

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2013 А.Н. Коптев, Н.В. Чекрыжев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье представлен формальный подход и алгоритм проектирования технологического процесса технического обслуживания сложного оборудования для управления его состоянием в рамках современных тенденций упреждающего обслуживания с учетом человеческого фактора, основанного на принятии решения по текущему состоянию системы с учетом тренда параметров.

Ключевые слова: технологический процесс, техническое обслуживание, оперативное обслуживание, гидравлическая система, тренд параметров.

Статья посвящена представлению формального метода представлений образов технологических процессов и их реализации на базе целенаправленных действий специалистов по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту (ТОиР) летательных аппаратов (ЛА) в рамках профессиональной деятельности, которая характеризуется иерархической структурностью, логической и операционной сложностью и определяется пространственно-временным характером, многоплановостью, свернутостью и развернутостью осуществления. В этих условиях реализуется два подхода к решению производственных задач: первый связан с применением техники оптимизации, а второй со знанием и опытом человека.

В рамках первого подхода осуществлена обобщенная постановка задачи проектирования (ЗП) технологических операций (ТОП) обслуживания, представленная как трехкомпонентная система

$$\langle K_a, K_{\text{тр}}^*, K_{\text{усл}} \rangle, \quad (1)$$

где K_a – некоторый предмет задачи в актуальном (текущем, исходном) состоянии; $K_{\text{тр}}^*$ – императивная (виртуальная) модель желаемого состояния этого предмета или модель потребного будущего; $K_{\text{усл}}$ – условия, ограничения, которые должны быть выполнены в процессе перевода предмета задачи из его актуального состояния в требуемое.

Под ЗП конкретных ТОП, в том числе операций ТО агрегатов и систем бортового оборудования ЛА, в дальнейшем понимается задача построения продуктивной модели объекта $M(\text{ТОиР})_{\text{пр}}$, для которого определена целевая модель $M(\text{ТОиР})_{\text{ц}}$ и установлены условия или ресурсы R решения задачи. ЗП в обобщенной постановке может быть представлена кортежами

Z', Y', X', G , где компоненты Z', Y', X', G являются в общем случае векторами, имеющими свои размерности.

$$\begin{aligned} \text{ЗП} = \langle & M(\text{ТОиР})_{\text{ц}}, \\ & M(\text{ТОиР})_{\text{пр}}, \\ & R \rangle = \langle \langle \text{Fn}M'(\text{ТОиР}), \\ & Z', Y', X', G \rangle, \\ & M(\text{ТОиР})_{\text{пр}}, R \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

Требования к функциональным свойствам ТОП задаются в постановке ЗП в форме функциональной модели, объединяющей требования к условиям функционирования технологического процесса (ТП): Z' задаются допустимыми областями множества возможных состояний среды (внешних Z_y или окрестностных Z_0 условий), X' – внутренних свойств ТОП, а также продолжительностью функционирования Y' .

Условия предпочтения в допустимой области возможных решений определяют:

А. Критерий эффективности

$$\hat{G}(\hat{y}, \hat{x}, \hat{z}) \succ G(y, x, z). \quad (3)$$

Б. Оценочная функция

$$M(\hat{y}, \hat{x}, \hat{z}) \succ M(y, x, z). \quad (4)$$

При решении второй задачи введены образующие ТОП. Множество всех образующих A состоит из непересекающихся классов образующих. $A^\alpha, A^\alpha \subset A$, где α – общий индекс, индекс класса образующих.

$$A = \bigcup_{\alpha} A^\alpha, \quad (5)$$

где A^α – непересекающиеся классы.

Для наглядного представления образующих введен графический формализм образующей (рис. 1).

Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@ssau.ru
Чекрыжев Николай Викторович, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники.
E-mail: samaranik@yandex.ru

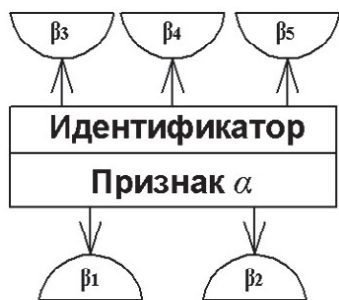


Рис. 1. Графический формализм образующей

Одной из центральных образующих является исполнитель.

Для построения ТОП создаётся определенная конфигурация, обладающая составом и структурой:

$$\text{состав (с) и структура (с)} = \sigma, \quad (6)$$

где σ – тип соединения.

