

УДК 004.9:629.7.06

Ю.С. АФОНИН¹, Т.В. МАНИЛО¹, В.Н. ХАРИТОНОВ², В.И. ДУБРОВИН¹¹Запорожский национальный технический университет, Украина²ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ОБЗОР МЕТОДОВ И РЕАЛИЗАЦИЙ ЗАЩИТЫ ГТД ПРИ АВАРИЙНОМ РАССОЕДИНЕНИИ ТРАНСМИССИИ

Статья посвящена обзору существующих способов защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии. Представлена классификация методов и реализаций защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии. Выделены преимущества и недостатки рассматриваемых методов и способов реализаций защиты ГТД. Рассмотрен метод обнаружения рассоединения трансмиссии, основанный на исследовании характеристик сигналов с датчиков частоты вращения турбокомпрессора и ротора силовой турбины, а именно анализа данных сигналов с помощью вейвлет-фильтров, последующего извлечения информативных признаков о факте рассоединения трансмиссии, и, соответственно, получения управляющего сигнала на клапан ограничения подачи топлива. Рассмотрены способы усовершенствования рассмотренных методов.

Ключевые слова: аварийное рассоединение трансмиссии, защита ГТД, раскрутка вала, частота вращения, вейвлет-фильтр, ограничение подачи топлива.

Введение

Одним из важных объектов наблюдения в процессе функционирования ГТД является вал силовой турбины (СТ). Поскольку его скорость вращения достигает несколько тысяч оборотов в секунду, его поломка (рассоединение трансмиссии) может случиться внезапно и быстро. Процесс поломки вала происходит в доли секунды, что может привести к мгновенным катастрофическим последствиям двигателя, в котором компоненты вращения переднего фрагмента тут же замедляются, в то время как компоненты вращения заднего фрагмента начинают стремительно и неконтролируемо ускоряться. Такое неконтролируемое ускорение заднего фрагмента вызывает величайший риск и опасность, поскольку скорость вращения этих компонент может достигать значения, когда центробежная сила приводит к выбросу компонент и неограниченному их движению внутри корпуса двигателя. Такое свободное движение может привести как к разрушению остальных частей двигателя, так и последующему повреждению корпуса летательного аппарата (фюзеляжа).

Поскольку весь процесс происходит в пределах нескольких миллисекунд, т.е. значительно быстрее реакции экипажа, в международных Авиационных правилах АПЗЗ и JAR-T850 оговорено обязательное наличие автоматизированной системы защиты двигателя.

Разработка системы защиты двигателя при аварийном рассоединении трансмиссии чрезвычайно

актуальна, к ней должны предъявляться требования надежности, достоверности и мгновенной реакции на выявление аварийного состояния.

1. Классификация методов и реализаций защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии

Системы защиты ГТД можно разделить:

- по способу реализации обнаружения признаков разрыва вала:
 - механический;
 - с использованием электрической схемы;
 - электронный;
 - смешанный (напр. электромеханический);
- по способу предотвращения раскрутки вала при его разрыве:
 - с прекращением подачи топлива за счет подачи управляющего воздействия на клапан подачи топлива;
 - с рассеиванием излишней энергии за счет трения роторных и статорных частей;
- по видам источников информации о состоянии исследуемого объекта:
 - датчики частоты вращения;
 - датчики вибрации;
 - датчики давления;
 - датчики температур;
- по месту расположения датчиков:
 - в зоне переднего фрагмента (секция энергопотребления);

- в зоне заднего фрагмента (секция энергогенерации), так называемой горячей зоны (возле СТ);
- совместно в зоне переднего и заднего фрагмента;
- по виду анализируемых сигналов:
 - аналоговые;
 - цифровые;
- по методам обработки сигналов с датчиков:
 - с использованием преобразования Фурье;
 - с использованием вейвлетов;
 - с использованием других фильтров (напр. фильтров Чебышева);
 - фазово-частотный метод.

