АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 5 1970

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

Г. П. ШИБАНОВ
(Москва)

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНО СВЯЗАННЫХ С НИМИ СИСТЕМ

В основу составления циклограмм проверки объектов контроля одинакового назначения (например, авиадвигателей и функционально связанных с ними систем различных конструкций) могут быть положены некоторые общие принципы, позволяющие сформулировать методику контроля для целого класса однотипных объектов. Применительно к контролю работоспособности авиадвигателей и функционально связанных с ними систем такими общими принципами являются следующие:

1) проверка производится в динамическом режиме в соответствии с графиком опробования и соблюдения наперед заданной очередности режимов без фиксации их во времени с возможностью пропуска или повторения отдельных режимов;

2) контроль параметров на μ-м режиме осуществляется только в том случае, если произведена проверка всех параметров на $(\mu-1)$-м режиме;

3) измерение параметров в μ-м режиме производится только после окончания переходных процессов, имевших место при переходе объекта контроля с $(\mu-1)$-го на μ-й режим его работы, и только в том случае, если основной определяющий параметр при выходе объекта контроля на μ-й режим достиг определенной наперед заданной для данного режима величины;

4) в период протекания переходных процессов измерение параметров производится лишь в точках экстремумов значений основного определяющего параметра с фиксацией времени протекания переходных процессов и определением того, «в допуске» или «не в допуске» находится проверяемый параметр и зафиксированный временной интервал;

5) при приходе от объекта контроля сигналов, время появления которых точно не известно, а известен лишь интервал времени, в течение которого они могут появиться, прекращается любой из режимов работы системы автоматического контроля (САК), производится допусковый контроль предусмотренных программой параметров и восстанавливается прерванный ранее режим; при этом одновременно с проведением допускового контроля параметров фиксируется время прихода указанных выше сигналов;

6) группа аварийных параметров контролируется непрерывно в течение всего периода контроля.

Рассматривая перечисленные принципы с точки зрения булевой алгебры и алгебры событий и состояний, попытаемся сформулировать эти принципы применительно к их реализации с помощью САК, построенной на базе дискретной техники. Для этого введем понятия «события» и «состояние». Причем, если имеют место какие-либо два условия, одно из которых существует в течение времени Δt_1, а другое — Δt_2 и $\Delta t_1 \gg \Delta t_2$, то первое условие будем называть состоянием, а второе — событием. К событиям могут быть отнесены все командные и управляющие сигналы, по которым производится запуск проверяемых объектов и САК, переход с одних режимов работы на другие, прерывание и восстановление режимов и т. д., а к состояниям — режимы работы САК или объектов контроля. Обозначим все события, которыми мы будем оперировать, строчными латинскими буквами*, а состояния — буквами греческого алфавита и для удобства пользования сведем их в таблицу.

Условное обозначение и наименование состояния (события)	Состояние (состояния) САК ,..
η — „ожидание"	Заключающееся в выдержке времени, необходимого для пропуска переходных процессов.
δ_1 и δ_2 — „поиск по x_1 и x_2"	При которых производится периодическое измерение и анализ приращений величин параметров x_1 и x_2 с целью определения экстремальных значений переходных процессов и выработки управляющих команд, позволяющих осуществить автоматическую привязку работы САК к графику опробования проверяемого авиадвигателя и действиям оператора.
θ_1 и θ_2 — „опрос по x_1 и x_2"	При которых для определения режима работы авиадвигателя производится периодическое измерение параметров x_1 и x_2 до момента достижения ими наперед заданных значений.
π — „измерение параметров"	При котором производится измерение и допусковый контроль параметров на установившихся режимах работы объекта контроля или в экстремальных точках исследуемых переходных процессов.
λ — „внеочередное измерение параметров"	Соответствующее режиму ее работы, при котором из объекта контроля поступает приоритетный сигнал, прекращающий предыдущий режим.
τ — „измерение времени"	При котором производится допусковый контроль временных интервалов и времени протекания переходных процессов, фиксация моментов появления различных сигналов, поступающих из автоматики объекта контроля в период проведения проверки его работоспособности и выработка временных команд управления САК (состояние τ существует одновременно с состояниями η, θ_1, θ_2, δ_1, δ_2, π и λ).