Из множества конфигураций, то есть ТОП, строится технологический процесс, как множество регулярных конфигураций с включением в неё исполнителя. Множество регулярных конфигураций записывается в виде набора из четырёх элементов

$$b(R) = (A, S, \Sigma, \gamma), \quad (7)$$

где S – преобразования подобия, Σ – тип соединения, γ – отношение связи.

Качество функционирования всех систем ЛА на всём протяжении срока эксплуатации требует своевременного предупреждения возможных отказов и неисправностей. Безотказность изделий авиационной техники (АТ) обеспечивается выполнением через определённые промежутки времени осмотров, регламентных работ, доработок и различных видов ремонтов, предусмотренных системой ТОиР.

В настоящее время безопасность полета [1] ЛА рассматривается в более широком плане, т.е. нарушения функционирования систем могут быть вызваны не только отказами АТ, но и другими причинами (ошибками операторов и программного обеспечения, внешними воздействиями и т.п.).

В связи с новыми концепциями современного подхода ИКАО к безопасности полётов, непрерывный мониторинг технического состояния функциональных систем (ФС) ЛА позволяет получать информацию о зарождающихся дефектах, т.е. тренде параметров системы, что требует введения изменений и корректировки сложившихся процессов, процедур и услуг ТО.

Решение этой проблемы требует определённого объёма специального информационного обеспечения, представляющего собой совокупность взаимосвязанных операций сбора, обработки и использования информации для управления техническим состоянием и процессами ТОиР

на основе современных автоматизированных информационных технологий.

Таким образом, разработка моделей ТП ТО ЛА с целью снижения затрат и повышения эффективности и надёжности функционирования систем является актуальной.

Основным видом подготовки ЛА к полётам и обеспечения его работоспособности в процессе выполнения полёта является оперативное ТО (ОТО), обеспечивающее последовательный перевод ЛА из состояния «после полёта» Z_0 в состояние «готовности» Z_g к выполнению очередного полёта.

Последовательность выполнения работ до состояния готовности ЛА к полёту, рассмотрим на примере процедуры ОТО на форме А1 гидравлической системы (ГС) вертолёта Ми-8.

Согласно Единого регламента технической эксплуатации (ЕРТЭ) [2] последовательность выполняемых работ от Z_0 до Z_g при ОТО вертолёта Ми-8 следующая:

- работы после каждой посадки вертолёта с выключением двигателей ($P_{ВС}$),
- работы по осмотру и обслуживанию формы ОТО (А1),
- работы по обеспечению вылета ($P_{ОВ}$).

Выражение процедуры выполнения работ ОТО примет вид:

$$P_{ОТО} = P_{ВС} + P_{А1} + P_{ОВ}. \quad (8)$$

Согласно эксплуатационным документам, работы $P_{ВС}$ и $P_{ОВ}$ предполагают выполнение общего вида работ (установить колодки, получить сведения от экипажа, проверить средства пожаротушения, при низких температурах воздуха – подогреть редукторы и т.п.), поэтому готовность вертолёта к полёту определяется работами оперативной формы А1 ($P_{ОТО}$), выполняемыми по системам; планеру – работами ($P_{Пл.}$), силовой установки – ($P_{СУ}$), гидравлической системе – ($P_{ГС}$) и т.д.

$$P_{А1} = P_{Пл.} + P_{СУ} + P_{С.Упр.} + P_{ГС} + P_{Конд.} + P_{Ш} + P_{МС} + P_{ТС}. \quad (9)$$

Тогда уравнение работ по оценке состояния процедуры подготовки к полёту вертолёта при ОТО запишем:

$$P_{ОТО} = P_{ВС} + P_{Пл.} + P_{СУ} + P_{С.Упр.} + P_{ГС} + P_{Конд.} + P_{Ш} + P_{МС} + P_{ТС} + P_{ОВ}. \quad (10)$$

Используя ЕРТЭ, основные исходные данные работ $P_{ГС}$ ГС вертолёта МИ-8 по осмотру и обслуживанию формы А1 ОТО, в соответствии с выше представленным порядком выполнения работ A_i , уравнение (10) для ГС вертолета на форме А1 определится выражением:

$$P_{ОТО} = P_{ВС} + P_{ГС} + P_{ОВ}. \quad (11)$$

где $P_{ГС}$ – перечень работ при выполнении формы на некотором интервале времени выполнения системы процедур формы А1 ОТО.

Процедура контроля состояния элемента ФС ЛА заключается в распознавания технических характеристик и параметров контролируемого элемента системы.

