

**АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ****Д.Ю.Коновалов, К.П.Масюков, А.А.Семенов****ALGORITHM FOR ASSESSMENT AND FORECASTING OF FUNCTIONAL
READINESS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT****D.Yu.Konovalov, K.P.Masyukov, A.A.Semenov***Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург, vka@mil.ru*

Существующая система поддержания функциональной готовности радиоэлектронных средств (РЭС), которая сформировалась на основе практического опыта целевого применения радиотехнических средств и современных поправок к ней, тем не менее, не в полной мере соответствует современным требованиям к практическому использованию и уровню сложности имеющейся и разрабатываемой техники. Это несоответствие состоит в том, что, с одной стороны, наносится значительный ущерб готовности из-за длительных простоев РЭС на регламентах, а с другой стороны, незначительным оказывается выигрыш в безотказности, получаемый за счет проведения потребных мероприятий. В связи с тем, что полная информация о безотказности элементов РЭС никогда неизвестна, а также с тем, что реальная безотказность в процессе целевого применения РЭС изменяется под воздействием внешних факторов, целесообразно использовать гибкую адаптивную систему обработки технической информации и функциональности (СОТИФ), которая позволит «подстраивать» объем и периодичность профилактик с учетом текущей информации о безотказности РЭС. Представляется, что адаптивный подход к организации управления является наиболее приемлемым для подавляющего количества образцов РЭС. Его можно рассматривать как обобщение подхода «управление по состоянию». В соответствии с этим в статье предложен алгоритм наращивания автоматизированных систем оценки функциональной готовности за счет включения в число решаемых ими задач прогнозирования функционального состояния РЭС и расчетов оптимальных сроков и объемов проведения управляющих воздействий.

Ключевые слова: *система обработки технической информации, радиоэлектронные средства, функциональная готовность, система обработки технической информации и функциональности*

Для цитирования: *Коновалов Д.Ю., Масюков К.П., Семенов А.А. Алгоритм оптимизации системы оценки и прогнозирования функциональной готовности радиоэлектронных средств // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.60-65. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).60-65](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).60-65)*

The existing system for maintaining the functional readiness of radio electronic equipment (REE), which was formed on the basis of practical experience in the targeted use of radio equipment and modern amendments to it, nevertheless, does not fully comply with modern requirements for practical use and the level of complexity of existing and developed equipment. This discrepancy lies in the fact that, on the one hand, significant damage is inflicted on readiness due to prolonged downtime of the REE on the regulations, and, on the other hand, the gain in reliability is insignificant due to the required measures. Due to the fact that complete information about the reliability of electronic equipment elements is never known, as well as the fact that the real reliability in the process of targeted use of electronic equipment changes under the influence of external factors, it is advisable to use a flexible adaptive system for processing technical information and functionality (PTIF), which will allow "adjust" the volume and frequency of preventive maintenance taking into account the current information on the reliability of the REE. It seems that an adaptive approach to the management organization is the most acceptable for the overwhelming number of REE samples. It can be seen as a generalization of the state-based control approach. In accordance with this, the article proposes an algorithm for increasing automated systems for assessing functional readiness by including the tasks of predicting the functional state of REE and calculating the optimal timing and volume of control actions.

Keywords: *system for processing technical information, radio electronic means, functional readiness, system for processing technical information and functionality*

For citation: *Konovalov D.Yu., Masyukov K.P., Semenov A.A. Algorithm for assessment and forecasting of functional readiness of radio electronic equipment // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.60-65. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).60-65](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).60-65)*

Введение

Обработка технической информации о функциональности является одной из важнейших составляющих процесса целевого применения, необходимой для поддержания требуемого уровня безотказности РЭС. Как известно, в соответствии с требованиями эксплуатационной эффективности РЭС для обес-

печения постоянной готовности и решения задачи продления ресурса или срока службы вследствие физического (материального) износа, который определяет долговечность в процессе целевого применения, необходима организация и проведение комплекса операций по поддержанию функциональности или исправности РЭС при подготовке и использованию по назначению. Этот комплекс операций заключается

в проведении совокупностей профилактических операций, улучшающих функциональную готовность образца.

Улучшение функциональной готовности РЭС проявляется в повышении безотказности и эффективности применения РЭС, следовательно можно говорить, что проведение профилактики повышает надёжность РЭС как большой технической системы специального назначения.

Математическая модель процесса сбора, обработки технической информации управления функциональностью РЭС

Каждое отдельное управление можно рассматривать как своего рода воздействие на образец РЭС с целью улучшения его функционального состояния. Пусть профилактики проводятся в последовательные моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots$. Будем полагать, что образец РЭС состоит из N различных элементов, для каждого из которых определена предупредительная операция O_i ($i = 1, \dots, N$). Множество всех операций ТО обозначим через $O = \{O_1, \dots, O_N\}$. Техническое воздействие, проводимое в момент времени t_k , будем характеризовать множеством O_k выполняемых операций. Множество всех операций, которые предусмотрены для данного образца РЭС, обозначенное через O , таково, что $O_k \subset O$.

