

УДК 629.179.13

А.О. АНТОНОВ, Р.А. ТРОФИМЕНКО, Л.Л. ЯЦКО, А.О. СУТКОВОЙ

ПАО «НТК «Электронприлад», Киев, Украина

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Статья посвящена перспективным методам контроля и диагностики САУ газотурбинных двигателей, реализуемым в современных электронных системах управления и контроля ГТД. Рассмотрена возможность применения метода импульсной рефлектометрии для контроля электрических цепей связи между элементами электронной САУ. В статье также рассмотрена возможность практической реализации применения беспроводных технологий передачи данных для связи элементов электронной САУ, в качестве альтернативы проводным соединениям, на основе технологий построения беспроводных персональных вычислительных сетей ZigBee.*

**Ключевые слова:** ГТД, САУ, контроль, датчики, импульсная рефлектометрия, беспроводные вычислительные сети, ZigBee.

### Введение

Одним из основных приоритетов в развитии электронных цифровых систем автоматического управления газотурбинным двигателем (ГТД) является повышение надежности и живучести, как и отдельных элементов системы автоматического управления (САУ), так и всей системы в целом.

С началом внедрения «электронного управления» в САУ газотурбинных двигателей, разработчики получили широкий спектр возможностей для построения сложных систем управления. Возможность использования большого количества датчиков, сигнализаторов, исполнительных механизмов, контуров управления, а также возможность реализации сложных алгоритмов поведения САУ позволяет воплощать на практике эффективные решения, заметно отличающиеся технологическими, экономическими, ресурсными, надежностными и массо-габаритными характеристиками.

### 1. Формулирование проблемы

В развитии электронных САУ наблюдается тенденция увеличения числа ее элементов, а, следовательно, и усложнение электрической части двигателя. Увеличение общего количества электрических связей и соединителей оказывает неблагоприятное влияние на надежностные, массо-габаритные, эксплуатационные характеристики, а также стоимость изделия.

При эксплуатации ГТД количество отказов в кабельных соединениях может составлять до 40% от общего количества отказов электронной САУ [1].

Помимо чисто механических повреждений цепей, имеют место дефекты межкабельных соединений, вызванные загрязнением или неправильным соединением разъемов. Часто такие дефекты имеют постоянный характер и проявляются только при определенных условиях, например, под воздействием вибрации работающего ГТД. Данный вид отказов особенно часто встречается на ранних этапах «жизни» изделия и в профессиональной лексике носит название «переменный контакт». Двигателестроители вынуждены применять в конструкции САУ дорогие соединители, а также вносить в регламент обслуживания двигателя регулярную чистку разъемов. Со стороны встроенного контроля, входящей в состав электронной САУ авиационного ГТД, данный вид отказов плохо диагностируется стандартными методами контроля цепей САУ, что не позволяет вовремя диагностировать неисправность и предотвратить возможное летное происшествие. Изменение переходного сопротивления точки соединения цепей может носить случайный характер и достигать относительно больших величин. В этом случае успешное определение или диагностирование отказа будет зависеть от типа контролируемой цепи. Если контролируется цепь подключения датчика по его электрическим параметрам, а тип измерительного канала требует большого входного сопротивления измерительного преобразователя, – дефект трудно определяем ввиду незначительности переходного сопротивления дефекта по отношению к входному сопротивлению измерительного канала.

Контроль цепи путем пропускания измерительного тока, также даст отрицательный результат, если сопротивление датчика или сигнализатора

большое или бесконечное. Например – разомкнутый дискретный сигнализатор, стружкосигнализатор и т.д. Более того, обнаружение полного обрыва линии связи с подобными элементами САУ стандартными методами контроля не представляется возможным на методологическом уровне.

В данной статье формулируются две задачи.

Первая задача – поиск перспективных методов контроля кабельных соединений, входящих в состав электронной САУ, обеспечивающих углубленный контроль качества соединений.

Во второй задаче, в качестве альтернативы проводных соединений, рассматривается перспектива применения беспроводных технологий передачи данных для связи элементов электронной САУ.

