

УДК 531.741

doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. А. Трофимов¹, А. В. Гладков², Н. С. Трофимова³, С. А. Здобнов⁴, Д. Н. Колтин⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{1,3,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Необходимость получения информации о физических процессах, технических характеристиках систем и агрегатов авиационных двигателей, сведений о функционировании и взаимодействии комплектующих систем, обеспечение оптимального режима работы двигателя требуют создания специальных датчиков для изделий авиационной техники. Роль датчиков является определяющей в любой измерительной системе. От их характеристик все в большей мере зависит надежность и эффективность различных видов авиационной техники. Технические характеристики датчиков в значительной степени влияют на технический уровень самих средств контроля и диагностирования, в частности, создание датчиков для измерения угловых перемещений, способных обеспечить оптимальный режим работы авиационного двигателя. Поэтому развитие и совершенствование парка современных датчиков можно выделить как одно из важнейших направлений повышения эффективности изделий авиационной техники. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, аналитической геометрии, теории электрических цепей и электромагнитного поля. При проектировании конструкций датчиков применялись системы автоматизированного проектирования КОМПАС и AutoCAD. *Результаты.* В результате проведенной работы разработан датчик угловых перемещений с встроенным электронным преобразователем, разработанным на основе микросхемы фирмы Analog Device, предназначенной для работы с дифференциальными трансформаторными датчиками перемещений, удовлетворяющий предъявляемым к нему требованиям по точности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам и может использоваться для измерения угловых перемещений направляющих аппаратов компрессора авиационного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, датчик перемещений, статор, ротор, электронный преобразователь, обмотка

Для цитирования: Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С., Здобнов С. А., Колтин Д. Н. Датчик угловых перемещений для газотурбинного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 71–76. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR FOR GAS TURBINE ENGINE

A.A. Trofimov¹, A.V. Gladkov², N.S. Trofimova³, S.A. Zdobnov⁴, D.N. Koltin⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

^{1,3,5} iit@pnzgu.ru, ² alexey.gladkov.1@yandex.ru, ⁴ sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* The need to obtain information on the physical processes, technical characteristics of systems and assemblies of aircraft engines, information on the functioning and interaction of component systems, ensuring the optimal operation of the engine requires the creation of special sensors for aircraft products. The role of sensors is decisive in any measuring system. The reliability and efficiency of various types of aviation technology increasingly depend on their characteristics. The technical characteristics of the sensors greatly affect the technical level of the control and diagnostic tools themselves. In particular, the creation of sensors for measuring angular displacements capable of providing an optimal operating mode of an aircraft engine. Therefore, the development and improvement of the fleet of modern sensors can be singled out as one of the most important areas of increasing the efficiency of aircraft products. *Materials and methods.* The methods of integral and differential calculus, analytical geometry, the theory of electrical circuits and the electromagnetic field were used for solving the set tasks. KOMPAS and AutoCAD computer-aided design systems were used for designing the sensor structures. *Results.* As a result of the work carried out, an angular displacement sensor with a built-in electronic transducer on the basis of an Analog Device microcircuit, designed to work with differential transformer displacement sensors, was developed. The sensor meets the requirements for accuracy, reliability and resistance to external influences and can be used to measure the angular displacements of the guide vanes of an aircraft gas turbine engine compressor.

Keywords: gas turbine engine, displacement sensor, stator, rotor, electronic converter, winding

For citation: Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S., Zdobnov S.A., Koltin D.N. Angular displacement sensor for gas turbine engine. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;2:71–76. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-10

Введение

Одной из важнейших проблем при эксплуатации газотурбинных двигателей является обеспечение оптимального режима работы двигателя, т.е. обеспечение максимальной мощности при минимальном расходе горючего. Выбор такого оптимального режима зависит от углового положения лопаток направляющих аппаратов компрессора (НАК), контроль которого осуществляется с помощью датчиков угловых перемещений. Очевидно, что именно характеристики датчиков во многом определяют точность позиционирования лопаток и в конечном итоге обеспечение оптимального режима двигателя [1–5].