Весь процесс автоматизированного контроля работоспособности авиадвигателей и связанных с ними систем в динамическом режиме в наземных условиях может быть представлен как соответствующее чередование приведенных в таблице событий и состояний, укладывающихся по времени в период опробования авиадвигателя. Причем в соответствии с

* Исключение составляют события, состоящие в появлении управляющих сигналов значение которых дано в [1]. Эти события обозначаются через A_i, где $i=1, 2, \ldots, 9$.

	События, состоящие в...
a — «запуск проверяемого авиадвигателя»	Появлении сигнала от кнопки запуска авиадвигателя и приходе его в пусковую панель (коробку).
b — «сигналы электроавтоматики запуска»	Появлении сигналов от электроавтоматики проверяемого авиадвигателя в период его запуска (от момента нажатия кнопки запуска до выхода двигателя на режим «малый газ»).
c — „конец поиска по x_1"	Появлении из системы управления сигнала, по которому вырабатывается команда, прекращающая состояние δ_1 САК.
d — „конец опроса по x_1"	Появлении (в момент достижения параметром x_1 наперед заданного значения) управляющего сигнала, по которому прекращается состояние θ_1 САК.
e — „конец ожидания"	Появлении команд, по которым в определенные моменты времени прекращается состояние η САК и осуществляется ее переход в другие состояния (θ_1, π, δ_2).
h — „конец измерения параметров"	Формировании сигнала, по которому прекращается состояние π САК и переход ее к одному из состояний η, θ_1, δ_1 или δ_2.
j — „приоритетный сигнал"	Приходе из объекта контроля сигнала, время появления которого точно неизвестно, а известен лишь интервал времени (Δt_j), в течение которого этот сигнал может появиться.
q — „конец измерения времени"	Появлении сигнала, по которому прекращается измерение и допусковый контроль временных интервалов.
k — „экстремум"	Появлении экстремума в анализируемом переходном процессе основного определяющего параметра, по которому ведется поиск.
l — „срабатывание топливной автоматики"	Появлении сигналов срабатывания автоматики топливной системы на режимах проверки времени запаздывания.
r — „конец опроса по x_2"	Появлении управляющего сигнала, по которому прекращается состояние θ_2.
v — „начало переходного процесса"	Появлении переходного процесса.
w — „конец переходного процесса"	Окончании переходного процесса.
A_7	Переходе кривой основного определяющего параметра от горизонтального участка к наклонному, на котором данный параметр получает положительные приращения.

приведенными выше принципами каждое из состояний может быть выражено через другие состояния и события и записано в виде соответствующих логических зависимостей, позволяющих достаточно просто осуществить программирование работы САК в соответствии с графиком опробования проверяемого авиадвигателя.

Применительно к турбореактивным двигателям, для которых в качестве основных определяющих параметров могут быть взяты всего 2 параметра, состояния η, θ_1, θ_2, δ_1, δ_2, π, τ можно представить через начинающие и заканчивающие их события в виде логических зависимостей:

$$\eta = (ab + d\,\bar{\pi}\,\bar{\delta}_1\,\bar{\delta}_2 + h\,\bar{\theta}_1\,\bar{\delta}_1 + c\,\bar{\theta}_1\,\bar{\pi})\,(\bar{e}\,\bar{j}); \tag{1}$$

$$\theta_1 = (e\,\bar{\pi} + h\,\bar{\eta}\,\bar{\delta}_1 + c\,\bar{\eta}\,\bar{\pi} + r)\,(\bar{d}\,\bar{j}); \tag{2}$$

$$\theta_2 = (A\,\delta_2\,A_7)\,(\bar{j}\,\bar{r}), \tag{3}$$

где A — оператор «после», означающий, что некоторое состояние (в данном случае δ_2) имело место до данного момента времени и что в данный момент оно прекратилось, а A_7 — событие, состоящее в появлении управляющего сигнала, значение которого дано в [1].

