

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**СОСТАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦЫ СОСТОЯНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФА ПРИЧИННО –
СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ**

Методические указания к практическим занятиям

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ
СГАУ РЕГИСТ. № 8-0/3

САМАРА 2012

УДК 629.872.3.004.05

Составители: Киселёв Юрий Витальевич
Киселев Денис Юрьевич

Рецензент: заведующий кафедрой ТДИА, д.т.н.
профессор В.Н. Матвеев

Составление таблицы состояний с использованием графа причинно–следственных связей: [Текст]: методические указания к практическим занятиям/ Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); Ю. В. Киселев, Д. Ю. Киселев, - Самара, 2012. – 19 с.

Изложены теоретические основы построения диагностических моделей на основе графа причинно-следственных связей. Приведён пример составления таблицы состояния масляной системы редуктора с использованием графа причинно-следственных связей. Даны исходные данные для построения графа и составления таблицы состояний по масляной системе двигателя ТВ2-117.

Предназначены для студентов специальностей и направлений подготовки «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей» и «Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов» дневной формы обучения.

Разработаны на кафедре ЭЛАиД.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»

1. Цель работы

Целью настоящей работы является освоение студентами метода построения математической модели объекта диагностирования на основе графов причинно-следственных связей, составление на основе этой модели таблицы состояний и минимизация этой таблицы.

2. Порядок работы

1. Изучить теоретическую часть.
2. Построить граф причинно-следственных связей для масляной системы двигателя ТВ2-117.
3. На основе графа составить таблицу состояний.
4. Провести анализ и минимизацию таблицы состояний.
5. Дать заключение об эффективности системы контроля масляной системы двигателя ТВ2-117.
6. Подготовить отчет о работе.

3. Теоретическая часть. Модели на основе графов причинно-следственных связей

Графом причинно-следственных связей называется ориентированный граф, вершины которого отображают собой параметры, события или явления, а дуги, соединяющие эти вершины, отражают причинно-следственные связи между соответствующими параметрами, событиями или явлениями. Стрелки на дугах направлены от причины к следствию.

Отметим, что с помощью графа причинно-следственных связей можно анализировать и объекты, представленные в виде функциональной модели. В этом случае граф будет иметь вершины, которые соответствуют входным параметрам модели и выходным параметрам блоков модели. Дуги графов будут соответствовать связям между блоками, а также между входными параметрами и блоками модели.

В качестве примера построим граф причинно-следственных связей для шестизаэлементной функциональной модели. В вершинах графа (рис. 3.1.) в данном случае помещаются входные па-

параметры x_1 и x_2 системы и выходные параметры блоков y_i (где $i = 1..6$)

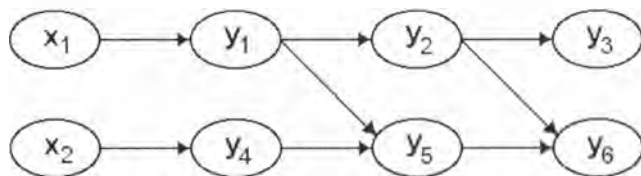


Рис. 3.1. Граф причинно-следственных связей для шести-элементной модели

Вершины с параметрами x_1 и x_2 называются начальными или корневыми вершинами графа. Вершины с параметрами y_3 и y_6 называются висячими вершинами графа.

Данный пример показывает, что граф более конкретно отражает связь между параметрами, событиями или явлениями, помещёнными в вершины графа. По нему четко видно, что если параметр в вершине графа принимает недопустимое значение, то такое же недопустимое значение принимает параметр, связанный с ним причинно-следственной связью (дугой).

Используя полученный граф, можно производить все те же операции, что и по функциональной модели: строить таблицу состояний, выбирать набор проверок (признаков) для проверяющей и различающей совокупностей.

Рассмотренный пример является частным, поскольку в вершинах графа находятся измеряемые параметры. Возможности графов намного шире они определяются тремя основными положениями:

1. Путем построения графов причинно-следственных связей можно устанавливать зависимости не только между параметрами, но и между событиями, которые определены логическими высказываниями.