К датчикам угловых перемещений предъявляются жесткие требования:

- по метрологии (основная погрешность – не более 0,1 %);
- по внешним воздействующим факторам (работоспособность в диапазоне температур от минус 60 до 100 °С при воздействии сильных электромагнитных помех, вибраций, акустических шумов);
- по ресурсу (до 15 000 ч);
- по габаритам и массе (объем – не более 50 см³).

Основная часть

В настоящее время для контроля углового положения лопаток НАК используются сельсины и потенциометрические датчики. И те, и другие обладают рядом недостатков, которые затрудняют их применение для перспективных двигателей. Так, например, сельсины имеют два периодических (синусный и косинусный) выходных сигнала, для обработки которых необходимы довольно громоздкие электрические схемы. Кроме того, в случае исчезновения питания в процессе поворота лопаток невозможно проконтролировать их новое положение при восстановлении питания. Потенциометрические датчики вследствие наличия скользящего электрического контакта имеют ограниченный ресурс и низкую виброустойчивость, кроме того, и те, и другие датчики не соответствуют требованиям по точности, а сельсины – и по габаритно-массовым характеристикам. Поэтому разработка датчика угловых перемещений лопаток НАК, соответствующего предъявляемым требованиям для перспективных двигателей, является актуальной задачей. Разработан датчик, который, по нашему мнению, может обеспечить выполнение этих требований. Общий вид датчика представлен на рис. 1.

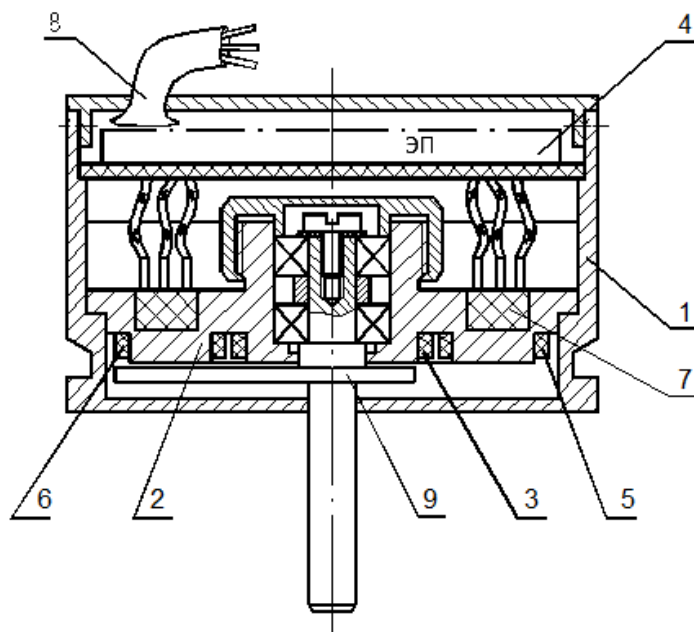


Рис. 1. Общий вид датчика перемещения

Он состоит из корпуса 1, статора 2, обмотки питания 3, секций 5 и 6 измерительной обмотки, контактной колодки 7, электронного преобразователя 4, кабельной перемычки 8, якоря (ротора) 9. Корпус датчика изготовлен из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, статор из пермаллоя 79НМ. Кабельная перемычка выполнена из кабеля КТМС с оболочкой из нержавеющей стали. Якорь датчика выполнен из пермаллоя 79НМ.

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. В нем измерительные обмотки располагаются вокруг двух полюсов статора, имеющих форму секторов с углом 180° , и соединены последовательно встречно (рис. 2).