2. Способы контроля и предотвращения поломки вала

Во многих имеющихся на сегодняшний день решений, которые могут быть применены для предотвращения раскрутки вала, заложен механический принцип действия с использованием метода коллизии: рассеивания вращательной энергии детали за счет столкновения [1 – 4]. Данные системы предполагают использование тормозящих элементов, которые в случае поломки и осевого смещения вала, вступают во взаимодействие, тем самым поглощают вращательную энергию вала и способствуют его торможению. Такие системы имеют главный недостаток – продолжается подача топлива в камеру сгорания, что продолжает генерацию энергии раскрутки вала, что будет требовать значительного количества поглощающих энергию механизмов. Рассеивание энергии может быть достигнуто путем деформации, трения, и разрушения ротора и статора турбины. Данные разрушения требуют последующих возмещений убытков разрушенных деталей, а вполне вероятно – приведут к разрушению двигателя и его непригодности.

Еще одним известным способом решения рассматриваемой проблемы является использование механического обнаружения разрыва вала с последующим воздействием на топливный клапан для прекращения подачи топлива. Так из описания к патенту [5] двигатель включает осевую перемещающуюся деталь, которая в случае поломки вала смещается вдоль оси вала, деталь соединена таким образом, чтобы при смещении запустить топливный клапан для ограничения подачи топлива. Еще одной реализацией механического воздействия на клапан является система, заявленная в патенте [6], в которой вал, в случае его поломки во время его функционирования, при раскрутке сдвигает муфту, которая при контакте с передней частью поршня сдвигает его, что в свою очередь приводит к толчку клапа-

на и прекращению подачи топлива.

Препятствием для воплощения таких решений в промышленности является необходимость адаптации конструкции двигателя в соответствии со специфическими условиями. Также такие решения могут увеличивать массу двигателя, что является нежелательным, и требуют значительных затрат для внедрения.

На смену механическим решениям для контроля превышения скорости при разрыве вала пришли решения с использованием электрических схем

Многие известные электрические и электромеханические решения применяются для наблюдения за скоростью вращения ротора.

Весь процесс определения текущей частоты вращения должен выполняться чрезвычайно быстро, определение частоты вращения и последующий набор расчетов должны выполняться в режиме реального времени для получения максимальной скорости реакции системы на аварийную ситуацию (0,001 – 0,01с).

Система мониторинга вала [7] для обнаружения его осевого сдвига включает шестерной индуктор, установленный на валу и вращающийся с ним, пару индуктивных датчиков расположенных радиально шестерного индуктора для считывания момента прохождения зуба во время вращения вала. Шестерной индуктор имеет два набора зубьев, один имеет прямой разрез, другой – диагональный, таким образом, разница фаз между соответствующими выходными сигналами первого и второго набора зубьев изменяется при осевом смещении вала. Расположение датчиков в противоположных осевых концах шестерного индуктора также дают возможность отследить смещение вала, признаком является увеличение амплитуды сигнала, полученного с датчика из одного конца, и уменьшение амплитуды сигнала с другого датчика. Недостатком данного решения является малая достоверность результатов в различных условиях: нет однозначного уровня осевого и радиального смещения. Таким образом, проблемой является выбор граничного уровня смещения вала, при котором можно делать вывод о поломке. Также проблемой является то, что в случае поломки, вал начинает описывать в радиальной плоскости траектории, которые могут привести к разрушению датчика.

Способ обнаружения поломки вала, заявленный в патенте [8] предполагает наличие двух датчиков частоты вращения на противоположных осевых концах вала и двух счетчиков. При разрыве вала значение в первом счетчике начинает стремительно увеличиваться, счетчик выдает положительный сигнал, когда его значение превышает 360 единиц и сохраняет свою позицию более 500 мкс. Другой

счетчик выдает положительный сигнал при зафиксированной скорости вращения вала более 1000 об./мин. В данном методе выходной сигнал, который отвечает за факт поломки вала и прекращает подачу топлива, формируется путем сопоставления положительных сигналов с двух счетчиков. Недостатком является жестко заданные условия получения выходного сигнала о прекращении подачи топлива; установка одного из датчиков в горячей зоне; большое время накопления значений первого счетчика для выдачи положительного сигнала (500 мкс).

В методе распознавания поломки вала заявленном в патенте [9] наблюдается частота вращения с датчиков установленных на двух концах вала, значения частот постоянно сравниваются в режиме реального времени, и делается вывод о поломке, когда частота в сигнале полученном со стороны СТ превышает на конкретную величину частоту вращения зафиксированную с обратной стороны вала. Если наблюдается значительная разница между частотами, генерируется электрический сигнал на ограничение или прекращение подачи топлива. Расчет текущей частоты сигнала с каждого датчика выполняется в параллельных каналах путем быстрого преобразования Фурье (БПФ) и арифметического процессора, сигналы с которых поступают на компаратор для определения разницы частот. Для достоверного определения присутствия заданной частоты в сигнале с помощью БПФ требуется широкое временное окно, что накладывает ограничения на скорость реакции системы при аварийном рассоединении трансмиссии. Поскольку датчики установлены на подшипниках качения, недостатком также является невозможность заменить датчики в эксплуатации. К тому же выделить текущую частоту ротора в данном случае достаточно проблематично, так как в сигнале отсутствует опорная частота СТ.