Полученное фактическое значение регулирующего параметра сравнивается со значением этого параметра, требуемого программой управления или технических требований (ТТ). По результату сравнения принимается решение о дальнейшем использовании этого элемента (эксплуатировать, заменять, регулировать и т.д.).

Как видно из табл. 1, авиационному специалисту принимать решения определения состояния системы, а, следовательно, и последовательность дальнейших действий, приходится с момента выполнения множества операций управления $u_k \in U_{A1}$. Поэтому, выбираем интервал времени с момента процедуры открытия капотов двигателя и редуктора A_1 и заканчиваем оформлением технической документации A_8 , соответствующей готовности системы к выполнению полёта.

Тогда уравнение работ по оценке состояния процедуры обслуживания ГС имеет вид:

$$P_{ГС} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8, \quad (12)$$

где $A_1, A_2, A_3 \dots, A_8$ – работы ОТО ГС.

Конечное уравнение работ (4) для ГС вертолета на форме А1 определится выражением:

$$P_{ОТО} = P_{ВС} + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + P_{ОВ}. \quad (13)$$

В процессе завершения процедур работ $P_{ОТО}$ система принимает соответствующие состояния $C_i \in C_{ГС}$, где $C_{ГС}$ – множество состояний ГС при ОТО, тогда состояние «готовности» $Z_{Г}$ ЛА к полёту после выполнения формы А1 запишем в форме:

$$Z_{Г} = Z_0 + Z_{ВС} + Z_{A1} + Z_{ОВ}, \quad (14)$$

$$Z_{A1} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8, \quad (15)$$

где $Z_{Г}$ – состояние готовности к полёту, $Z_{ВС}$ – состояние по встрече, Z_{A1} – состояние ГС при выполнении формы А1, $Z_{ОВ}$ – состояние по обеспечению вылета, $C_1, C_2, C_3 \dots, C_8$ – состояния элементов ГС соответствующее выполнению процедур A_i ОТО.

Конечное выражение состояний (14) для ГС вертолета на форме А1 определится выражением:

$$Z_{Г} = Z_0 + Z_{ВС} + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 + Z_{ОВ}. \quad (16)$$

Обозначим состояние ГС вертолёта $C_i(t)$ в начале некоторого интервала времени $[t, t+1]$, где (t) начало выполнения работ A_i формы А1, $C_i(t+1)$ – в момент $(t+1)$ – её окончание. Состояние C_i ГС в момент времени $t+1$ определяется перечнем выполненных плановых работ равному алгебраической сумме операций управления u_k и, если состояние системы не соответствует ТТ, то выполняются дополнительные операции восстановления $u_k'.n \in U'_{A1}$ её работоспособности.

Следовательно, уравнение работ по оценке

Таблица 1.

Содержание работ $P_{ГС}$ процедуры по осмотру и обслуживанию гидросистемы формы А1 (A_i)	Начальное состояние системы C_i	Содержание операции управления (u_k)	Состояние системы формы А1 (C_{A_i})		Содержание операции восстановления ($u_k'.n$)	
			Соответствует ТТ (c_k)			
			Не соответствует ТТ ($c_k'.m$)			
1	2	3	4		5	
1. Откройте капоты двигателя и редуктора (A_1).	C_1	1. Подготовьте рабочее место (u_1)	а. Соответствует ТТ (c_1)		-	
2. Проверьте, нет ли течи из агрегатов, шлангов и трубопроводов гидросистемы (A_2).	C_2	1. Проверить визуально, нет ли течи рабочей жидкости (u_2)	а. Соответствует ТТ (c_2) б. Течь масла из разъемов агрегатов, штуцеров и соединений (c'_2)		- Устранить негерметичность (u'_2)	
3. Проверьте уровень рабочей жидкости в баках гидросистемы (A_3).	C_3	1. Проверка уровня масла производится по масломерным стёклам (u_3)	а. Соответствует ТТ (c_3) б. Уровень масла ниже нижней риски (c'_3)		- Дозаправить (u'_3)	
4. Осмотрите агрегаты, трубопроводы и шланги гидросистемы (A_4).	C_4	1. Проверить агрегаты на отсутствие трещин (u_4).	а. Соответствует ТТ (c_4),		-	
			б. Трещины на агрегатах, царапины глубиной $\geq 0,2$ мм ($c'_{4.1}$),		Агрегаты заменить ($u'_{4.1}$)	
			в. Царапины глубиной до 0,2 мм. ($c'_{4.2}$).		Устранить ($u'_{4.2}$).	
		2. Проверить крепление агрегатов и осмотреть контровку гаек крепления (u_5).	а. Соответствует ТТ (c_5),		-	
			б. Люфт в соединениях. (c'_5).		Подтянуть гайки крепления (u'_5)	
			а. Соответствует ТТ (c_6),		-	
		3. Проверить состояние трубопроводов (u_6).	б. Трещины ($c'_{6.1}$),		Заменить ($u'_{6.1}$).	
			в. Забоины $\geq 0,2$ мм. ($c'_{6.2}$),		Заменить ($u'_{6.2}$).	
			г. Эллипсность $\geq 0,1$ диаметра ($c'_{6.3}$),		Заменить ($u'_{6.3}$).	
д. Коррозия глубиной $\geq 0,1$ мм ($c'_{6.4}$),			Устранить ($u'_{6.4}$).			
е. Ослабление крепления трубопроводов ($c'_{6.5}$).			Закрепить ($u'_{6.5}$).			