Учитывая, что, согласно [2], оператор A может быть выражен через операторы H («происходить»), N(«не») в виде

$$A\delta_2 = H\delta_2 N\delta_2 \tag{4}$$

и что, согласно [1],

$$A_7 = \bar{\alpha}_{\text{вел1}}\,\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\,\bar{\alpha}_{\text{вел2}}\,\bar{\alpha}_{\text{зн2}}, \tag{5}$$

получим, подставив (4) и (5) в (3):

$$\theta_2 = [(H\,\delta_2\,N\,\delta_2)\,(\bar{\alpha}_{\text{вел1}}\,\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\,\alpha_{\text{вел2}}\,\alpha_{\text{зн2}})]\,(\bar{j}\,\bar{r}); \tag{6}$$

$$\delta_2 = (h\,\bar{\eta}\,\bar{\theta}_1\,\bar{\delta}_1 + d\,\bar{\delta}_1\,\bar{\eta}\,\bar{\pi})\,(\bar{j} + A_7), \tag{7}$$

или после очевидных преобразований выражения (7) и подстановки в него выражения (5):

$$\delta_2 = (h\,\bar{\theta}_1 + d\,\bar{\pi})\,[\bar{j} + (\bar{\alpha}_{\text{вел1}}\,\bar{\alpha}_{\text{зн1}}\,\alpha_{\text{вел2}}\,\alpha_{\text{зн2}})]\,\bar{\delta}_1\,\bar{\eta}. \tag{8}$$

Условия перехода САК в состояния δ_1, τ и π и ее пребывания в этих состояниях могут быть описаны зависимостями:

$$\delta_1 = (h\,\bar{\eta}\,\bar{\theta}_1\,\bar{\delta}_2 + d\,\bar{\eta}\,\bar{\pi}\,\bar{\delta}_2 + q\,\bar{\eta})\,(\bar{j}\,\bar{c}) = [q + \bar{\delta}_2\,(h\,\bar{\theta}_1 + d\,\bar{\pi})]\,\bar{\eta}\,(\bar{j}\,\bar{c}); \tag{9}$$

$$\tau = (d + e + l + b)\,\bar{q}; \tag{10}$$

$$\pi = (e\,\bar{\theta}_1 + d\,\bar{q}\,\bar{\eta}\,\bar{\delta}_1\,\bar{\delta}_2 + c\,\bar{\eta}\,\bar{\theta}_1 + k)\,\bar{h}\,\bar{j}. \tag{11}$$

Остановимся на некоторых наиболее важных особенностях реализации приведенных логических зависимостей и рассмотрим зависимости, реализуемые при переходе САК в состояние λ.

В периоды времени, соответствующие пребыванию САК в состояниях δ_1 или δ_2, возможны случаи пропуска отдельных режимов работы объекта контроля. Причем в САК должна быть предусмотрена возможность пропуска как одного, так и нескольких режимов одновременно. Пропуск же одного, двух или n режимов работы объекта контроля представляет собой переход от $(\mu-1)$-го к $(\mu+1)$-му режиму, минуя μ-й режим, или переход к $(\mu+2)$-му режиму, минуя μ-й и $(\mu+1)$-й режимы, или, наконец, переход к $(\mu+n)$-му режиму, минуя все режимы от μ-го до $\mu+(n-1)$-го.

Пусть $(\mu-1)$-й режим есть режим, предшествующий моменту, начиная с которого оператор по тем или иным причинам может проводить опробование либо на μ-м, либо на $(\mu+n)$-м режиме, минуя все режимы от μ-го до $[\mu+(n-1)]$-го. Тогда переход САК на режимы работы, соответствующие μ-му, либо $(\mu+n)$-му режимам работы объекта контроля может быть представлен как некоторое событие g через двоичные функции p_μ и $p_{\mu+n}$* истинности μ-го и $(\mu+n)$-го режимов в следующем виде