Методы использующих смешанный тип зоны установки датчиков имеют главный недостаток: достоверный выходной сигнал формируется только при наличии достоверных сигналов с двух датчиков, а поскольку один из датчиков установлен в горячей зоне, имеется большой риск его преждевременного разрушения.

В системе определения поломки вала представленной в патенте [10] используется следящее устройство, смонтированное ниже ротора СТ для обнаружения его обратного осевого движения и, соответственно, поломки вала. Система использует физическое разъединение электрической схемы, которая включает схему соединений и электронику для обнаружения поломки вала. Во избежание ложных срабатываний системы при осевых смещениях, связанных с температурными нагрузками, большое значение имеет зазор между вращающейся частью

системы уплотнения СТ и корпусом следящего устройства. В то же время при разрушении вала настраиваемый зазор может не сработать из-за значительных радиальных перемещений СТ. Следует отметить, что величина зазора будет индивидуальной для каждого двигателя.

В изобретении [11] представлена система и метод мониторинга уровня вибраций ГТД с целью диагностирования состояния различных компонент, в том числе поломки вала. Хотя определение вибрации является безопасным инструментом для наблюдения за состоянием различных компонент двигателя в процессе его функционирования, он требует тщательной фильтрации для получения информативной составляющей о состоянии вала, скорости его вращения. В данном методе анализ тенденций амплитуд используется для определения уровня вибраций в определенных частотах и при определенных условиях функционирования. Предупреждающие и аварийные уровни обеспечивают порог, при котором пилоту сообщается проблема или ее наступление. Непосредственно для обнаружения поломки вала данный метод не обеспечивает требования мгновенной реакции и отклика системы на факт поломки.

Из описания к патенту [12] известно техническое решение защиты ГТД при забросе частоты вращения вала. Оно содержит электропреобразователь со звеном выявления превышения допустимой частоты вращения, в частности, вала турбины высокого давления. Защита осуществляется подачей гидравлического сигнала электропреобразователя на клапан регулирования подачи топлива. Принцип известного решения в значительной степени основан на взаимодействии гидравлических агрегатов. В данном решении в критический момент превышения допустимой частоты вращения вала при срабатывании гидравлики может отрицательно проявиться фактор времени.

Устройство, заявленное в патенте [13], для обнаружения поломки вала турбодвигателя содержит вал, рычаг, передний и задний фрагменты которого соединены с соответствующими фрагментами вала и расположен вдоль оси внутри вала, датчик для обнаружения разницы скорости вращения между передним фрагментом рычага и вала. Основным преимуществом данной системы является уход от установки датчиков в горячей зоне (зоне заднего фрагмента). Но система имеет ряд сложностей при реализации: способ передачи электрического сигнала на вращающуюся часть; обеспечения соотношения размещения рычага внутри вала, чтобы оставшаяся часть вала не задела рычаг и не привела к его поломке ни при каких степенях удаленности зоны разрыва от опоры СТ.

Метод, заявленный в патенте [14], состоит в измерении температуры на поверхности статора, передачи сигнала температуры на средства управления, которые обеспечивают снижение скорости ротора при достижении определенной температурной границы. Ротору достаточно выполнить небольшое осевое смещение для контакта со статором, что приводит к значительному нагреву из-за трения. Хотя показатель температуры может быть информативным признаком поломки вала, в данном решении очень трудно выбрать место установки датчика температуры на статоре, поскольку в разных точках температура может значительно варьироваться. Недостатком является также низкая скорость реакции системы на изменение температуры.