## 2. Применение методов импульсной рефлектометрии для контроля кабельных соединений элементов электронной САУ

Метод импульсной рефлектометрии (ИР) в самом общем определении заключается в анализе неоднородностей волнового сопротивления линии связи на протяжении всей ее длины. В настоящее время ИР широко используется в области электропередачи и телекоммуникаций для диагностики кабельных линий длиной до 50 км и позволяет диагностировать целый ряд дефектов линий связи: обрыв, короткое замыкание, нарушение изоляции, наличие влаги, несанкционированное подключение [2]. Важная особенность ИР – определение расстояния до места дефекта. Суть метода состоит в следующем. В линию подается зондирующий импульс и анализируется его отражение от неоднородностей импеданса линии, в виде которых проявляются дефекты цепи. По времени задержки отраженного сигнала относительно зондирующего, определяется расстояние до дефекта, а по форме и амплитуде сигнала – вид дефекта. Идеальным объектом контроля для ИР является двухпроводная линия с нормированным по всей длине волновым сопротивлением как, например, коаксиальный кабель или витая пара. Диагностика однопроводной линии данным методом недоступна. Однако если контролируемая линия входит в состав кабеля, в котором выдерживается изолирующее расстояние до экрана или другой линии, данный метод вполне приемлем.

Длительность импульса определяет разрешающую способность по определению расстояния до дефекта, а точнее мертвую зону после точки подачи импульса в линию, в которой дефект не будет выявлен. Длина кабелей, соединяющих элементы САУ, варьируется в пределах от десятков

сантиметров до десятков метров. Время распространения сигнала в контролируемой цепи будет определяться выражением.

$$t = \frac{2 \cdot L \cdot K_y}{c}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина линии;

$K_y$  – коэффициент укорочения;

$c$  – скорость света.

Коэффициент укорочения  $K_y$  показывает во сколько раз скорость распространения импульса в линии меньше скорости распространения в вакууме и определяется диэлектрической проницаемостью материала изоляции и конструкцией кабеля. Для электрических кабелей  $K_y$  может принимать значение в диапазоне от 1 до 3.

Рассмотрим пример использования метода ИР в составе встроенной системы контроля электронного регулятора. В качестве объекта контроля примем двухпроводную линию связи регулятора с дискретным сигнализатором, установленным на двигателе. Как было указано выше, определения обрыва в этой сигнальной цепи при разомкнутом положении сигнализатора стандартными методами контроля не представляется возможным, если в конструкции сигнализатора не предусмотрено наличие шунтирующего сопротивления, т.е. входное сопротивление разомкнутого сигнализатора бесконечно большое. Допустим, сигнализатор подключен к регулятору через коллектор двигателя отрезками витой пары, так что длина цепи от сигнализатора до коллектора составляет 2 м, а от коллектора до регулятора – 3 м. Для упрощения не будем учитывать соединители сигнализатора и регулятора ввиду незначительной длины, образуемой ими отрезков цепи. В процессе контроля, генерируемый регулятором тестовый импульс, будет отражаться от неоднородностей волнового сопротивления линии, из которых наиболее значимые – это разомкнутый конец линии и место соединения линии в коллекторе (рис. 1).

Без учета затухания в линии [3], амплитуда отраженных сигналов будет определяться выражением.

$$A_0 = A_3 \frac{Z_1 - Z}{Z_1 + Z}, \quad (2)$$

где  $A_0$  – амплитуда отраженного импульса;

$A_3$  – амплитуда зондирующего импульса;

$Z_1$  – волновое сопротивление в точке отражение;

$Z$  – нормированное волновое сопротивление линии.

