колебания. При связанных колебаниях в зависимости от величины жесткостей системы в различных направлениях могут возникать одновременно несколько видов колебаний [1]. Крутильные колебания представляют собой неравномерное изменение угловой скорости вращающегося элемента: ускорение или замедление вращения элемента. Такие колебания приводят к возникновению дополнительных динамических нагрузок и напряжений, которые в свою очередь снижают надежность и служат причиной аварийных повреждений элементов турбомашин.

Большой интерес крутильные колебания представляют в области судостроения, так как при проектировании судовых установок необходимо проводить расчеты и замеры крутильных колебаний в соответствии с правилами Российского морского регистра судоходства в виду неравномерной нагрузки различных участков линии валопровода [2-5]. Также в последнее время активно развиваются методы исследования крутильных колебаний роторных систем. Крутильные колебания ротора возникают в процессе работы турбины и снижают длительность безотказной работы, поэтому контроль крутильных колебаний ротора является актуальным вопросом в области повышения надежности работы турбомашин. В области контроля вращающихся элементов турбомашин работы направлены на исследование крутильных колебаний лопаток с целью контроля деформационных состояний [6-9], а также крутильных колебаний роторов с целью предотвращения возникновения усталостных трещин [10, 11].

Для контроля крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин используются как контактные, так и бесконтактные методы. К контактным

методам относится тензометрирование и торсиографирование. Торсиографы фиксируют амплитуду колебаний в некотором сечении вала с помощью емкостного, тензометрического или других датчиков, значения амплитуд выходного сигнала которых преобразуются в электрический сигнал и отображаются в виде торсиограмм и спектрограмм [12]. Тензометрирование предполагает измерение амплитуды скручивания с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на элементы вращающихся узлов, и широко применяется для экспериментального определения переменных напряжений в лопатках, дисках рабочих колес и роторах компрессоров и турбин на работающих двигателях в условиях близких к эксплуатационным [13]. Однако, в настоящее время большое распространение получили бесконтактные методы измерения, позволяющие проводить контроль без контакта с вращающимся элементом. Бесконтактный контроль параметров крутильных колебаний роторов может быть осуществлен емкостными, индукционными, вихретоковыми, радиоволновыми и оптоэлектронными преобразователями. В сложных трактах турбомашин наиболее оптимальным является использование оптоэлектронных и радиоволновых датчиков [14]. Однако оптоэлектронные датчики имеют недостатки в виде быстрого загрязнения оптически активной поверхности, в виду этого при организации длительного контроля параметров крутильных колебаний преимущество имеют радиоволновые датчики.

Целью данной работы является разработка структурной схемы преобразователя крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин в условиях высоких температур и загрязнений поверхностей, а также оценка влияния параметров поверхности вращающихся элементов турбомашин на отраженный поток излучения.

Материалы и результаты исследования. Наиболее простую конструкцию, компактность, надежность и чувствительность к воздействию отраженного излучения имеют автодинные радиоволновые датчики, обеспечивающие одновременно функции источника и приемника излучения на основе автодинного преобразователя. Принцип работы таких датчиков основан на автодинном эффекте, представляющим собой изменение параметров автоколебаний генератора под воздействием излучения, отраженного от объекта [15]. Наиболее широко применяемыми являются автодины на диодах Ганна, так как они характеризуются сравнительно низким уровнем шума, малыми габаритами, простотой конструкции и высоким коэффициентом усиления сигнала [16, 17]. Преобразователи на диоде Ганна являются одновременно источником излучения, приемником отраженного излучения и смесителем излученного и отраженного сигналов, причем выходной сигнал преобразователя формируется с доплеровским приращением частоты (1):

$$f_{\text{д вр}} = \frac{2V_{\text{вр}}}{\lambda} \cos(\alpha) = \frac{2V_{\text{вр}}v}{c} \cos(\alpha), \quad (1)$$

где $V_{\text{вр}}$ – скорость окружного движения внешних элементов ротора, обусловленная его вращательным движением;

v – частота излучения генератора;

c – скорость распространения электромагнитного излучения;

α – угол между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения ротора;

λ – длина волны излучения.

Формула (1) определяет частоту выходного сигнала, обусловленную только вращательным движением ротора. При возникновении крутильных колебаний, изменяющих мгновенную скорость вращения ротора, частота выходного сигнала изменяется и описывается формулой (2) [18]:

$$f_{\text{д}} = \frac{2v(V_{\text{вр}} + V_{\text{кр}})}{c} \cos(\alpha) = f_{\text{д вр}} + f_{\text{д кр}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{д вр}}$ – составляющая частоты Доплера, обусловленная вращательным движением;

$f_{\text{д кр}}$ – составляющая частоты Доплера, обусловленная колебательным движением (крутильными колебаниями).

Величина угла α между осью диаграммы направленности датчика и направлением движения ротора определяет расположение датчика относительно ротора и влияет на точность преобразования. На рисунке 1 приведена предлагаемая структурная схема автодинного преобразователя на диоде Ганна, позволяющая по параметрам выходного сигнала оценить характеристики крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин.

