

УДК 629.7.036.001

В.В. НЕРУБАССКИЙ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЗАПУСКА АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Рассмотрен подход к анализу диагностируемости системы запуска авиационного ГТД, основанный на принципах представления систем в виде ориентированных графов. Приводятся основные неисправности системы запуска и их связь с контролируемыми параметрами двигателя.

запуск, система запуска, параметры состояния, ориентированный граф, таблица функций неисправностей, математическая модель системы запуска

Введение

Не вызывает сомнения тот факт, что техническое состояние системы запуска газотурбинного двигателя (ГТД) в значительной мере определяет надежность работы двигателя. Сложные динамические процессы, протекающие в двигателе в процессе запуска, затрагивают практически все узлы ГТД, поэтому необходимо обеспечить периодический и непрерывный автоматизированный контроль работы всех элементов системы запуска в процессе ее эксплуатации.

Формулирование проблемы. Предварительный анализ системы запуска как объекта диагностирования является начальным этапом формирования методов и алгоритмов ее диагностирования. Основными задачами этого анализа являются:

- декомпозиция объекта путем выделения автономных подсистем или подсистем, имеющих слабые функциональные связи с другими подсистемами;
- определение структурного состава каждой подсистемы;
- определение параметрического состава каждой подсистемы с выявлением входных параметров и параметров состояния;
- определение возможных дефектов подсистем.

Такое рассмотрение дает исходную информацию для определения состава задач диагностирования,

формирования диагностических моделей подсистем и на их основе – алгоритмов диагностирования.

1. Состав и параметры системы запуска ГТД

Система запуска ГТД представляет собой совокупность специальных устройств и агрегатов, обеспечивающих вывод двигателя из положения покоя на минимальный режим устойчивой работы, называемый малым газом (МГ) [1].

В общем случае процесс запуска ГТД в соответствии с программой подвода мощности к ротору от пускового устройства и законом подачи топлива в камеру сгорания может быть разбит на следующие этапы:

- раскрутка ротора пусковым устройством до начала подачи топлива и его воспламенения;
- раскрутка ротора пусковым устройством и турбиной на участке работы автомата запуска, дозирующего топливо в камеру сгорания;
- раскрутка ротора только турбиной при вступлении в работу контура автоматического управления приемистостью с выходом двигателя на режим МГ.

Типичная система запуска ГТД состоит из следующих основных элементов: источника энергии (бортовой ВСУ или аккумулятора, наземных источников питания); стартера (электрического, воздушного); трансмиссии, передающей вращение от стар-

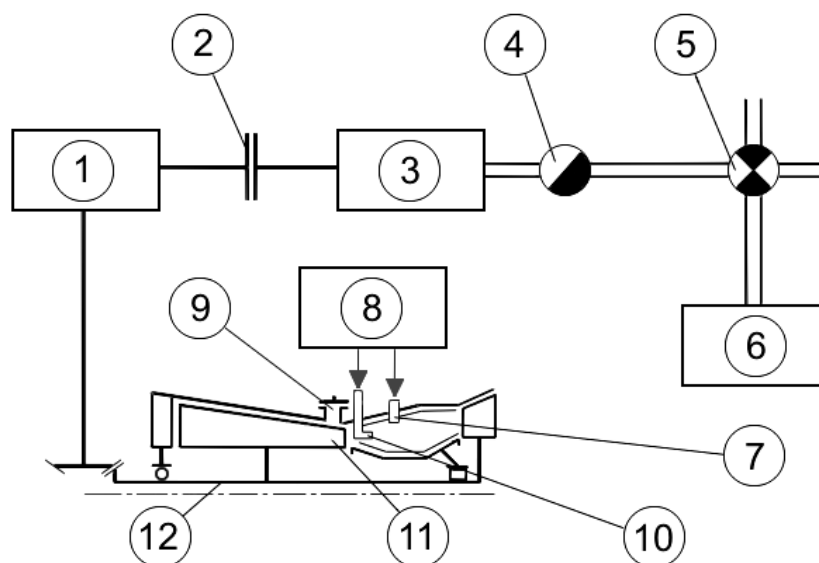


Рис. 1. Схема системы запуска ТРДД:

- | | |
|---|---|
| 1 – коробка приводов агрегатов и трансмиссия; | 7 – пусковой воспламенитель; |
| 2 – муфта; | 8 – ЭСУ; |
| 3 – воздушно-турбинный стартер; | 9 – дополнительный клапан перепуска воздуха (ДКПВ); |
| 4 – заслонка стартера; | 10 – основная топливная форсунка; |
| 5 – распределительная заслонка; | 11 – проточная часть двигателя; |
| 6 – ВСУ; | 12 – ротор |

тера к ротору ГТД; устройств воспламенения топливоздушной смеси (пусковых топливных форсунок и свечей зажигания), топливной системы и агрегатов системы автоматического управления (САУ), обеспечивающих запуск. На рис. 1 приведена схема системы запуска ТРДД типа Д-436 или АИ-222 разработки ГП “Ивченко-Прогресс”.