В патенте ГП «Ивченко-прогресс» [15] заявлен способ защиты турбовального ГТД, содержащего ротор турбокомпрессора (ТК) и ротор СТ, при аварийном рассоединении трансмиссии его СТ путем управления топливоподачей двигателя. Предусматривает использование сигналов стандартно комплектуемых штатных датчиков: датчик частоты вращения (ДЧВ) ротора СТ, ДЧВ ротора ТК, датчик давления в системе измерителя крутящего момента. Сигналы преобразуются в определенный вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Относительные оценки АЧХ попадают в схему обобщения и сравнения. Формируется набор признаков определяющих состояние исследуемого объекта. В случае значительного изменения частоты вращения ротора СТ формируется команда на ограничение или прекращение подачи топлива. Преимуществом является исключение дополнительных индукторов и датчиков частоты вращения в области СТ.

4. Краткое описание метода выявления поломки вала путем анализа сигналов с использованием вейвлетов

Для обнаружения в сигнале заданной частоты предлагается выполнять свертку сигнала с вейвлет-фильтром, и исследовать характеристики вейвлет-коэффициентов.

Предлагается исследовать сигнал на предмет наличия не только частоты СТ, но и ее несущей, а также частоты ротора ТК, для получения информации о характере изменения частоты СТ.

Важное значение при обнаружении разрыва вала имеет не только степень изменения частоты вращения вала каждого ротора, но и скорость их изменения. Поэтому при получении вейвлет-коэффициентов целесообразно исследовать их динамические характеристики.

Также разрыв вала сопровождается скачком. Выявление скачков предлагается выполнять с по-

мощью вейвлетов, так как вейвлеты хорошо подходят для выявления кратковременных импульсов.

Заключение

На сегодняшний день способы защиты ГТД при аварийном рассоединении трансмиссии СТ или поломки вала весьма разнообразны по способу реализации и используемым методам.

Использование методов защиты ГТД при разрыве вала путем рассеивания энергии предлагается использовать как дополнительный фактор безопасности совместно с методами, которые ограничивают подачу топлива.

Что касается зоны установления датчиков, наиболее надежной является зона переднего фрагмента ротора СТ. Установление датчиков в горячей зоне (СТ) является ненадежным из-за возможного разрушения датчика, хоть и дает возможность отслеживать более точно раскрутку заднего фрагмента.

По результатам исследований перспективным следует считать активное развитие электронных систем с углублением программной части за счет усовершенствования методов обработки входных сигналов с целью получения большего объема информации о состоянии контролируемого объекта и соответствующего развития аппаратной части с точки зрения быстродействия оцифровки сигнала и его последующей обработки.

Литература

1. Pat. 5481943 USA, Int.Cl. F16P 7/02. Safety device against rupture of rotary shaft / B. Kraeutler; assignee: Nergeco (Societe anonyme), Dunieres, France. – № 96269; filed 26.06.1993; publ. 09.01.1996.
2. Pat. 4503667 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Turbine overspeed limiter for turbomachines / D.A. Roberts; assignee: Rolls-Royce Limited, London, England. – № 539379; filed 06.10.1983; publ. 12.03.1985.
3. Pat. 0289315 USA, Int.Cl. F01D 21/00. System for dissipating energy in the event of a turbine shaft breaking in a gas turbine engine/ J.R.Bart et al; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/126407; filed 23.05.2008; publ. 27.11.2008.
4. Pat. 0126336 USA, Int.Cl. F01D 21/14. System providing braking in a gas turbine engine in the event of the turbine shaft breaking/ J.R.Bart, D.Escure, C.M.Mons, S.Rousselin; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/126648; filed 23.05.2008; publ. 21.05.2009.
5. Pat. 2930189 USA, Cl. 60-39.09. Gas turbine engine with shaft-failure control/ J.A.Petrie; assignee: Rolls-Royce Limited, Derby, England. – № 726260; filed 03.04.1958; publ. 29.03.1960.
6. Pat. 3050939 USA, Cl. 60-39.09. Gas turbine engine with shaft-failure control / F.Morley; assignee: Rolls-Royce Limited, Derby, England. – № 27101; filed

05.05.1960; publ. 29.08.1962.

7. Pat. 4833405 USA, Int.Cl. G01B 7/14. Shaft failure monitoring system using angled rotating teeth and phase detection/ P.N.Richards et al; assignee: Shlumberger Electronics(UK) Limited, UK. – № 172015; filed 23.03.1988; publ. 23.05.1989.

8. Pat. 5293774 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Shaft breakage detection apparatus/ E.M.Ratherham; assignee: Lucas Industries Public Limited Company, UK. – № 881839; filed 12.05.1992; publ. 15.03.1994.