$$g = p_\mu + p_{\mu+n}. \tag{12}$$

Анализ процесса перехода объекта контроля с $(\mu-1)$-го на μ-й или $(\mu+n)$-й режимы работы, проведенный на примере турбовинтового и двухроторного турбореактивного авиадвигателей, показывает, что такого рода переход сопровождается появлением событий A_7 либо A_6 [1]. Причем

$$p_\mu = \bar{p}_{\mu-1} A_7; \tag{13}$$

$$p_{\mu+n} = \bar{p}_{\mu-1} A_6, \tag{14}$$

где p — двоичная функция истинности $(\mu-1)$-го режима, равная «1», когда имеет место $(\mu-1)$-й режим, и «0» при наличии любых других режимов работы объекта контроля. Подставляя (13) и (14) в (12), найдем

$$g = \bar{p}_{\mu-1} A_7 + \bar{p}_{\mu-1} A_6. \tag{15}$$

Или, учитывая, что, согласно дистрибутивному закону булевой алгебры,

$$\bar{p}_{\mu-1} A_7 + \bar{p}_{\mu-1} A_6 = \bar{p}_{\mu-1} (A_7 + A_6),$$

запишем выражение (15) так:

$$g = \bar{p}_{\mu-1} (A_7 + A_6). \tag{16}$$

Учитывая далее, что $A_7 = \bar{\alpha}_{\text{вел1}} \bar{\alpha}_{\text{зн1}} \alpha_{\text{вел2}} \alpha_{\text{зн2}}$ и $A_6 = \alpha_{\text{вел1}} \bar{\alpha}_{\text{зн1}} \alpha_{\text{вел2}} \bar{\alpha}_{\text{зн2}}$, окончательно получим

$$g = \bar{p}_{\mu-1} \left(\bar{\alpha}_{\text{вел1}} \bar{\alpha}_{\text{зн1}} \alpha_{\text{вел2}} \alpha_{\text{зн2}} + \bar{\alpha}_{\text{вел1}} \bar{\alpha}_{\text{зн1}} \alpha_{\text{вел2}} \bar{\alpha}_{\text{зн2}}\right). \tag{17}$$

При переходе от одного режима работы объекта контроля к другому на некотором достаточно малом интервале времени $\Delta t = m$, представляющем собой минимальное время переходного процесса, которое может быть зафиксировано САК, нельзя сказать, что μ-й режим работы объекта контроля закончился и, вместе с тем, что следующий за ним $(\mu+1)$-й режим еще не начался. Приход объекта контроля в состояние, соответствующее $(\mu+1)$-му режиму его работы, с учетом данной особенности может быть определен оператором E («приход») через операторы N («не») и D («задержка»):

$$E\, p_{\mu+1} = p_{\mu+1}\, N\, D^m\, p_{\mu+1} \; (p_{\mu+1}, \text{ но еще не } D^m p_{\mu+1}), \tag{18}$$

а «уход» из состояния, соответствующего μ-му режиму, оператором L («уход»):

$$L\, p_\mu = N\, p_\mu\, D^m\, p_\mu \; (\text{не } p_\mu, \text{ но еще } D^m p_\mu). \tag{19}$$

Тогда переход объекта контроля из одного состояния в другое может быть определен как «уход» из первого состояния, соответствующего μ-му режиму его работы, и приход во второе состояние, соответствующее $(\mu+1)$-му режиму, т. е. это событие может быть описано выражением

$$C(p_\mu, p_{\mu+1}) = L\, p_\mu\, E\, p_{\mu+1} = (N\, p_\mu\, D^m\, p_\mu)(p_{\mu+1}\, N\, D^m\, p_{\mu+1}). \tag{20}$$

---

* Функции p_μ и $p_{\mu+n}$ принимают значения «1», если в момент перехода объекта контроля с $(\mu-1)$-го режима имеем соответственно μ-й и $(\mu+n)$-й режимы и значение «0» во всех остальных случаях.

Одной из основных задач, решаемых САК в процессе «поиска» по одному из определяющих параметров, является установление факта наличия переходного процесса и фактов наличия экстремумов в переходном процессе.