Входными параметрами, определяющими условия функционирования системы запуска, являются: напряжение в электрических цепях системы запуска; давление и температура воздуха на входе в стартер; мощность или крутящий момент, развиваемые стартером. Параметрами состояния системы являются: мощность, потребляемая ротором при запуске; частота вращения ротора; КПД элементов системы запуска (турбины ВТС, ВСУ); давления, температуры и расходы воздуха/газа в сечениях проточной части двигателя.

Измеряемые параметры и сигналы рассматриваемой системы запуска: температура газов за турбиной (T^*_T); частота вращения ротора (n) и пропорциональная ей частота вращения ротора ВТС ($n_{ВТС}$);

давление воздуха, отбираемого от ВСУ ($P^*_{ВСУ}$); давление воздуха перед сопловым аппаратом ВТС ($P^*_{СА}$); расход топлива (G_T); время от начала запуска до завершения его определенных этапов (t); положение ДКПВ ($i_{ДКПВ}$); положение распределительной заслонки ($i_{РАСП}$); положение заслонки ВТС ($i_{ВТС}$); сигнал “Помпаж” ($i_{ПОМП}$).

Часто в современных САУ формируются дополнительные сигналы, например: “Двигатель работает”, “Подача пускового топлива”, “Прекращение подачи основного топлива”, “Включение агрегатов зажигания”. Эти сигналы вырабатываются на основе измеряемых параметров и могут быть использованы для контроля работы системы запуска. В ряде случаев в ГТД в качестве дополнительного источника информации используют датчик наличия пламени в камере сгорания.

2. Функциональные связи системы запуска с другими системами ГТД

Система запуска функционально связана со следующими системами ГТД или внешними (бортовые-

ми) системами ЛА: ВСУ или аэродромным источником сжатого воздуха, или магистралью подвода (для раскрутки ВТС) воздуха от соседнего работающего двигателя; коробкой приводов (механическая связь между ротором двигателя и ротором ВТС); топливной системой; электрической системой; электронной системой управления; проточной частью; трансмиссией; маслосистемой.

Использование параметров функционально связанных систем ГТД позволяет повысить точность определения неисправностей. Например, анализ тренда времени выбега ротора после прекращения подачи основного топлива позволяет судить о состоянии трансмиссии.

3. Принципы анализа

Под неисправностью системы запуска будем понимать любое физическое изменение составляющих ее элементов, которое приводит к выходу того или иного параметра системы запуска за допустимые пределы.

В системах диагностирования технического состояния объектов алгоритмы диагностирования представляются как совокупность элементарных проверок, последовательность их реализации и правила обработки результатов этих проверок. Вследствие того, что результаты любой элементарной проверки системы запуска могут быть использованы в качестве признаков разделения множества ее возможных технических состояний на подмножества, алгоритм диагностирования системы запуска можно представить в виде ориентированного невзвешенного графа [2, 3]. Для определения каждой конкретной неисправности объекта диагностирования в общем случае существует множество возможных путей в графе, среди которых можно найти оптимальный путь, т.е. оптимальную последовательность элементарных проверок.

Граф причинно-следственных связей системы запуска – это ориентированный граф, вершины ко-

торого представляют параметры системы запуска, а дуги отражают причинно-следственные связи между соответствующими вершинами (параметрами) и всеми возможными неисправностями, влияющими на ее параметры.

4. События в системе запуска

Для построения модели контроля состояния системы запуска и представления ее в виде графа причинно-следственных связей выбираем следующие события Z_i , связанные с выходом за допустимые пределы контролируемых параметров системы:

1. Предельная частота вращения ВТС (Z_1).
2. Отключение ВТС по превышению максимального времени работы (Z_2).
3. Превышение предельного времени запуска (Z_3).
4. Расход топлива меньше минимального (Z_4).
5. Расход топлива больше максимального (Z_5).
6. Превышение максимально допустимой температуры газов (Z_6).
7. Температура газов ниже минимальной для розжига (Z_7).
8. Давление воздуха перед СА ВТС меньше минимального (Z_8).
9. Большие потери давления воздуха в трубопроводах между ВСУ и ВТС (Z_9).
10. Частота вращения ротора ниже ХП (Z_{10}).
11. Частота вращения ротора ниже МГ (Z_{11}).
12. Малое значение производной по частоте вращения ротора (Z_{12}).
13. Большое значение производной по частоте вращения ротора (Z_{13}).
14. Помпаж (Z_{14}).

5. Основные неисправности в системе запуска

Основными возможными неисправностями S_j рассматриваемой системы запуска ГТД являются:

1. Повышенное трение в системе ротора (S_1).