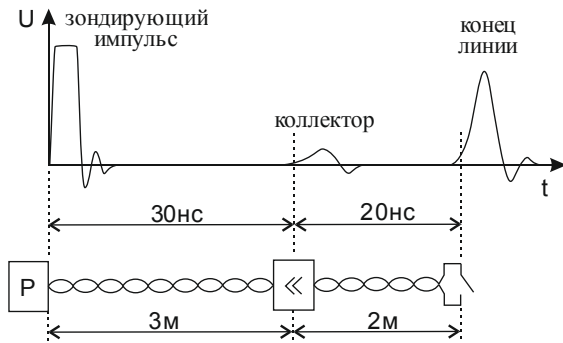


Рис. 1. Отражения зондирующего импульса в неповрежденной цепи

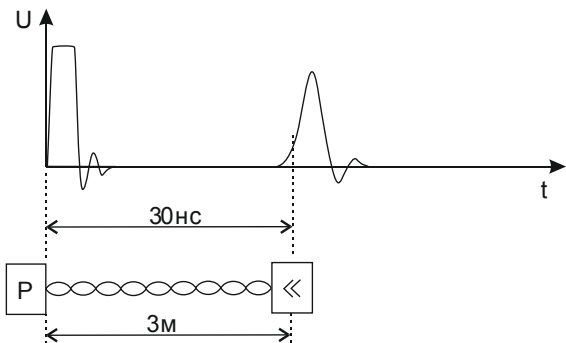


Рис. 2. Полное отражение зондирующего импульса в точке неподключенного коллектора

Достигнув конца контролируемой линии, зондирующий импульс будет отражаться в зависимости от согласованности входного сопротивления элемента САУ, подключаемого к линии, и импеданса линии. В данном случае сигнал отразится полностью от конца разомкнутой линии. В месте подключения цепи в коллекторе, лишь небольшая часть энергии зондирующего импульса отразится от незначительного отклонения импеданса в месте соединения кабельных разъемов. Согласно выражения (1), при коэффициенте укорочения равном 1.5, временная задержка между зондирующим и отраженным сигналом на каждый метр длины линии будет составлять 10 нс, следовательно, отраженный от конца линии импульс, возвратится в начальную точку линии через время 50 нс, пройдя суммарное расстояние 10 метров. Таким образом, шкала времени пропорционально трансформируется в шкалу длины линии. Длительность зондирующего импульса, как правило, выбирается в 10...100 раз меньше времени распространения в неповрежденной линии. В данном случае длительность должна быть менее 5 нс. Стоит отметить, что точность определения расстояния зависит не от длительности зондирующего импульса, а от времени нарастания положительного фронта.

Рассмотрим изменения характеристик отражения в линии при нарушении целостности цепи, например, отсутствия контакта в коллекторном разьеме в случае неверного соединения (рис. 2).

При этом тестовый сигнал будет полностью отражаться от конца линии в точке подключения к коллектору, а его задержка составит 30 нс. Аналогично определяется обрыв в любой другой точке линии, при условии достаточной удаленности от сигнализатора для достоверного определения по изменению времени задержки (рис. 3).

Теоретически возможным также представляется определение степени загрязнения контактов соединителя по возрастанию неоднородности импеданса в точке соединения контактов из-за возрастания переходного сопротивления или токов утечек.

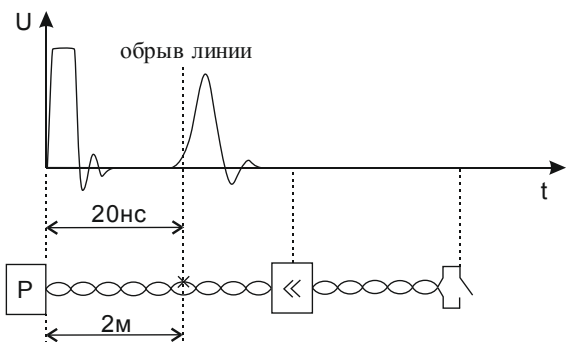


Рис. 3. Обрыв линии

Методика определения короткого замыкания в цепи аналогична за исключением того что, согласно выражения (2), отраженный импульс будет инвертирован.

Перспективной особенностью методологии ИР является возможность «ранней» диагностики сети проводных соединений как элемента САУ ГТД. Применяя алгоритмы анализа формы отраженных импульсов, а также сравнение полученных рефлектограмм с эталонными (фиксируемыми на определенных технических этапах САУ), возможно диагностирование дефектов на ранней стадии их образования, как например: частичное повреждение проводниковых жил, нарушение изоляции, попадание влаги в проводник и вышеуказанное загрязнение соединителей. В современных ГТД наличие «ранней» диагностики является необходимым компонентом, как для системы встроенного контроля современной электронной САУ, так и для системы контроля и диагностики двигателя в ее дискретном исполнении или входящей в состав системы с полной ответственностью типа FADEC.