Обозначим через $S(t)$ состояние функциональности в момент времени t .

В рассматриваемой задаче состояние $S(t)$ характеризует текущее свойство безотказности образца РЭС. Известно [1], что исчерпывающей вероятностной характеристикой свойства безотказности является плотность вероятности (или функция распределения) наработки до отказа. Поэтому целесообразно состояние $S(t)$ определять векторной функцией плотности вероятности наработки до отказа:

$$S(t) = \{f_i(\tau/t); i = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где $f_i(\tau/t)$ — функция плотности вероятности наработки до отказа i -го элемента, определяемая на множестве значений $\tau > t$.

По существу $f_i(\tau/t)$ — это апостериорная плотность вероятности, определяемая при условии, что при значениях наработки меньших t состояние i -го элемента уже известно.

Проведение операционных воздействий в момент времени t_k приводит к изменению состояния образца. Состояние функциональности РЭС после воздействия в момент времени t_k определим выражением:

$$S_k = Q_k[S_{k-1}, O_k], \quad (2)$$

где S_{k-1} — состояние образца перед проведением O_k (т. е. после проведения операций O_{k-1} в момент времени t_{k-1}); $Q_k[\]$ — оператор, описывающий изменение функционального состояния образца РЭС в результате проведения операции O_k (оператор Q_k вычисляет апостериорные функции $f_i(t/t_k)$ в момент времени t_k).

Если, например, операции $O_i \in O_k$ состоят в простой замене элементов новыми, то действие оператора Q_k представляется следующим преобразованием:

$$\begin{cases} f_i(\tau/t_k) = f_i^0(\tau), & \text{если } O_i \in O_k, \\ f_i(\tau/t_k) = \frac{f_i(\tau/t_{k-1})}{\int_{t_k-t_{k-1}}^{\infty} f_i(\tau/t_{k-1})d\tau}, & \text{если } O_i \notin O_k, \end{cases} \quad (3)$$

где $f_i^0(\tau)$ — плотность вероятности наработки до отказа i -го элемента при условии, что в момент $\tau = 0$ элемент новый.

Введем понятие элементарного решения о назначении профилактических работ, определив его парой:

$$U_k = \langle O_k, T_k \rangle, \quad (4)$$

где O_k — множество операций, выполняемых при управляющем воздействии в момент времени t_k ; T_k — время, через которое планируется проведение следующей профилактики.

Очевидно, что последовательность элементарных решений $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ полностью определяет процесс управления надёжностью РЭС, реализующийся на заданном периоде целевого применения T_3 ($0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < T_3$). Элементарные решения U_k рассматриваются как своего рода управляющие воздействия на техническое состояние образца РЭС.

В качестве целевой функции в задаче оптимизации системы обработки технической информации и функциональности (СОТИФ) обычно принимают коэффициент готовности (коэффициент оперативной готовности) и «среднюю удельную прибыль за единицу календарного времени» [2,3]. Представляется целесообразным применение именно двух показателей, так как первый является характеристикой текущей готовности, а второй — усредненной характеристикой полезного эффекта от применения образца по назначению.

Коэффициент оперативной готовности определим следующим образом:

$$K_{ог}(t_{он}/S_0, U_k) = K_r(S_0, U_k) \cdot P(t_{он}/S_0, U_k), \quad (5)$$

где S_0 — начальное функциональное состояние образца (по существу эта характеристика безотказности нового образца); $U_k = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ — последовательность воздействий на образец, которые выполняются в течение рассматриваемого периода целевого применения T_3 ; $K_r(S_0, U_k)$ — коэффициент готовности, определяемый для рассматриваемого периода целевого применения образца РЭС; $P(t_{он}/S_0, U_k)$ — вероятность безотказной работы образца в течение времени $t_{он}$; $t_{он}$ — априорное время безотказной работы образца (время начало работы).

В качестве второго показателя примем показатель, который назовем средней удельной эффективностью применения образца по назначению и определим следующим образом:

$$\begin{aligned} W(S_0, U_k) &= \frac{M[t_{P\Sigma}] - M[t_{B\Sigma}] \cdot C_1 - M[t_{TO\Sigma}] \cdot C_2}{T_3} = \\ &= 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}] \cdot C_1 + M[t_{TO\Sigma}] \cdot C_2}{T_3}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $t_{P\Sigma}$, $t_{B\Sigma}$, $t_{TO\Sigma}$ — суммарное время нахождения образца РЭС в течение интервала целевого применения T_3 в работоспособном состоянии, состоянии восстановления и проведения технической обработки соот-

ветственно; $M[\]$ — символ операции определения математического ожидания; C_1, C_2 — весовые коэффициенты оценки пребывания образца в состояниях восстановления и проведения технической обработки соответственно; T_3 — рассматриваемый период целевого применения образца РТС.

Очевидно, что при $C_1 = C_2 = 1$ показатель (6) совпадает с известным коэффициентом технического использования. При $C_1 = 1$ и $C_2 = 0$ при непрерывной работе образца РЭС в течение периода T_3 показатель (6) является коэффициентом готовности. Другими словами, задавая соответствующие значения коэффициентов C_1 и C_2 , в показателе (6) учитываются те или иные особенности условий применения образца.