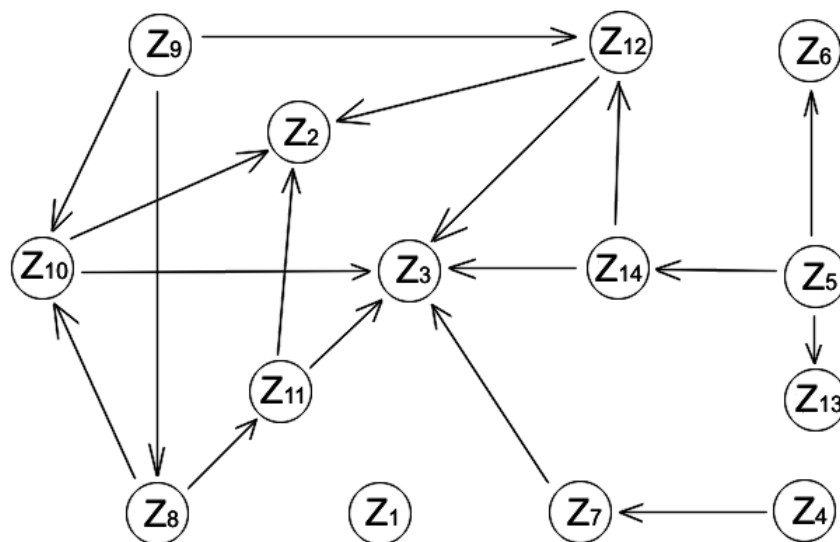


Рис. 2. Граф логических связей параметров системы запуска ТРДД

2. Повышенное трение в трансмиссии (S_2).
3. Проскальзывание муфты (S_3).
4. Невыключение муфты (S_4).
5. Разрывы приводов в трансмиссии (S_5).
6. Нераскрытие ДКПВ на запуске (S_6).
7. Неработоспособность свечей зажигания (S_7).
8. Засорение пусковых форсунок (S_8).
9. Засорение основных форсунок (S_9).
10. Отсутствие подачи пускового топлива (S_{10}).
11. Отсутствие подачи основного топлива (S_{11}).
12. Отсутствие розжига (S_{12}).
13. Отсутствие давления воздуха за ВСУ (S_{13}).
14. Неверное положение распределительной заслонки (S_{14}).
15. Неоткрытие заслонки ВТС (S_{15}).
16. Незакрытие заслонки ВТС (S_{16});
17. Заклинивание ВТС (S_{17}).
18. Неисправность ЭСУ или топливорегулирующей аппаратуры (S_{18}).
19. Разрывы или дефекты трубопроводов подачи воздуха от ВСУ к ВТС (S_{19}).

6. Анализ графа причинно-следственных связей

Логические связи между отдельными параметрами (событиями) системы запуска можно рассмот-

реть в виде графа (см. рис. 2).

Анализ графа причинно-следственных связей с наложенными неисправностями целесообразно проводить путем построения таблицы функций неисправностей (табл. 1), столбцы которой представляют собой неисправные состояния S_j системы запуска, а строки – выходы (параметры) Z_i графа, различающие неисправности.

Анализ таблицы неисправностей позволяет оценить информативность рассматриваемых параметров. В качестве показателя информативности контролируемого параметра в первом приближении можно принять количество “единиц” в строке таблицы – суммарную чувствительность данного параметра к возможным дефектам. По этим значениям параметры системы запуска располагаются следующим образом. Наибольшей информативностью, как и следовало ожидать, обладают частота вращения ротора n и значение ее производной. Следующую группу составляют параметры, связанные с различными временными интервалами t в процессе запуска, и температура газов за турбиной T^*_T . Часть дефектов (например, S_1 и S_2 ; S_{13} , S_{14} и S_{15}) невозможно разделить в связи с их одинаковым влиянием на параметры, а часть дефектов (S_{18} и S_{19}) однозначно выявляется при изменении только одного параметра.

Таблица 1

Логические связи между дефектами и событиями

Z_i	S_j																			ПИ*
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	10
3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	8
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	6
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	4
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	9
11	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	16
12	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	13
13	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3
14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2

*) ПИ – показатель информативности

ра. Все это требует перехода к количественному анализу неисправностей, в частности рассматривая погрешности измерения тех или иных параметров системы запуска.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют выбрать правильное направление в планировании процесса контроля и диагностики технического состояния системы запуска ГТД.

Полученные результаты являются исходным материалом к разработке математической модели системы запуска и планированию экспериментальных работ по испытанию и доводке соответствующих алгоритмов диагностирования.

Литература

1. Алабин Г.Н. Кац Б.М. Литвинов Ю.А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1968. – 228 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1990. – 244 с.
3. Диагностирование на граф моделях / Я.Я. Осис, Я.А. Гельфенбейн, З.П. Маркович, Н.В. Новожилова. – М.: Транспорт. 1991. – 244 с.

Поступила в редакцию 04.05.2007

Рецензент: канд. техн. наук И.И. Лобода, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.