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5
			ж. Зазор между трубопроводом и подвижными деталями $\geq 10\text{мм}$ ($c'_{6.6}$), з. Зазор между трубопроводом и неподвижными деталями $\geq 3\text{мм}$ ($c'_{6.7}$).	Отрегулировать зазор ($u'_{6.6}$). Отрегулировать зазор ($u'_{6.7}$).
5. Проверка правильности регулировки гидроупора системы управления (A_5).	C5	1. Отклонить ручку управления назад до касания роликом упора (u_7)	а. Соответствует ТТ (c_7) б. Отклонение тарелки автомата перекося не соответствует $2^\circ \pm 12'$ ($c'_{7.1}$).	- Отрегулировать ($u'_{7.1}$).
		2. Разъединить штепсельный разъём крана ГА-192 и переместить ручку управления назад (u_8),	а. Соответствует ТТ (c_8), б. Расстояние Б $\leq 0,5\text{ мм}$ ($c'_{8.1}$).	- Отрегулировать ($u'_{8.1}$).
6. Осмотрите рулевые агрегаты КАУ-ЗОБ и РА-60Б. (A_6).	C6	1. Проверить, нет ли ослабления контргаяк штоков рулевых агрегатов (u_9).	а. Соответствует ТТ (c_9), б. Слабое крепление ($c'_{9.1}$).	- Подтянуть ($u'_{9.1}$).
		2. Проверить контровку гаяк крепления шарнирных соединений (u_{10}).	а. Соответствует ТТ (c_{10}), б. Отсутствие контровки ($c'_{10.1}$), в. Разрушение шплинта ($c'_{10.2}$).	- Заменить ($u'_{10.1}$). Заменить ($u'_{10.2}$).
7. Осмотрите механизм гидроупора шасси (A_7).	C7	1. Проверить целостность пружины (u_{11}).	а. Соответствует ТТ (c_{11}), б. Трещина на пружине ($c'_{11.1}$).	- Заменить ($u'_{11.1}$).
		2. Проверить отсутствие деформации коромысла (u_{12}).	а. Соответствует ТТ (c_{12}), б. Деформация коромысла ($c'_{12.1}$).	- Заменить ($u'_{12.1}$).
		3. Проверить зазор между коромыслом и толкателем (u_{13}).	а. Соответствует ТТ (c_{13}), б. Зазор при полном обжатии стойки 1-1,5 мм. ($c'_{13.1}$).	- Отрегулировать ($u'_{13.1}$).
8. Оформление тех. документации (A_8).	C8	1. Запись в журнал о выполнении и контроле работ (u_{14}).	Готовность к полёту (c_{14}).	-

состояния процедуры ТО в общем виде определяется:

$$A_i(t+1) = A_i(t) + u_k(t) + \sum_{n=1}^m u'_{k,n}(t). \quad (17)$$

Завершению работ A_i ТО системы соответствует определённое состояние ФС в момент времени $C_i(t+1)$ определяемом как алгебраическую сумму начального состояния $C_i(t)$, состояния восстановления ($Ck'.m$) до заданного уровня надёжности, под действием входной управляющей величины $u'_{k,n}(t)$ системы процедур ОТО.