Например: «Значение параметра (предположим Γ_r^*) не выходит за пределы заданной для него области допустимых значений». Такие события можно помещать в вершины графа и дугами устанавливать между ними связи. Если истинность этого высказывания (то есть нахождения параметра в норме) условиться

представлять единицей, то ложность этого события (то есть выход параметра за допуск) можно представлять нулем. Такое описание истинного и ложного событий совпадает с тем описанием, которое было принято раньше для функциональных моделей. Это и является предпосылкой для построения на основе графа причинно-следственных связей таблицы состояний.

2. При построении графа причинно-следственных связей можно в вершины графов проставлять не все входные, внутренние и выходные параметры, события или явления, которые происходят в объекте, а только те из них, которые доступны для измерения или регистрации.

3. Для функциональных моделей принято, что неисправностью объекта является любая неисправность, приводящая к появлению недопустимого значения параметра на выходе одного из блоков. Количество неисправностей системы совпадает с количеством имеющихся блоков. При построении графа причинно-следственных связей количество диагностируемых состояний (дефектов) можно искусственно уменьшить путём задания конкретного перечня неисправностей, которые требуется обнаружить. Такое задание неисправностей в виде списка равносильно тому, что неисправности, не внесённые в список маловероятны или невозможны. Естественно, что уменьшение числа неисправностей при решении практической диагностической задачи уменьшает число параметров, подлежащих измерению и, как следствие, уменьшают объёмы проверяющей и особенно различающей совокупностей.

В качестве примера, иллюстрирующего особенности применения графов для задач диагностики, рассмотрим построение таблицы состояния с использованием графа причинно-следственных связей для системы смазки редуктора, схема которой изображена на рис. 3.2.

Будем считать, что выходными параметрами, характеризующими техническое состояние всего редуктора являются величины температур трёх основных подшипников редуктора T_1 , T_2 , T_3 . Смазка редуктора (в том числе и подшипников) осуществляется маслом, циркуляция которого обеспечивается шестеренчатым насосом, который имеет нагнетающую (НС) и откачивающую (ОС) секции и создаст в напорной магистрали давление P_H . Ста-

билизация температуры масла в баке T_B обеспечивается прокачкой масла через радиатор. Расход масла через радиатор зависит от положения перепускного клапана. Если клапан закрыт (обозначим это событие K_3), то всё масло при откатке проходит через радиатор и температура масла в баке падает.



Рис. 3.2. Схема системы смазки редуктора

Если клапан открыт (обозначим это событие K_0), то происходит увеличение температуры масла в баке. Кроме температуры масла будем контролировать и его уровень в баке Y_B .

Для определения вершин графа составим список недопустимых событий для данной системы:

1. Превышение температуры подшипников предельно допустимого значения H , то есть $T_1 > H$; $T_2 > H$; $T_3 > H$.
2. Давление масла в нагнетающей магистрали ниже нормы, то есть $P_H < H_1$.
3. Уровень масла в баке ниже минимально допустимого H_2 , то есть $Y_B < H_2$.
4. Температура масла в баке выше максимально допустимой H_3 , то есть $T_B > H_3$.
5. Температура масла в баке ниже минимально допустимой H_4 , то есть $T_B < H_4$.

6. Перепускной клапан постоянно закрыт, то есть имеется событие K_3 .

7. Перепускной клапан постоянно открыт, то есть имеется событие K_0 .

Перечисленные события определяют вершины графа. Для установления причинно-следственных связей между этими событиями проведем анализ физики функционирования системы смазки по имеющейся схеме (рис. 3.2.).

Определим эти связи из следующих соображений. Превышение T_1 , T_2 , или T_3 предельно допустимого значения Π приводит к отказу редуктора. То есть эти события должны быть заключительными в цепочке причин и следствий (рис. 3.3.).