Техническая сложность реализации методов ИР на данный момент выше средней и связана с точностью измерения временных задержек при прохождении сигналов через сравнительно короткие линии, соединяющие элементы САУ, а также трудностью регистрации формы отраженных высокочастотных сигналов и алгоритмизацию их анализа. Од-

нако на сегодня существуют технические реализации рефлектометров с длительностью тестовых импульсов менее 0,2 нс, применяемых для контроля высокочастотных печатных плат. Также, для предотвращения переотражений зондирующего импульса, необходимо согласовывать выходное сопротивление формирователя импульсов с волновым сопротивлением контролируемой линии.

Высокочастотный характер методов ИР подразумевает также возникновение вопросов с электромагнитной совместимостью, что может ограничивать использования ИР в непрерывном режиме контроля, в частности для авиационных ГТД.

### **3. Применение технологии беспроводных сетей ZigBee для организации обмена информацией между элементами электронной САУ**

Прогресс техники и информационных технологий требует совершенствования коммуникационных возможностей технических средств, основным направлением развития которых, несомненно, является совершенствование беспроводных технологий передачи информации. В отношении двигателестроения данная тенденция также имеет смысл. Помимо тенденций западного двигателестроения, в настоящее время ведутся работы по разработке и исследованию отечественных экспериментальных беспроводных САУ ГТД [1]. Реализация таких технологий позволит значительно уменьшить количество кабельных соединений на двигателе, масса которых на современном ГТД может составлять до 50% массы самой электронной САУ, а в условиях двигательного стенда может достигать массы самого двигателя. Использование проводных соединений ограничивает возможность реконфигурации САУ, которая актуальна при опытных работах и требует значительного времени, а неоптимальное отношение количества связей к информационной плотности транслируемым по ним сигналам определяет низкий КПД проводных коммуникаций.

Использованию беспроводных коммуникаций между элементами электронной САУ способствует распространение интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов, что дает потенциальную возможность создания универсальной САУ, состоящей из унифицированных элементов, комбинирование которых позволит создавать систему управления любой сложности. Наличие такой системы особенно востребовано на этапах ОКР и испытаний ГТД. Однако физические принципы беспроводных технологий представляют собой главное препятствие для их использования в двигателестроении, в частности авиационном, связанное с потенциальной

уязвимостью последних к внешним электромагнитным воздействиям. Поэтому, на данный момент, представляется возможным создания гибридных систем для наземного применения, где основные контуры и узлы системы выполнены или дублируются проводными средствами, а вспомогательные – беспроводными. Также, несомненно, данные средства представляют интерес при построении испытательных стендов.

В данной статье рассматривается возможность практической реализации вышеуказанной системы на основе технологий построения беспроводных персональных вычислительных сетей (WPAN), объединяемым названием ZigBee. Это набор сетевых протоколов верхнего уровня, использующих сервисы нижних уровней, самый низкий из которых определяет физический слой и регламентируется стандартом IEEE 802.15.4, также как IEEE 802.11 определяет физический слой технологии Wi-Fi [4].

ZigBee – это сравнительно молодой и перспективный стандарт, созданный для построения промышленных сенсорных сетей с небольшой плотностью передаваемых данных. Основное отличие ZigBee – это способность объединения устройств в самоорганизующуюся сеть с многочастотной топологией и поддержкой ретрансляции и маршрутизации сообщений. Трансиверы ZigBee ориентированы на невысокое энергопотребление и имеют низкую мощность излучения радиочастотной энергии (не более 1 мВт), что определяет высокий КПД беспроводной передачи информации на небольшие расстояния. Данный аспект позволяет организовывать сети с большим количеством узлов: датчиков, исполнительных механизмов, ретрансляторов.