Уравнение состояния исследуемой системы при ОТО запишем:

$$C_i(t+1) = C_i(t) + \sum_{k=1}^m C_k(t) + \sum_{m=1}^m C'_{k,m}(t). \quad (18)$$

Используя переходную функцию состояния d [3], указывающую на то, что состояние системы в момент времени $(t+1)$ будет $d(C_i, u_k) \in C_{ГС}$, если состояние в момент времени (t) есть $C_i \in C_{ГС}$, а входной сигнал в момент времени (t) есть $u_k \in A_i$, в общем виде условие изменения состояния ФС в любой момент времени (t) , однозначно определяющее её новое состояние в момент времени $(t+1)$, можно записать:

$$d: C_{ГС} \times U_{A1} > C_{ГС}: (C_i, u_k) \mapsto d(C_i, u_k);$$

$$C_i \in C_{ГС}, u_k \in U_{A1}$$

или

$$C(t+1) = d(c(t), u(t)), \quad (19)$$

где d определяет переход системы в следующее состояние, т.е. описывает динамику системы в окрестности момента времени t .

Выполнение процедуры ОТО в виде операции управления $u_k \in U_{A1}$ предполагает наличие множества состояний $Ck \in C_{A_i}$, соответствующего ТТ, и множество состояний выходов

$Ck'.m \in C'_{A_i}$ не соответствующих ТТ, что требует выполнения операций восстановления работоспособности $u'_{k,n}$, следовательно, описание внутренней структуры исследуемой системы можно задать двумя функциями:

$$d: C_{A_i} \times U_{A1} \rightarrow C_{A_i},$$

$$b: C_{A_i} \rightarrow C'_{A_i}$$

или описать её внешнее управление, вводя функцию $f: U'_{A_i} > C'_{A_i}$ отображающую множество U'_{A_i} входных последовательностей воздействия операций восстановления $u'_{k,n} \in U'_{A_i}$ на множество C'_{A_i} выходных состояний системы $Ck'.m \in C'_{A_i}$.

Так как при выполнении процедуры А1 ОТО известно значение входного управляющего сигнала $u_k(t)$, но невозможно заранее определить последующее состояние системы $Ck(t)$, то исследуемую систему считаем недетерминированной, и переходную функцию для неё запишем в виде

$$d: C_{ГС} \times U_{A1} > 2^{C_{ГС}}$$

где $d(C_{ГС}, U_{A1}) \subset 2^{C_{ГС}}$ – множество возможных состояний, в которые недетерминированная система может перейти из состояния ГС при выполнении формы А1 ОТО (C_1) в состояние оформления документации (C_8) под воздействием управляющих процедур (A_i) [4].

Если

$$C_{ГС} = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8\},$$

то степенное множество есть

$$2^{C_{ГС}} = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_1, C_2, C_1, C_3, C_1, C_4, C_1, C_5, C_1, C_6, C_1, C_7, C_1, C_8, C_2, C_3, C_2, C_4, C_2, C_5, C_2, C_6, C_2, C_7, C_2, C_8, C_3, C_4, C_3, C_5, \dots, z_4\}$$

Для удобства, недетерминированную модель можно приближённо описать с помощью детерминированной модели, на которую накладыва-

ются случайные возмущения.

При выполнении процедур ТОиР часто возникает ситуация когда элемент ФС не соответствует требованиям ЕРТЭ. В этом случае появляется задержка между временем принятия решения об изменении заданного уровня состояния элемента и временем, когда это изменение произошло фактически, т.е. время проявления отказа носит случайный характер. Возникает ситуация принятия решения выполнения восстановительных работ в условиях неполной информации о необходимых параметрах и характеристиках элементов системы.

Так как для сложных технических систем недопустимо снижение качества функционирования, поэтому стратегия выбора сроков проведения процедур ТО выбирают таким образом, что бы на основе статистических данных об отказах, провести работы раньше, по срокам, чем наступит отказ, что ухудшает экономические показатели эксплуатации ЛА [5].

Для исключения случайного характера времени проявления отказа, неполностью определённые технологические процессы ТО моделируем введением понятия нечёткого множества [6], основанным на обобщении понятия функции множества.

Если Y – множество, то его нечёткое подмножество есть функция

$$\mu : Y \rightarrow [0, 1].$$

В этом случае, для количественной оценки состояния системы, введём безразмерный коэффициент α , учитывающий допуски на значения выходных параметров функциональных элементов ГС в виде интервалов числовой оси:

$$\alpha : R \rightarrow [0, 1].$$

Коэффициент α , представляем в виде множества действительных чисел параметров элементов системы в интервале $[0, 1]$ соответствующего требованиям работоспособности и надёжности. При выходе параметров какого-либо элемента за пределы интервала $[0, 1]$ элемент считаем неработоспособным и требуется его замена.

Тогда выражение (16) можно записать как:

$$Z_{\Gamma} = Z_0 + Z_{BC} + \alpha(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8) + Z_{OB} \quad (20)$$

или $\alpha : C_{ГС} > [0, 1]$.