9. Pat. 6494046 USA, Int.Cl. F02G 3/00. Method and apparatus for recognition of a shaft rupture in a turbo-engine/ B.Hayess; assignee: Rolls-Royce Deutschland LTD & Co KG, DE. – № 09/622026; filed 12.11.1999; publ. 17.12.2002.

10. Pat. 6494046 USA, Int.Cl. F01D 21/06. Gas turbine engine broken shaft detection system/ T.Mulera et al; assignee: Honeywell International, Inc., US. – № 09/992847; filed 14.11.2001; publ. 19.08.2003.

11. Pat. 7013210 B2 USA, Int.Cl. G01H 1/00. Vibration monitoring system for gas turbine engines/

G.M.McBrien, J.Gottwald; assignee: Goodrich Pump & Engine Control Systems, Inc., US. – № 10/801301; filed 16.03.2004; publ. 14.13.2006.

12. Pat. 75334 S2 UA. System for protection against existing allowed ripe in turbo-machine/ D.Mailard et al; assignee: SNECMA, FR. – № 0016899; filed 22.12.2000; publ. 15.04.2006.

13. Pat. 2009/0123269 USA, Int.Cl. G01P 3/56. Device for detecting breakage of a turbomachine shaft/ J.R.Bart et al.; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 12/270345; filed 13.11.2008; publ. 14.05.2009.

14. Pat. 2008/0178603 USA, Int.Cl. F02C 9/00. Method and device for reducing the speed in the event of breakage of a gas turbine engine turbine shaft/ C.M.Mons; assignee: SNECMA, Paris, FR. – № 11/875180; filed 19.10.2007; publ. 31.07.2008.

15. Пат. 32219 УА, МПК P02C 9/00. Спосіб захисту газотурбінного двигуна/ І.Ф.Кравченко та ін.; заяв. ГП «Івченко-Прогрес», УА. – №200714528; заяв. 24.12.2007; publ. 12.05.2008, Бюл.№9.

Поступила в редакцію 18.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедрою «Технології авіадвигателів» А.Я. Качан, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя.

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА РЕАЛІЗАЦІЙ ЗАХИСТУ ГТД ПРІ АВАРІЙНОМУ РОЗ'ЄДНАННІ ТРАНСМІСІЇ

Ю.С. Афонін, Т.В. Маніло, В.М. Харитонов, В.І. Дубровін

Стаття присвячена огляду наявних засобів захисту ГТД при аварійному роз'єднанні трансмісії. Представлена класифікація даних методів та реалізацій. Виділені переваги та недоліки методів і способів захисту ГТД. Розглянутий метод виявлення роз'єднання трансмісії, оснований на дослідженні характеристик сигналів з датчиків частоти обертання ротора турбокомпресора та силової турбіни, а саме аналізі даних сигналів за допомогою вейвлет-фільтрів, виявлення ознак роз'єднання трансмісії, та, відповідно, отримання управляючого сигналу на клапан подачі палива. Розглянуті способи вдосконалення розглянутих методів.

Ключові слова: аварійне роз'єднання трансмісії, захист ГТД, розкрутка вала, частота обертання, вейвлет-фільтр, обмеження подачі палива.

REVIEW OF GAS TURBINE ENGINE METHODS AND IMPLEMENTATIONS IN THE EVENT OF SHAFT DECOUPLE

Y.S. Afonin, T.V. Manilo, V.N. Haritonov, V.I. Dubrovin

The paper is devoted to existing techniques of GTE protection in the event of shaft decouple. The classification of methods and implementations is presented. Advantages and disadvantages of these methods are pointed out. The method of shaft decouple detection using signals of turbocompressor and turbine rotor sensors is presented, namely signals using wavelet-filters analysis, further informative characteristics of shaft decouple detection and appropriate control signal generation to fuel valve. The ways to improve methods under review are examined.

Key words: shaft decouple, GTE protection, shaft overspeed, rotating speed, wavelet-filter, fuel limit.

Афонин Юрий Сергеевич – ассистент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: yuriy.zp@gmail.com

Манило Татьяна Владимировна – аспирант кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: tatamanilo@gmail.com.

Харитонов Виктор Николаевич – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03510@ivchenko-progress.com.

Дубровин Валерий Иванович – канд. техн. наук, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: vdubrovin@gmail.com