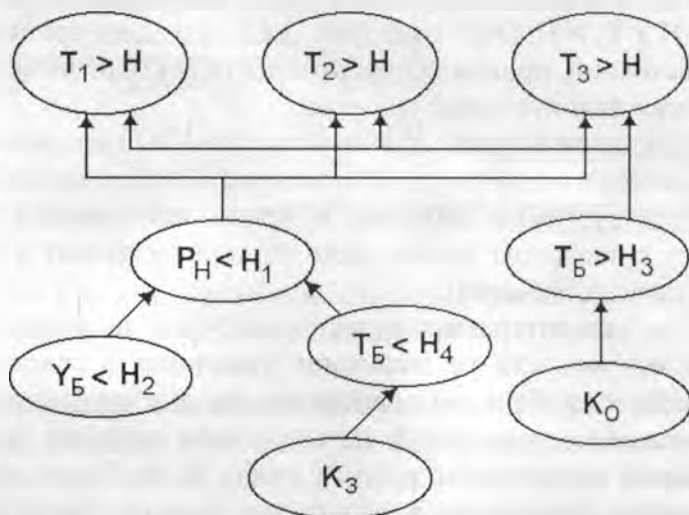


Рис. 3.3. Цепочка причинно-следственных связей между неисправностями системы смазки редуктора

Появление повышенной температуры подшипников может произойти по двум причинам: во первых, из-за повышения температуры масла в баке (событие $T_B > H_3$); вторых из-за падения давления в нагнетающей магистрали (событие $P_H < H_1$).

В свою очередь, повышенная температура масла в баке может появиться, если перепускной клапан постоянно открыт

(произошло событие K_0), то есть масло не охлаждается в радиаторе.

Пониженное давление в напорной магистрали может быть обусловлено двумя причинами: во-первых, если уровень масла в баке ниже нормы (событие $Y_B < H_2$); во-вторых, если масло очень холодное (событие $T_B < H_4$).

Низкая температура масла в баке появится в том случае, если перепускной клапан будет постоянно закрыт (т.е. произошло событие K_3).

Если цепочку причинно-следственных связей, изображенную на рис. 3.3., перевернуть то мы получим граф, у которого в корневых (начальных) вершинах будут помещены события $Y_B < H_2$, K_3 и K_0 , а в висячих вершинах будут помещены события $T_1 > H$, $T_2 > H$ и $T_3 > H$. Этот граф (рис. 3.4.) позволяет составить таблицу состояний, приняв за неисправности все перечисленные выше в списке недопустимые события.

При таком подходе для этой системы мы определим одно исправное состояние (когда отсутствуют все перечисленные в списке недопустимые события) и девять неисправных состояний (когда происходит только одно из перечисленных в списке недопустимых событий).

Под элементарными проверками будем подразумевать оценку появления или не появления указанных в списке событий. Причём, если проверка показывает, что для данного технического состояния проявляется недопустимое событие, то результат проверки принимается равным нулю. И наоборот, если в ходе проверки обнаруживается, что для данного технического состояния проявляется допустимое событие, то результат проверки принимается равным единице. Если теперь при заполнении таблицы в столбец с проверками записывать не события из представленного выше списка, а противоположные им (то есть допустимые события), то полученная таблица будет иметь такой же вид, как и для функциональных моделей. Действительно, для исправного состояния будут наблюдаться только события, противоположные событиям списка, а в соответствующем столбце следует записать единицы. Для отличия допустимых событий от событий, указанных в списке, будем помечать их чертой сверху. Например, $T_1 > H$ - температура первого подшипника находится

в норме.