Величину $d(c_k, u_k, c'_{k.m})$ рассматриваем как степень принадлежности состояния $c'_{k.m}$ образу пары (c_k, u_k) при отображении d .

Коэффициент λ , учитывающий психофизиологические возможности авиационного специалиста, качество организации ТО, эргономика обслуживаемой ФС и т.д. [7, 8, 9, 10, 11], представим в виде множества действительных чисел характеристик технологического процесса проце-

дур системы ТОиР в интервале $[0, 1]$ соответствующего требованиям работоспособности и надёжности.

Тогда выражение (13) можно записать как:

$$P_{OTO} = P_{BC} + \lambda (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8) + P_{OB}. \quad (21)$$

Следовательно, множество допустимых управлений U_{A1} определяется нечёткой функцией $\lambda : U_{A1} \rightarrow [0, 1]$.

Тогда динамику системы можно описать нечётким отношением

$$d : C_{ГС} \times U_{A1} \times C_{ГС} [0, 1],$$

представляющим собой нечёткое подмножество декартова произведения $C_{ГС} \times U_{A1} \times C_{ГС}$, где $C_{ГС}$ – множество состояний процедур ТО ГС формы А1, а U_{A1} – множество допустимых управлений (u_k) системы процедур обслуживания ГС формы А1 ОТО [12].

Решение уравнения состояния (18) можно представить как кривую траектории движения состояний системы или планом достижения состояния готовности ЛА к полёту.

На практике стремятся управлять планом с целью его сохранения в изменяющихся условиях.

Эффективность выполнения работ по ТОиР определяется объёмом и продолжительностью работ, численностью исполнителей, стоимостью ТО и т.д.

Используемые в настоящее время «жёсткие» стратегии ТО [5], базирующиеся на априорной информации о техническом состоянии, не меняют процесса обслуживания.

Стратегия ТО по состоянию [13, 14, 15] определяет объём и периодичность выполнения операций ТО в зависимости от фактического состояния системы.

Метод упреждающего (проактивного) технического обслуживания [16] основан на использовании технологии прогнозирующего анализа и предполагает раннее изменение технологии выполнения процедур ТО, не допускающего предотказового состояния эксплуатируемой системы.

Систему считаем управляемой, если можно выбрать переменные управления таким образом, чтобы обеспечивался переход системы из любого начального состояния C_1 в конечное C_8 по оптимальной траектории.

Для решения этой задачи, используем метод управления с прогнозированием, в котором предвосхищаются возмущения, воздействующие на выходные переменные, и вырабатываются компенсирующие изменения входных переменных [17].

Для этого используем уравнение состояния (15)

$$Z_{A1} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8, \text{ используя данные табл. 1, получим}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{A1} = & c_1 + c_2 + c'_2 + c_3 + c'_3 + c_4 + \\
 & + c'_{4.1} + c'_{4.2} + c_5 + c'_5 + c_6 + c'_{6.1} + \\
 & + c'_{6.2} + c'_{6.3} + c'_{6.4} + c'_{6.5} + c'_{6.6} + \\
 & + c'_{6.7} + c_7 + c'_7 + c_8 + c'_8 + c_9 + c'_9 + \\
 & + c_{10} + c'_{10.1} + c'_{10.2} + c_{11} + c'_{11} + \\
 & + c_{12} + c'_{12} + c_{13} + c'_{13} + c_{14}.
 \end{aligned} \quad (22)$$

Законом управления будем считать закон с обратной связью, с помощью которой систему стремятся сделать менее чувствительной к изменению параметров за счёт использования текущей информации, чтобы удержать переменные состояния вблизи заданных значений.

Выберем оптимальную траекторию движения системы, соответствующую минимальному времени подготовки ЛА к полёту, т.е. когда состояние всех элементов ГС соответствует ТТ и не требуется выполнение дополнительных операций по восстановлению работоспособности агрегатов.

$$\begin{aligned}
 Z_{A1}^{opt.} = & c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + \\
 & + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11} + c_{12} + c_{13} + c_{14}
 \end{aligned} \quad (23)$$

Особое внимание современной теории управления уделяется проектированию регуляторов с обратной связью, предписывающих значения управляющих входных воздействий решающего элемента (процедуры восстановления работоспособности агрегата) в зависимости от измеренного отклонения от заданной траектории, значение отклонения является основой для перехода на новую форму обслуживания – упреждающего обслуживания.