Если обозначить через $S(v, w)$ двоичную функцию наличия переходного процесса, принимающую значение «1» при $v=1$ и «0» при $w=1$, то задача установления факта наличия переходного процесса будет сведена к отысканию значений функции $S(v, w)$. Последняя же может быть выражена через операторы «не» (N) и «задержка» (D) [2] в виде

$$S\,(v,\ w) = N\,w\,[v + D^m\,S\,(v,\ w)]. \tag{21}$$

«Приход» основного определяющего параметра, по которому ведется «поиск», к эстремальному значению можно выразить как

$$E\,k = k\,N D^m_k. \tag{22}$$

Появление же самого события k возможно тогда и только тогда когда имеет место переходный процесс $[S(v, w)=1]$ и одновременно с этим произошло событие A_8 или A_9 [1], причем если произошло событие A_8, то имеет место min, а если A_9, то max. Обозначив соответственно через k_1 и k_2 события, состоящие в появлении min и max в анализируемом переходном процессе, можно записать:

$$k_1 = [S(v,\ w)]\,A_8; \tag{23}$$

$$k_2 = [S(v,\ w)]\,A_9. \tag{24}$$

Или, подставляя в (23) и (24) значение $S(v, w)$ из (21) и учитывая, что, согласно [1], $A_8 = \alpha_{\text{вел}1}\,\alpha_{\text{зн}1}\,\alpha_{\text{вел}2}\,\bar{\alpha}_{\text{зн}2}$ и $A_9 = \alpha_{\text{вел}1}\,\bar{\alpha}_{\text{зн}1}\,\alpha_{\text{вел}2}\,\alpha_{\text{зн}2}$, получим

$$k_1 = \{\bar{w} + [v + D^m\,S\,(v,\ w)]\}\,\alpha_{\text{вел}1}\,\alpha_{\text{зн}1}\,\alpha_{\text{вел}2}\,\bar{\alpha}_{\text{зн}2}; \tag{25}$$

$$k_2 = \{\overline{w}\,[v + D^m\,S\,(v,\ w)]\}\,\alpha_{\text{вел}1}\,\bar{\alpha}_{\text{зн}1}\,\alpha_{\text{вел}2}\,\alpha_{\text{зн}2}. \tag{26}$$

Для описания состояния λ САК введем, кроме упоминавшихся ранее операторов E («приход»), L («уход»), A («после»), N («не») и H («происходить»), операторы F_j и V^t. Под оператором F_j («допусковый контроль параметров по приоритетному сигналу») будем понимать оператор, означающий, что после прихода из объекта контроля приоритетного сигнала и прерывания существовавшего до его прихода состояния САК производится измерение и допусковый контроль некоторой предусмотренной программой группы параметров $(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \ldots, x_{\nu\mu})$, соответствующей μ-му режиму работы объекта контроля, а под оператором V^t — оператор появления приоритетного сигнала на некотором интервале времени t.

Если обозначить через $Z(j)$ двоичную функцию, которая может принимать значение «1» в любой из моментов времени, лежащий в пределах временного интервала $\Delta\,t_j$, всего один раз, соответствующий приходу приоритетного сигнала, т. е. соответствующий истинности события j, то можно записать

$$Z\,(j) = V^{\Delta t_j}\,(j). \tag{27}$$

Обозначим далее через $C(P, \lambda)$ двоичную функцию перехода САК из некоторого ее состояния P, существовавшего до прихода от объекта контроля приоритетного сигнала, в состояние λ, а через $C(\lambda, P)$ — двоичную функцию восстановления ранее прерванного состояния P и учтем то обстоятельство, что переход от состояния λ к состоянию P осуществяется только после окончания контроля параметра $x_{\nu\mu}$, т. е. параметра, последнего в данной группе параметров, подлежащих контролю на μ-м режиме работы объекта контроля, при котором поступил приоритетный сигнал. Тогда, согласно приведенному выше определению состояния λ, приход САК в это состояние, пребывание в нем и выход из него могут быть описаны некоторой двоичной функцией

$$\Lambda = V^{\Delta t_j}(j)\, C(P, \lambda)\, F_j(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \ldots, x_{\nu\mu})\, A\,[F_j(x_{\nu\mu})]\, H\,[C(\lambda, P)]. \quad (28)$$