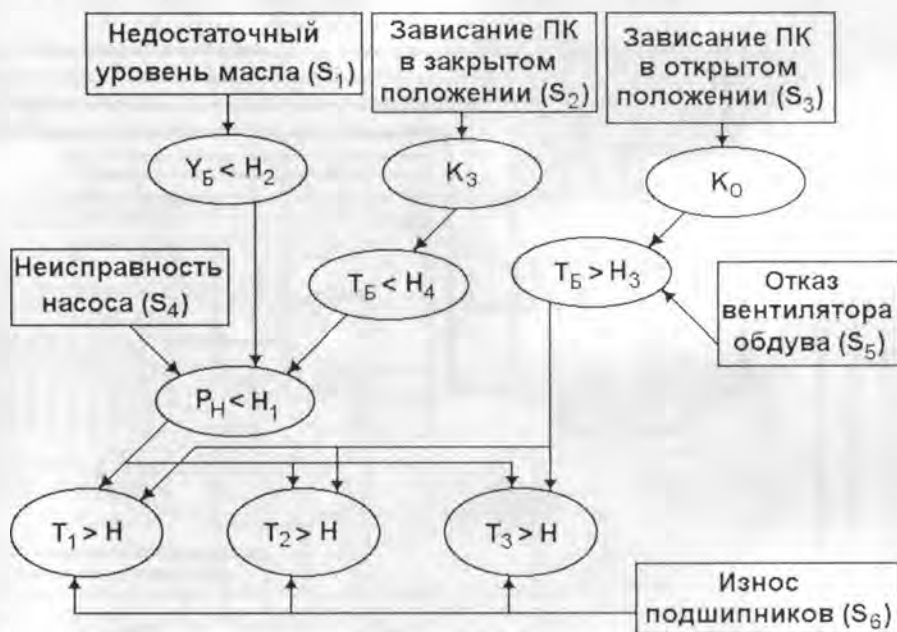


Рис. 3.4. Граф причинно-следственных связей для системы смазки

С учетом всего сказанного таблица состояний будет содержать десять столбцов и девять строк. Для уменьшения размерности таблицы состояния следует определить список только тех неисправностей, которые мы желаем обнаружить. Например, из статистики неисправностей системы смазки известно, что в эксплуатации встречаются следующие технические состояния и неисправности:

- S_0 - исправное состояние;
- S_1 - недостаточен уровень масла в баке;
- S_2 - перепускной клапан завис в закрытом состоянии;
- S_3 - перепускной клапан завис в открытом состоянии;
- S_4 - отказ насоса;
- S_5 - отказ вентилятора обдува радиатора;
- S_6 - износ подшипников.