В качестве примера управления с прогнозированием рассмотрим процедуру A_2 «Проверьте, нет ли течи из агрегатов, шлангов и трубопроводов гидравлической системы».

Оптимальное уравнение работ по оценке состояния процедуры A_2 ТО следующее:

$$A_2 = u_2. \quad (24)$$

В случае негерметичности соединений, состояние c'_2 необходимо устранить неисправность путём выполнения дополнительной работы u'_2 .

Тогда уравнение (24) примет вид:

$$A_2 = u_2 + u'_2. \quad (25)$$

Вычитая уравнение 24 из 25, имеем

$$\Delta u = u'_2 \quad (26)$$

т.е. корректирующее воздействие на систему возвращения её состояния c'_2 в соответствующее ТТ C_2 заключается в выполнении работы u'_2 .

Таким образом, состояние системы, зависящее от внешних факторов воздействия окружающей среды, управляется решающим элементом в виде выполнения дополнительных работ ЕРТЭ ЛА.

При управлении с обратной связью берём множество входов операций управления $u_k \in U_{A1}$ системы, множество её выходов состояний $C_k \in C_k$ и $C'_{k.m} \in C'_k$, причём состояние $C'_{k.m}$ предполагает выполнение работ восстановления $u'_{k.n}$, служащих входом операции управления решающего элемента. Тогда функция

$$f: U'_{A1} \times C'_k > Z$$

и состояние системы $z(t)$ в момент времени (t) определяется входом системы управления $u'_{k}(t)$ и выхода $C_k(t)$ с помощью уравнения

$$z(t) = f(u'_{k}(t), C_k(t)),$$

т.е. состояние системы $C'_{k.m}$ в результате проведения операции восстановления $u'_{k} \in U'_{A1}$ достигает состояния C_k соответствия ТТ.

Тогда систему можно описать уравнениями

$$C_i(t+1) = C_i(t) + C_k(t) + \sum_{m=1} C'_{k.m}(t)$$

$$C_k(t+1) = H C'_{k.m}(t)$$

Система и решающий элемент образуют контур, пространство состояний $C_i \in C_{A1}$ ОТО гидравлической системы определяется суммой состояний

$$C_{A1} = C_k \oplus C'_k$$

$$C_i = \begin{bmatrix} C_k \\ C'_{k.m} \end{bmatrix} \in C_{A1}$$

Следовательно, основу системы процедур ТОиР составляет пара (C, A) , где C – пространство состояний, и $A: C \rightarrow C$ – линейное преобразование, описывающее изменение состояния системы под воздействием одиночного входного сигнала. Дополнительные состояния $C'_{k.m}$ системы описываются входным отображением $B: U \rightarrow C$.

Если система находится в начальном состоянии C_i , и на вход поступает управляющее воздействие u_k , то состояние системы в момент времени $(t+1)$ описывается равенством

$$c(u) = \sum_{n=1} A^n B u_k(n),$$

т.е. состояние $c(u)$ достигается из начального состояния с помощью входной последовательности операций управления $u_k(n)$.

Отображение $c: U_{A1} > C_{A1}: u$

$\mapsto \sum_{n=1} A^n B u_k(n)$ является отображением достижимости для пары (A, B) .

тижимости для пары (A, B) .

Диаграмма динамики контура системы перехода состояния C_i в состояние C_k представлена на рис. 2.

Выведем выражение траектории изменения состояния системы $c(t)$ при любом $t > 0$ в виде суммы начального состояния системы C_1 и теку-

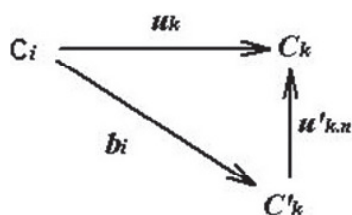


Рис. 2. Пример диаграммы контура регулятора: C_i – множество состояний регулятора, C_k – множество состояний системы, соответствующих ТТ, U_k – множество операций управления состоянием элементов системы, $C_{k,m}$ – множество состояний не соответствия ТТ, $U_{k,n}$ – множество операций восстановления системы, b_i – множества дополнительных отображений операций управления состоянием элементов системы.

щего состояния C_k билинейной системы, соответствующего C и C' (состояния требующего выполнения работ восстановления u') на интервале времени $[0, t - 1]$.