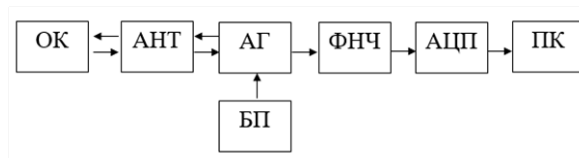


Рисунок 1 – Структурная схема преобразователя (ОК – объект контроля, АНТ – антенна, АГ – автодинный генератор, ФНЧ – фильтр нижних частот, БП – блок питания, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – портативный компьютер)

На неподвижной части турбомашин устанавливается бесконтактный радиоволновый преобразователь и регистрируется сигнал, полученный в результате отражения излученного сигнала от поверхности вращающегося элемента, являющегося объектом контроля. Далее автодинная система формирует сигнал доплеровской частоты с низкочастотными спектральными компонентами, соответствующими крутильным колебаниям, которые выделяются фильтром низких частот и с помощью АЦП преобразуется в цифровой сигнал, который после обработки на ПК отображается на экране в виде характеристик, определяющих параметры крутильных колебаний.

При падении потока радиоволнового излучения на совершенно ровную плоскую поверхность направление отражения волны подчиняется закону геометрической оптики и называется зеркальным. При

этом угол падения равен углу отражения. Однако поверхность вращающегося элемента турбоагрегата не является абсолютно плоской и имеет шероховатости, обусловленные технологическими особенностями изготовления. Тогда отражение от поверхности объекта контроля является направленно-диффузным. Для пренебрежения шероховатостью поверхности объекта контроля используется критерий Релея, описывающий соотношение длины волны и высоты шероховатости поверхности объекта контроля (3):

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \alpha_0}, \quad (3)$$

где h – высота шероховатости поверхности;

λ – длина падающей радиоволны;

α_0 – угол падения радиоволны.

При расположении излучающей поверхности датчика крутильных колебаний перпендикулярно оси вращения ротора угол падения радиоволны составляет 90° , тогда соотношение (3) приводится к виду $\lambda > 8h$ [19]. Таким образом, при длине волны падающего излучения в восемь раз большей высоты микронеровности падающий поток можно считать отраженным зеркально при падении излучающего потока перпендикулярно отражающей поверхности. В случае, если длина волны меньше величины $8h$, то отраженное излучение рассеивается диффузно, то есть равномерно во всех направлениях. Индикатриса рассеяния абсолютно диффузного отражения представляет собой круг, ось которого совпадает с нормалью, восстановленной из точки падения.

При падении излученного потока на отражающую поверхность при величине угла $\alpha_0 \neq 90^\circ$, величина отклонения индикатрисы рассеяния от нормали, восстановленной из точки падения определяется величиной $a = \sin \alpha_0$. Коэффициент неидеальности отражения при абсолютно диффузном отражении тогда описывается функцией (4):

$$K(a) = f\left(\frac{h}{\lambda}\right), \quad (4)$$

А для зеркального отражения коэффициент неидеальности отражения описывается формулой (5):

$$K(a) = 1 - f\left(\frac{h}{\lambda}\right), \quad (5)$$

Представленная на рисунке 2 кривая позволяет оценить неидеальность отражения для различных видов отражения излучения от поверхности: от зеркального отражения до абсолютно диффузного.

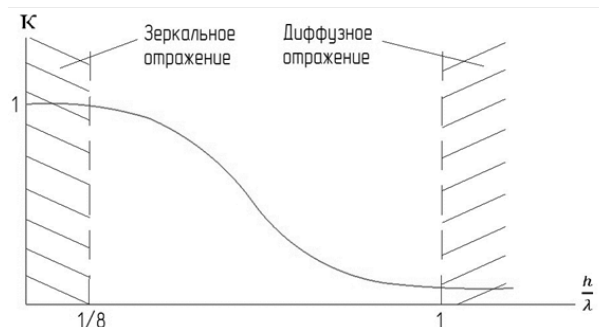


Рисунок 2 – Кривая коэффициента неидеальности отражения излучения от поверхности

Также в работе [20] было экспериментально установлено, что использование радиоволновых источников представляется возможным для исследования характеристик отражающей поверхности с помощью оценки параметров сигнала, отраженного от поверхности. При этом необходимо учитывать технологические особенности отражающей поверхности, что определяет выбор элементной базы. Отражающая поверхность в этом случае представляет собой набор дискретных прямоугольных площадок со сторонами a, b . Размеры площадки определяются шириной диаграммы направленности антенны.