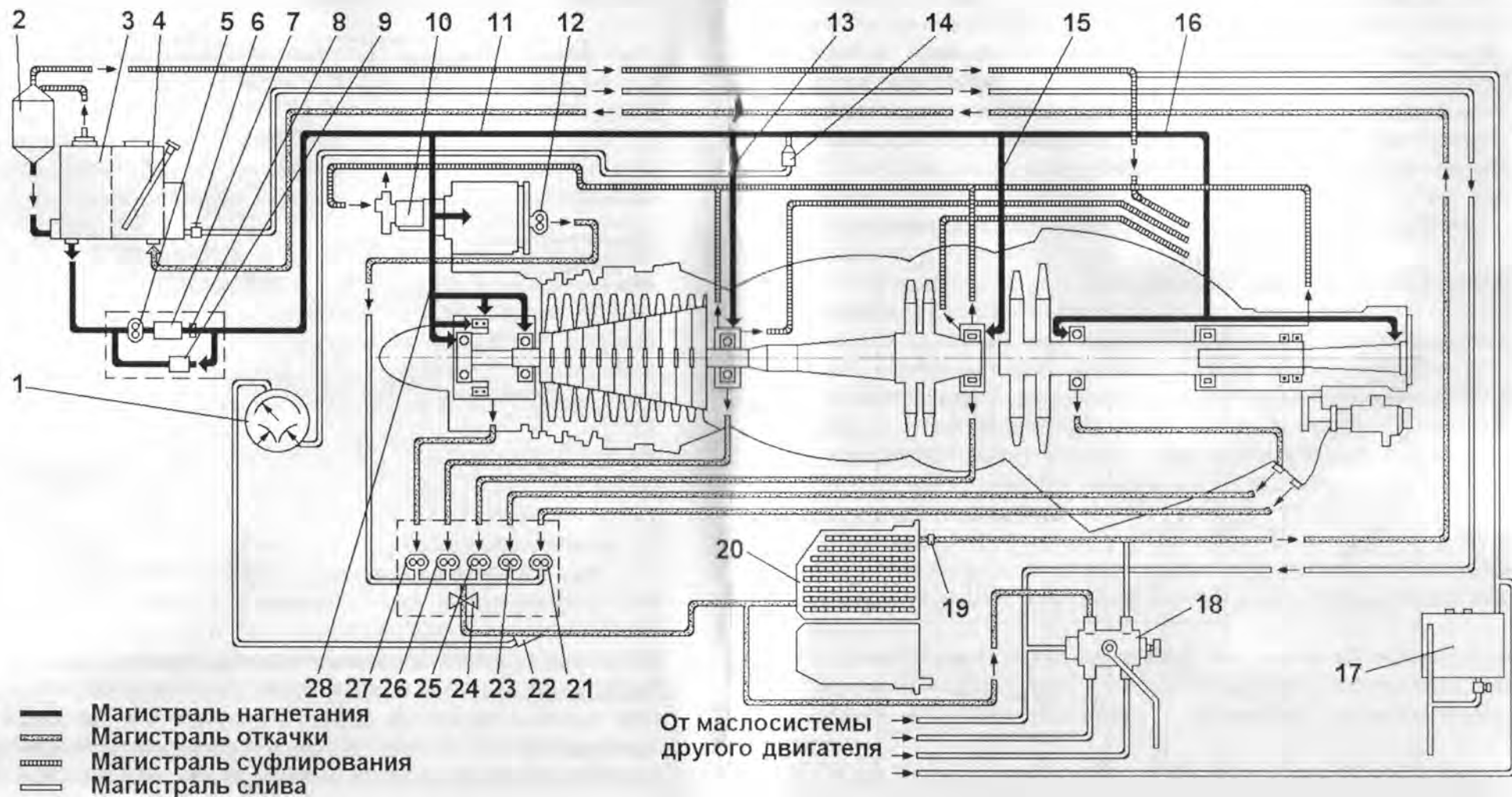


Рис. 4.1. Схема масляной системы двигателя ТВ2-117А:

1 – измеритель УИЗ-3 давления и температуры масла в двигателе; 2 – расширительный бачок; 3 – маслобак; 4 – масломерная линейка; 5 – нагнетающий масляный насос; 6 – кран слива масла из маслобака; 7 – сетчатый фильтр; 8, 24 – запорные клапаны; 9 – редукционный клапан; 10 – центробежный суфлёр; 11, 13, 15, 16, 28 – каналы подвода масла к опорам; 12 – насос откачки масла из коробки приводов; 14 – датчик давления масла; 17 – дренажный бак; 18 – блок сливных кранов; 19 – термостатический клапан; 20 – воздушный масляный радиатор; 21, 23, 25, 26, 27 – откачивающие масляные насосы; 22 – приемник замера температуры масла.

Эти неисправности следует связать с событиями из представленного списка недопустимых событий и наложить их на граф причинно-следственных связей. На рис. 3.4. показано, на какие из событий оказывают влияние эксплуатационные неисправности. Пользуясь этим рисунком, составим таблицу состояний, в которую включим только технические состояния, определенные представленным списком неисправностей.

Таблица 3.1. Таблица состояний для системы смазки

π_i \ S_i	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$\overline{Y_B < H_2}$	1	0	1	1	1	1	1
$\overline{K_3}$	1	1	0	1	1	1	1
$\overline{K_O}$	1	1	1	0	1	1	1
$\overline{T_B < H_4}$	1	1	0	1	1	1	1
$\overline{T_B > H_3}$	1	1	1	0	1	0	1
$\overline{P_H < H_1}$	1	0	0	1	0	1	1
$\overline{T_1 > H}$	1	0	0	0	0	0	0
$\overline{T_2 > H}$	1	0	0	0	0	0	0
$\overline{T_3 > H}$	1	0	0	0	0	0	0

Анализ таблицы

Представленную таблицу также можно проанализировать на предмет ее избыточности. Одинаковыми по информативности являются замеры температуры подшипников редуктора. Также одинаковую информацию о технических состояниях системы смазки содержат событие $\overline{K_3}$ и событие $\overline{T_B < H_4}$.

4. Практическая часть

При работе двигателя (рис. 4.1.) масло из маслблока по трубопроводу поступает на вход к нагнетающему насосу 5, который создает давление по измерительному прибору до $3,5 \pm 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ($3,5 \pm 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$) и направляет поток масла к сетчатому фильтру 7, в котором масло подвергается тщательной очистке от механических примесей. Маслофильтр задерживает механические частицы размером более 0,063 мм. После фильтра масло проходит запорный клапан 8 и идет по трем направлениям:

- внутреннему каналу корпуса нагнетающего насоса к редукционному клапану 9. Если давление масла превышает $3,5 \pm 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ($3,5 \pm 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$), то редукционный клапан открывается и часть масла снова поступает на вход к нагнетающему насосу;

- внутренним каналам в корпусе нагнетающего насоса через жиклер, ограничивающий расход масла, к каналу 28 коробки приводов на смазку и охлаждение деталей коробки приводов, центрального привода и роликового подшипника передней опоры ротора компрессора;

- внешнему трубопроводу 11 на смазку и охлаждение деталей опор турбокомпрессора, свободной турбины, деталей главного привода к привода регулятора частоты вращения свободной турбины.