В результате анализа данных таблицы 1, можно записать систему уравнений состояний процедуры А1 ОТО:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= c_1, \\
 C_2 &= C_1 + c_2 + c'_2, \\
 C_3 &= C_2 + c_3 + c'_3, \\
 C_4 &= C_3 + c_4 + c'_{4.1} + c'_{4.2} + c_5 + c'_5 + c_6 + c'_{6.1} + \\
 &+ c'_{6.2} + c'_{6.3} + c'_{6.4} + c'_{6.5} + c'_{6.6} + c'_{6.7}, \\
 C_5 &= C_4 + c_7 + c'_7 + c_8 + c'_8, \\
 C_6 &= C_5 + c_9 + c'_9 + c_{10} + c'_{10.1} + c'_{10.2}, \\
 C_7 &= C_6 + c_{11} + c'_{11} + c_{12} + c'_{12} + c_{13} + c'_{13}, \\
 C_8 &= C_7 + c_{14}.
 \end{aligned}$$

A =

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14
C1	1													
C2		1												
C3			1											
C4				1	1	1								
C5							1	1						
C6									1	1				
C7											1	1	1	
C8														1

B =

	c'2	c'3	c'4.1	c'4.2	c'5	c'6.1	c'6.3	c'6.4	c'6.5	c'6.6	c'6.7	c'7	c'8	c'9	c'10.1	c'10.2	c'11	c'12	c'13	c'14
C1																				
C2	1																			
C3		1																		
C4			1	1	1	1	1	1	1	1	1									
C5												1	1							
C6														1	1	1				
C7																	1	1	1	
C8																				1

Рис. 3. Вид матриц A и B

Следовательно, для любого $t > 0$ уравнение состояния элементов ГС процедуры формы А1 ОТО в векторно-матричной форме примет вид

$$C_{ГС} = A C_i + B C_k'$$

где A и B – матрицы соответственно размеров $i \times k$ и $i \times m$, вид матриц показан на рис. 3.

Таким образом, множество состояний, достижимых из нулевого состояния $C_{ГС}$ можно выразить множеством линейных преобразований

$$Q = [C_1 B, C_2 B, \dots, B]: U_{A1} > C_{A1}. \quad (27)$$

Управление процедурами ТО, определяющее последовательность выполнения операций ТО, основывается на принятии решения о состоянии системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новожилов Г.В. Безопасность полёта самолета. Концепция и технология. М.: Машиностроение, 2003. 144 с.
- Регламент ТО вертолёта Ми-8. Часть 1. Планер и силовая установка. М.: Воздушный транспорт, 1993. 120 с.
- Дружинин Г.В. Процессы технического обслуживания автоматизированных систем. М.: Энергия, 1973. 272 с.
- Асаи К. Прикладные нечёткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.
- Барзилович Е.Ю. Организация обслуживания при ограничении информации о надёжности системы. М.: Советское радио, 1975. 136 с.
- Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
- Аруин А.С. Эргономическая биомеханика. М.: Машиностроение, 1989. 251 с.
- Основы профессионального отбора военных специ-

- алистов [под ред. В.И. Пухова]. М.: МО СССР, 1981. 254с.
9. *Цибулевский И.Е.* Ошибочная реакция человека – оператора. М.: Сов. радио, 1979. 208 с.
 10. *Денисов В.Г.* Авиационная инженерная психология. М.: Машиностроение, 1983. 232 с.
 11. *Николаев В.И.* Информационная теория контроля и управления. Л.: Судостроение, 1973. 186с.
 12. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. СПб.: БХВ – Петербург, 2005. 416 с.
 13. *Волков Л.И.* Управление эксплуатацией летательных комплексов. Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1981. 368 с.
 14. *Барзилович Е.Ю.* Эксплуатация авиационных систем по состоянию. М.: Транспорт, 1981. 197 с.
 15. *Новиков В.С.* Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования. М.: Транспорт, 1987. 261 с.
 16. *Чекрижев Н.В., Коптев А.Н.* Перспективы развития методов технического обслуживания сложных систем бортового комплекса оборудования // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева (национального исследовательского университета). 2012. №1 (32). С. 55 – 63.
 17. *Cristensen J.L., Drogan W.L.* Modelling and optimal of a production process // Int. J. of systems science, 1971, v.1, №3, pp. 247-255.

PERFECTION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF TECHNICAL MAINTENANCE OF FUNCTIONAL SYSTEMS OF FLIGHT VEHICLES

© 2013 A.N. Koptev, N.V. Chekrizhev

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

We developed the algorithm of technological process creation for technical maintenance of complex equipment for control of its condition inside the modern trends of forwards service, based on the decision making with taking into account the current system condition.

Key words: technological process of technical maintenance, operative service, hydraulic system, trend of parameters.