Закключение. Таким образом, доплеровский автодинный СВЧ-преобразователь является оптимальным решением при проектировании бесконтактных преобразователей крутильных колебаний вращающихся элементов турбомашин и исследовании влияния крутильных колебаний на работу вращающихся узлов турбоагрегатов в виду их высокой точности преобразования, устойчивости к высоким температурам и загрязнению внутреннего тракта турбомашины. Влияние расположения датчика относительно оси вращения ротора, а также влияние параметров отражающей поверхности на выходной сигнал преобразователя являются исследовательскими задачами при проектировании преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Паровой Ф.В., Лёжин Д.С., Ржевский В.П., Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. Исследование крутильных колебаний валов: уч. пособие // Самара, Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – 40 с.
2. Лапин Ю.А., Герман А.П., Бурлакова Н.Н. Анализ методов расчета крутильных колебаний судовых валопроводов // Вестник ИШ ДВФУ. – 2020. – №3 (44). – С. 71-79. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/3-44/7/>. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-3-7
3. Сергеев К.О., Кудрявцев М.В. Выбор параметров преобразования при дискретном измерении крутильных колебаний валов судовых энергетических установок // Вестник МГТУ. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 171-175. URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v16_1_n51/171_175_serge.pdf
4. Покусав М. Н., Овсянников М.К., Сибряев К.О. Анализ характеристик крутильных колебаний в гребном вале судов класса «Река-море» // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – №3 (25). – С.32-42. URL: <https://journal.gumrf.ru/article/25/32-42>. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-3-32-42.
5. Горелик Г.Б. Крутильные колебания и торсионирование судовых валопроводов: учебное пособие //Хабаровск, ХГТУ. – 2003. – 36 с.
6. Бояркина У.В., Попов М.С. Устройство для определения параметров крутильных колебаний лопаток ГТД // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара. – 2016. – С. 55-57.
7. Данилин А.И., Бояркина У.В., Грецов А.А., Данилин С.А. Комбинированные преобразователи для многопараметровой оценки крутильных колебаний лопаток турбоагрегатов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – №4-1. – С. 107-110. URL:http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2018/2018_4_107_110.pdf
8. Бояркина У. В., Щелоков Е.А. Оптоэлектронный способ определения параметров крутильных колебаний лопаток ГТД // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2015. – С. 11-13.
9. Грецов А.А. Доплеровские преобразователи перемещений элементов вращающихся узлов турбоагрегатов: автореферат дис. кандидата Технические наук: 05.13.05 / Грецов Андрей Александрович; место защиты: ФГАОУ ВО Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева], 2016.
10. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Физические основы построения оптико-электронных систем измерительного

контроля крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // Физические основы приборостроения. – 2016. – Т.5. – №3 (20). – С. 30-39. URL: https://cpf-bmstu.ru/pdf/ArticlesForSyte/Ar_37.pdf

11. Таранчук А.С. Крупные аварии на ТЭС в результате повреждения роторов турбогенераторов // Актуальные проблемы энергетики, БНТУ. -2016. –С. 322-327. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/34990/Krupnye_avarii_na_TEHS_v_rezultate_povrezhdeniya_rotorov_turbogeneratorov.pdf?sequence=1&isAllowed=y

12. Ефремов Л.В. Теория и практика исследований крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий: монография. -Изд.: Наука. -2007. – 276 с.

13. Леонтьев М.К. Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях: уч. пособие. -М: Издательство МАИ. – 2001. – 37 с. URL: http://www.alfatran.com/pubs/smgte_ru.pdf

14. Бояркина У.В., Грецов А.А., Данилин С.А., Дудкина Е.Е. Комбинированные преобразователи для мониторинга параметров крутильных колебаний лопаток турбоагрегатов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – №4-1. – С. 111-116.

15. Носков В.Я., Игнатков К.А., Шайдуров К.Д. Автодинный эффект СВЧ-генераторов с внешней синхронизацией // Радиотехника и электроника. – Т. 65. – №6. – С. 612-620. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42773442>. DOI: 10.31857/S0033849420050113

16. Варавин А.В., Васильев А.С., Ермак Г.П., Попов И.В. Автодинный приемопередающий модуль на диоде Ганна с внутренним детектированием сигнала для радиолокационного датчика с линейной модуляцией // Радиофизика та електроніка. – 2008. – Т. 13 – № 3. – С. 546-551. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/10796/11%20-%20Varavin.pdf?sequence=1> DOI: <https://doi.org/10.15407/rej>

17. Иванова Я.А., Данилин А.И. Выбор активного элемента при проектировании преобразователя крутильных колебаний ротора турбоагрегата // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – 2021. – С. 61-62.

18. Попов М.С., Бояркина У.В. Доплеровский преобразователь крутильных колебаний ротора турбины // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций», Самара. – 2015. – С. 41-42.

19. Иванова Я.А., Данилин А.И. Способы измерения параметров крутильных колебаний ротора турбоагрегата // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – 2021. – С. 63-64.

20. Данилин А.И. Оптоэлектронный измеритель деформаций лопаток для систем автоматического управления ГТД: автореферат дис. кандидата Технические науки: 05.13.05 / Данилин Александр Иванович; место защиты: Куйбышевский орден Трудового Красного Знамени авиационный институт имени академика С.П. Королева, 1990.

Статья поступила в редакцию 12.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021