Рис. 2. Положение якоря при нулевом выходном сигнале

Датчик работает следующим образом: при подаче на обмотку питания переменного тока в секциях измерительной обмотки индуцируется переменная ЭДС (E), амплитуда которой зависит от положения якоря относительно полюсов статора и в соответствии с работой [6] будет равна

$$E = \omega I_1 \frac{W_1 W_2}{\sum \frac{l_i}{\mu_i S_i} + \frac{\delta}{\mu_0 S} + \frac{P_{cm}}{\omega \Phi^2}},$$

где ω – круговая частота тока питания; I_1 – амплитуда тока питания; $W_1 W_2$ – количество витков питающей и измерительной обмотки; μ_i – магнитная проницаемость i участка магнитопровода; l_i – длина i участка магнитопровода; S_i – площадь поперечного сечения i участка магнитопровода; μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора; S – площадь поперечного сечения воздушного зазора; P_{cm} – мощность потерь на гистерезис и вихревые токи; Φ – действительное значение магнитного потока.

Следует отметить, что теория расчета взаимоиндуктивных (трансформаторных) датчиков с переменным магнитным сопротивлением достаточно полно разработана и изложена в работах [6, 7]. Поэтому их расчет не представляет особых затруднений.

Главной проблемой датчика является обеспечение основной погрешности не более 0,1 %, учитывая, что реальные характеристики такого типа датчиков имеют S-образную форму (рис. 3).

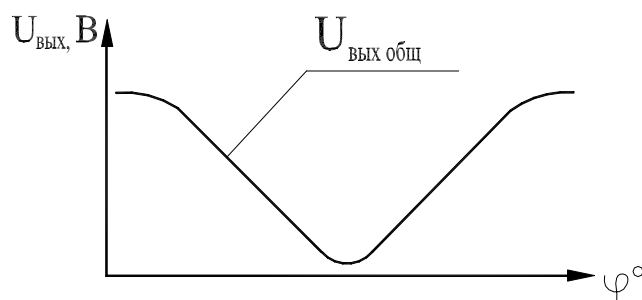


Рис. 3. Форма выходной градуировочной характеристики с датчика угловых перемещений

Исключение этой нелинейности производится с помощью электронного преобразователя, в котором применена специальная микросхема фирмы Analog Device, предназначенная для работы с дифференциальными трансформаторными датчиками перемещений.

Принцип работы электронного преобразователя (ЭП) объясняется с помощью функциональной схемы (рис. 4), состоящей из чувствительного элемента (ЧЭ), генератора (Г), усилителя мощности (УМ), входных усилителей (ВхУ1, ВхУ2), детектора (Д), фильтра (Ф), выходного усилителя (Вых У), преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ).

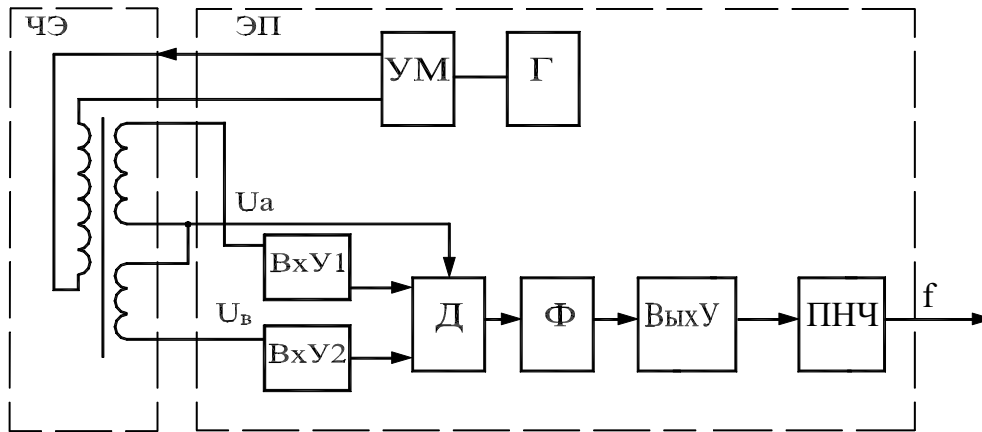


Рис. 4. Структурная схема датчика

При подаче напряжения питания на датчик запускается генератор, входящий в состав электронного преобразователя, который формирует синусоидальный сигнал с частотой 10 кГц. Этот сигнал через усилитель мощности передается на обмотку питания ЧЭ, индуцируется электромагнитное поле, которое возбуждает ток в каждой секции измерительной обмотки ЧЭ, значение которого зависит от площади обмотки, перекрытой якорем в момент измерения.