Если под m понимать промежуток времени, достаточный для перехода САК из состояния P в состояние λ, или наоборот, то входящие в (28) функции $C(P, \lambda)$ и $C(\lambda, P)$ могут быть выражены через операторы E («приход») и L («уход») зависимостями, аналогичными (20), т. е.

$$C(P, \lambda) = L\,P\,E\,\lambda = (N\,P\,D^m\,P)\,(\lambda\,N\,D^m\,\lambda); \quad (29)$$

$$C(\lambda, P) = L\,\lambda\,E\,P = (N\lambda\,D^m\,\lambda)\,(P\,N\,D^m\,P), \quad (30)$$

а оператор $H\,[C(\lambda, P)]$ может быть представлен

$$H\,[C(\lambda, P)] = C(\lambda, P) + D^m\,H\,[C(\lambda, P)] = (L\,\lambda\,E\,P)\,[D^m H(L\,\lambda\,E\,P) = \\ = (N\lambda\,D^m\,\lambda)\,(P\,N\,D^m\,P) + D^m\,H\,[(N\lambda\,D^m\,\lambda)\,(P\,N\,D^m\,P)]. \quad (31)$$

Считая, что измерение и допусковый контроль каждого параметра из группы параметров $(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \ldots, x_{\nu\mu})$ занимает одно и то же время Δt, причем такое, что $\Delta t \leqslant m_1$, можем записать

$$F_j(x_{1\mu}, x_{2\mu}, \ldots, x_{\nu\mu}) = D^{m_1}\,x_{1\mu}\,D^{m_1}\,x_{2\mu}\,\ldots\,D^{m_1}\,x_{\nu\mu}. \quad (32)$$

Наконец, оператор $A\,[F(x_{\nu\mu})]$ может быть дан в виде выражения, аналогичного (4):

$$A\,[F_j(x_{\nu\mu})] = H\,F_j(x_{\nu\mu})\,N\,F_j(x_{\nu\mu}). \quad (33)$$

Подставляя (29)—(33) в (28), получим:

$$\Lambda = V^{\Delta t_j}(j) = [(N\,P\,D^m\,P)\,(\lambda\,N\,D^m\,\lambda)]\,(D^{m_1}\,x_{1\mu}\,D^{m_1}\,x_{2\mu}\,\ldots\,D^{m_1}\,x_{\nu\mu}) \times \\ \times [H\,F_j(x_{\nu\mu})\,N\,F_j(x_{\nu\mu})]\,\{[(N\,\lambda\,D^m\,\lambda)\,(P\,N\,D^m\,P)] + D^m\,H \times \\ \times [(N\lambda D^m\,\lambda)\,(P\,N\,D^m\,P)]\}. \quad (34)$$

Ввиду специфичности задачи, решаемой при реализации зависимости (34) в составе САК должна быть предусмотрена специальная приоритетная схема, которая выполняла бы весь цикл операций, связанных с приходом из объекта контроля приоритетных сигналов.

Полученный алгоритм [зависимости (1), (2), (6), (8)—(11), (17), (20), (25), (26), (34)] устанавливает связь между отдельными состояниями САК и режимами работы объекта контроля и может быть использован для автоматической привязки состояний САК к циклограмме проверки работоспособности различных типов авиадвигателей и функционально связанных с ними систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Шибанов, В. А. Киселев. Распознавание формы кривой с выработкой командных сигналов управления.— Вычислительная техника в машиностроении. Минск, ИТК АН БССР, 1968.
2. Э. Беркли. Символическая логика и разумные машины. М., Изд-во иностр. лит., 1961.

Поступила в редакцию 9 декабря 1969 г., окончательный вариант — 8 января 1970 г.