Расход масла на смазку каждой опоры двигателя зависит от величины механических и тепловых нагрузок, воспринимаемых опорой, и определяется проходным сечением масляных форсунок.

Для приведенной схемы отработанное масло после смазки деталей коробки приводов забирается откачивающим насосом 12 (конструктивно он выполняется в одном узле с нагнетающим насосом и маслофильтром) и направляется в общую магистраль откачки масла из двигателя. Отработанное горячее, содержащее продукты износа и пагара масло от всех опор и зубчатых передач, двигателя самотеком сливается в откачивающие насосы 21, 23, 25, 26 и 27, количество которых соответствует числу опор двигателя. Массовая подача каждого откачивающего насоса соответствует подаче масла через опору, из которой производится его откачка с учетом всасывания и нагрева. Общая подача от-

качивающих насосов в несколько раз превышает подачу нагнетающего насоса.

Масло, откачиваемое всеми насосами, объединяется в единый поток и, пройдя запорный клапан 24 по внешнему трубопроводу, направляется в маслорадиатор 20. В нем происходит охлаждение масла воздушным потоком, прогоняемым через его соты вертолетным вентилятором. Из радиатора охлажденное масло поступает в маслобак 3.

Контроль состояния маслосистемы и проверка ее работоспособности осуществляются как в процессе технического обслуживания и предполетного осмотра экипажем, так и в процессе работы двигателя на земле и в полете. Во время предполетного осмотра необходима проверка уровня масла в баке и при необходимости дозаправка его, а также внешний осмотр состояния трубопроводов и агрегатов маслосистемы. Работоспособность масляной системы и отсутствие износа трущихся деталей опор и зубчатых передач двигателя определяются при техническом осмотре состояния маслофильтра. По его состоянию оценивается не только эффективность работы маслосистемы, но и качество технического обслуживания. По наличию на маслофильтре неметаллических отложений судят о нарушении инструкции заправки маслосистемы маслом, а большого количества кокса — о применении недоброкачественного масла, об усиленном попадании газов в масляные полости через уплотнения; обнаружение на маслофильтре металлической стружки свидетельствует о начавшемся разрушении отдельных деталей опор или зубчатых передач двигателя.

Состояние уплотнений масляных полостей двигателя и эффективность работы системы суфлирования определяется расходом масла, который подсчитывается при техническом осмотре двигателя. Работоспособность масляной системы при работе двигателя на земле и в полете определяется путем контроля давления масла на входе в двигатель и температуры масла на выходе из него. Вследствие ограниченности инструментального контроля работоспособность масляной системы можно оценивать по внешним признакам. Так, если в процессе запуска, прогрева или опробования двигателя в кабине экипажа вертолета появляется запах масла, то можно сделать вывод, что в компрессор по-

пало масло через уплотнения опор. При неисправности откачивающих насосов и в начальный момент разрушения подшипников может также ощущаться запах горелого масла. В процессе запуска двигателя, когда клапаны перепуска воздуха из компрессора открыты и в него попадает масло, также ощущается его запах в пространстве вокруг вертолета. Если в полете из выходного устройства двигателя выходит шлейф белого или голубоватого-серого дыма, то это свидетельствует о попадании в воздушно-газовый тракт двигателя большого количества масла.