При вращении якоря соотношения перекрываемых площадей секций измерительной обмотки изменяются, что приводит к изменению выходного сигнала.

Выходные сигналы U_A и U_B с измерительных обмоток через входной усилитель, который осуществляет увеличение амплитуды сигналов с измерительной обмотки, поступают на детектор. Детектор осуществляет операцию деления разности сигналов секций измерительной обмотки на их сумму и умножение на масштабирующий коэффициент

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_A - U_B}{U_A + U_B} \cdot 500 \mu\text{A} \cdot R_2.$$

Далее полученный сигнал фильтруется и через выходной усилитель поступает на преобразователь напряжения в частоту (ПНЧ), а затем в систему автоматического управления. Изменение амплитуды выходного сигнала датчика в зависимости от угла поворота якоря носит линейный характер (рис. 5).

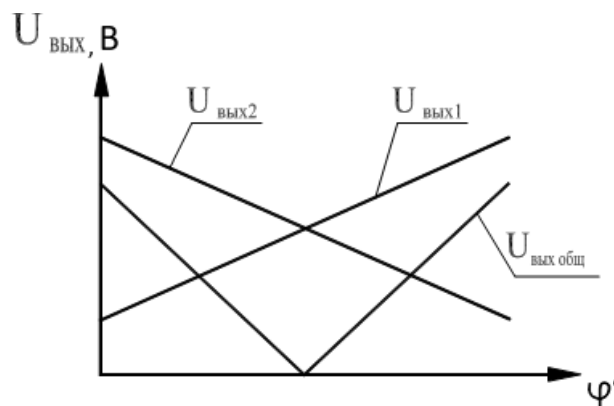


Рис. 5. Вид выходных характеристик датчика угловых перемещений

Заключение

Таким образом, рассмотренный датчик угловых перемещений с встроенным электронным преобразователем полностью удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям и может использоваться для измерения угловых перемещений направляющих аппаратов компрессора.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
3. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
4. Трофимов А. А. Датчик угловых перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 13–14.
5. Баринов Н. И., Трофимов А. А. Датчики углового положения для внутритрубного профилемера // Датчики и системы. 2004. № 2. С. 37–39.
6. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Л. : Энергия, 1977.
7. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and, based on them, measurement, monitoring and control systems for technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy* = Sensors and systems. 2012;9:4–6. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika* = Measuring equipment. 2010;10:18–21. (In Russ.)
3. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy* = Sensors and systems. 2005;9:8–10. (In Russ.)
4. Trofimov A.A. Angular displacement sensor. *Datchiki i sistemy* = Sensors and systems. 2005;9:13–14. (In Russ.)
5. Barinov N.I., Trofimov A.A. Angular position sensors for in-line profiler. *Datchiki i sistemy* = Sensors and systems. 2004;2:37–39. (In Russ.)
6. Turichin A.M. *Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin* = Electrical measurements of non-electrical quantities. Leningrad: Energiya, 1977. (In Russ.)
7. Urakseev M.A., Kagarmenov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy* = Sensors and systems. 2003;1:33–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors**Алексей Анатольевич Трофимов**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Alexei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Владимирович Гладков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

Alexei V. Gladkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Наталья Сергеевна Трофимова

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Natalya S. Trofimova

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Здобнов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zdobnov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Данила Николаевич Колтин

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Danila N. Koltin

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 05.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.04.2021