В составе электронной САУ ГТД можно представить следующую схему организации беспроводного обмена данными. Центральный узел сети входит в состав электронного регулятора и функционирует в режиме координатора. Он является основным приемником информации от всех остальных элементов сети, а также отвечает за создание и конфигурирование сети. Остальные устройства сети входят в состав датчиков и исполнительных элементов САУ. Подавляющее большинство их должно функционировать в режиме маршрутизатора. Устройствам, расположенным на периметре сети или требующим активности в определенные моменты работы САУ, допускается функционировать в режиме конечного устройства. При условии сильного экранирования элементами конструкции двигателя элемента САУ, с установленным трансивером ZigBee, от других устройств сети, рекомендуется размещение вблизи дополнительного устройства-маршрутизатора.

## Заключение

Применение метода импульсной рефлектометрии для контроля цепей электронной САУ позволит значительно улучшить диагностику состояния САУ в целом, улучшить ее надежность и эксплуатационные характеристики.

Внедрение беспроводных технологий для связи между элементами электронной САУ позволит улучшить массо-габаритные характеристики САУ, а также способность системы к функциональной реконфигурации

## Литература

1. Балашов, Ф.М. Разработка и расчетно-экспериментальные исследования элементов бес-

проводной САУ ГТД [Текст] / Ф.М. Балашов, А.С. Трофимов // Новые решения и технологии в газотурбостроении: тез. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов 5-8 октября 2010. – М.: ЦИАМ, 2010. – С. 8–10.

2. Груба, Г.И. Силовые трансформаторы [Текст] / Г.И. Груба, А.А. Иоффе. – Симферополь: Таврида. – 2007. – 188 с.

3. Бакланов, И.Г. Методы измерений в системах связи [Text] / И.Г. Бакланов; ред. А. Б. Иванов. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 195 с.

4. Kinney, P. ZigBee Technology Wireless Control that Simply Work [Электронный ресурс] / P. Kinney // Communications Design Conference, 2 October 2003. – Kinney Consulting LLC, 2003. – 21 p. – Режим доступа: [http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop\\_download.asp?contentID=5162](http://www.zigbee.org/imwp/idms/popups/pop_download.asp?contentID=5162). – 31.05.2013.

Поступила в редакцию 14.06.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры Н.И. Бурау, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

## СУЧАСНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

*О.О. Антонов, Р.А. Трофименко, Л.Л. Яцко, О.О. Сутковий*

Стаття присвячена новітнім методам контролю та діагностування САК газотурбінних двигунів, впроваджуваних в сучасних електронних системах керування та контролю ГТД. Розглянуто можливість застосування методу імпульсної рефлектометрії для контролю електричних ліній зв'язку поміж елементами САК. В статті також розглянута можливість практичної реалізації застосування бездротових технологій передачі даних для сполучення елементів електронної САК, у якості альтернативи дротових сполучень, на основі технологій побудови бездротових персональних обчислювальних мереж ZigBee.

**Ключові слова:** ГТД, САК, контроль, датчики, імпульсна рефлектометрія, бездротові обчислювальні мережі, ZigBee.

## MODERN METHODS OF DIAGNOSIS AND CONTROL OF GAS TURBINE AIRCRAFT ENGINES

*O.O. Antonov, R.A. Trofymenko, L.L. Iatsko, O.O. Sutkovyi*

The article is devoted to the promising methods of monitoring and diagnostic ACS gas turbine engines, implemented in modern electronic control systems and control of CCD. The possibility of using the method of pulse reflectometry for the control circuits between the elements ACS. The paper also considered the possibility of practical implementation of the use of wireless technologies for data communication elements of the electronic self-propelled guns, as an alternative to wired connections, based on the technologies of wireless personal area networks ZigBee.

**Key words:** GTE, ACS, control, sensors, pulse reflectometry, wireless computer networks, ZigBee.

**Антонов Алексей Олегович** – инженер-конструктор ПАО «НТК «Електронприлад», Киев, Украина, e-mail: aloha-an@yandex.ru.

**Трофименко Руслан Анатольевич** – начальник бригады ПАО «НТК «Електронприлад», Киев, Украина, e-mail: tr.r@mail.ru.

**Яцко Ласло Ласлович** – канд. техн. наук, зам. Главного конструктора ПАО «НТК «Електронприлад», Киев, Украина, e-mail: iatsko@i.ua.

**Сутковий Александр Олегович** – инженер-конструктор ПАО «НТК «Електронприлад», Киев, Украина, e-mail: aloha-an@yandex.ru.