Выходным параметром, подлежащим инструментальному контролю данной системы смазки, является температура масла t_M на выходе из двигателя. Для построения логической модели контроля состояния масляной системы при работе двигателя и представления ее в виде графа причинно-следственных связей выберем следующие события: температуру масла на выходе $t_M > t_{Mmax}$; давление $p_M < p_{Mmin}$; уровень масла в маслобаке $V_M < V_{Mmin}$; качество масла K_M , соответствующее условию $K_M < K_{Mmin}$; неудовлетворительную работу воздушно-масляного радиатора P_{II} . Перечисленные события можно принять за вершины графа. Причинно-следственные связи между выбранными событиями определяются следующими соображениями. Превышение температуры масла на выходе из двигателя может быть вызвано ненормальной работой воздушно-масляного радиатора или недостаточным давлением масла в системе. Причинами понижения давления масла в системе могут быть недостаточный уровень масла в баке и ухудшение качества масла, выражающееся в уменьшении его кинематической вязкости.

Основными конкретными неисправностями системы смазки двигателя ТВ2-117А в условиях эксплуатации являются:

- засорение фильтра тонкой очистки масла механическими примесями, частицами нагара или другими продуктами коксования масла;
- подсос воздуха через негерметичные соединения на линии масляный бак - нагнетающий масляный насос. В этом случае при неработающем двигателе в месте негерметичности возможно появление подтекания масла;
- недостаточное количество масла в масляном баке вследствие неполной заправки, утечек, большого расхода масла при работе

двигателя;

- уменьшение вязкости масла вследствие его перегрева или изменения химического состава. При этом количество масла, поступающего в двигатель, увеличивается, смазывающая способность масла ухудшается и не обеспечивается нормальная смазка трущихся поверхностей;

- заедание редукционного клапана в открытом положении (чаще всего из-за попадания под его фаску частиц нагара или случайных механических примесей). При этом давление масла на повышенных режимах работы двигателя может сохраняться в допустимых пределах, но при уменьшении режима резко уменьшается, так как через клапан непрерывно перепускается масло из линии нагнетания обратно на вход в насос;

- образование воздушной пробки в трубопроводе подвода масла к нагнетающему насосу или закупорка суфлирующей трубки маслобака. Как показывает опыт эксплуатации, воздушная пробка на входе в нагнетающий насос образуется при длительной стоянке двигателя, после замены масла в маслосистеме, после съемки для осмотра масляного фильтра, при заедании в открытом положении запорного клапана и при работе двигателя с недостаточным количеством масла в баке;

- засорение сот маслорадиатора с внешней стороны;

- недостаточный обдув маслорадиатора вследствие неправильной установки поворотных лопаток направляющего аппарата вентилятора;

- неисправность маслорадиатора, т. е. термостатический клапан радиатора перепускает масло мимо охлаждающих сот в масляный бак;

- течи масла во внешних соединениях маслопроводов и агрегатов маслосистемы;

- выброс масла из системы суфлирования. Выброс масла может происходить вследствие попадания воды в масло, изменения химического состава масла, прорыва воздуха и газов вовнутрь масляных полостей из-за разрушения уплотнений или загрязнения жиклеров системы суфлирования предмасляных полостей.

В отдельных случаях выброс масла может быть вызван неисправностью воздушно-масляного радиатора или откачивающего масляного насоса;

- повышенный расход масла из-за проникновения масла в газозвдушной поток двигателя вследствие износа уплотнений масляных полостей или загрязнения жиклеров системы суфлирования. При сгорании масла в газозвдушном потоке на деталях проточной части двигателя образуется значительный слой нагара, который ухудшает охлаждение деталей и может вызвать их перегрев.

Сформулированный перечень неисправностей основан на опыте эксплуатации данного ГТД или его прототипов на протяжении нескольких лет. Для решения задач диагностирования технического состояния маслосистемы приведенный перечень неисправностей необходимо наложить на граф причинно-следственных связей. Это делается путем рассмотрения каждой неисправности из перечня (как причины) и определения вызываемых из-за возникновения отклонений параметров или событий (как следствий) из числа включенных в граф причинно-следственных связей.

Список использованных источников

1. Основы технической диагностики. В 2-х книгах. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П. П. Пархоменко. М.: Энергия, 1976. 464 с.
2. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 248 с.

Учебное издание

СОСТАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦЫ СОСТОЯНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФА
ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ

Методические указания

Составители: *Юрий Витальевич Киселёв*
Денис Юрьевич Киселев

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный педагогический университет»
(национальный исследовательский университет)
441010, г. Самара, Московское шоссе, 14