Характеристикой СОТИФ в (5) и (6) является параметр U_k . С учетом введенных обозначений задачу оптимизации системы обработки технической информации и предполагаемой функциональной готовности в общем виде сформулируем так: требуется найти U_k^{opt} , при котором выполнялись бы требования:

$$\begin{cases} K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max, \\ W(S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (7)$$

Очевидно, что в данном виде эта задача является задачей векторной оптимизации (вектор состоит из двух элементов), и обычными математическими методами оптимизации она не решается [4].

Для решения такой задачи известными методами оптимизации необходимо на один из показателей задать ограничение. В данной задаче целесообразно задать ограничение на величину $K_{ог}$. С учетом этого постановку задачи (7) запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} W(S_0, U_k^{opt}) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_k^{opt}) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{ог}^{зад}$ — заданное ограничение на $K_{ог}$.

И в данной постановке задача остается весьма сложной, так как слишком велико пространство U , в котором ищется оптимальное решение U_k^{opt} .

В свою очередь, пространство U определяется декартовым произведением подпространств (каждое подпространство для очередного момента времени t_r — U_{0r} состоит из множества u_r , совершаемых на интервале t_{r-1}, t_r).

$$U = \overbrace{U_{01} \times U_{02} \times \dots \times U_{0k}}^{K_{раз}}, \quad U = \prod_{r=1}^k U_{0r},$$

где U_{0r} — подпространство допустимых решений $U_r \in U_k$, выбираемых для моментов времени t_r ($r=1, \dots, k$).

С учетом (4) пространство U_{0r} определяется следующим образом:

$$U_{0r} = R^1 \times O,$$

где O — множество всех подмножеств O_r ;

$$O_r^T = (O_1, O_2, \dots, O_R); \quad (9)$$

R^1 — множество положительных вещественных чисел.

Следующим шагом является поиск подхода, упрощающего решение задачи (8). Физическая сущность задачи подсказывает, что нецелесообразно

стремиться найти сразу всю оптимальную последовательность U_k^{opt} , так как на протяжении рассматриваемого периода целевого применения T_3 надежностные свойства образца под воздействием внешних условий могут изменяться и найденное решение U_k^{opt} будет обесценено. Кроме того, обычной является ситуация, когда надежностные свойства образца, определяемые функциональным состоянием $S(t)$, известны весьма приближенно и информация об истинном значении $S(t)$ будет уточняться в процессе целевого применения. Исходя из этого, целесообразно задачу (8) решать последовательно («по шагам»), определяя на каждом шаге локально-оптимальное решение U_r^* из условия:

$$\begin{cases} W_1(S_r, U_r^*) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^*) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (10)$$

где $W_1(S_r, U_r^*)$ — показатель вида (6), определяемый на интервале $(t_r, t_r + T_r)$; $U_r^* = \{u_1^*, \dots, u_r^*\}$ — последовательность локально-оптимальных воздействий, выполненных в момент времени $t_1, \dots, t_r$; $K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^*)$ — коэффициент оперативной готовности, определяемый на интервале целевого применения $(0, t_r)$.

Показатель $W_1(S_r, U_r)$ в (10) определяется следующим выражением:

$$W_1(S_r, U_r) = 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}/S_r, U_r] \cdot C_1 + M[t_{TO\Sigma}/S_r, U_r] \cdot C_2}{T_r}, \quad (11)$$

где $M[t_{B\Sigma}/S_r, U_r]$, $M[t_{TO\Sigma}/S_r, U_r]$ — математические ожидания соответственно суммарного времени восстановления и продолжительности профилактических работ на интервале времени $(t_r, t_r + T_r)$ при условии, что в момент времени t_r (перед проведением воздействия U_r) образец находился в состоянии S_r и были проведены операции в соответствии с решением о воздействии $U_{r-1}(O_r, T_r)$.

Очевидно, что получаемая в результате решения задачи (10) последовательность U_r^* будет отличаться от оптимальной U_k^{opt} , так как локально-оптимальные решения $u_r^* \in U_r^*$ оптимальны лишь в пределах одного интервала между воздействиями и при этом не учитывается влияние ранее выполненных профилактик $U_{r-1}, U_{r-2}, \dots$.

Поэтому предлагается с целью улучшения решения U_r^* показатель $W_1(\cdot)$ определять не на одном интервале до очередного процесса предупредительных работ, а на интервале планирования « m » ближайших воздействий.

В этом случае вместо задачи (10) необходимо решать задачу следующего вида:

$$\begin{cases} W_m(S_r, \hat{U}_{r,m}) \rightarrow \max, \\ K_{ог}(t_{оп}/S_0, U_r^* \cup \hat{U}_{r,m}) \geq K_{ог}^{зад}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\hat{U}_{r,m} = \{\hat{U}_r, \hat{U}_{r+1}, \dots, \hat{U}_{r+m}\}$ — прогнозируемая оптимальная последовательность управлений, которая планируется на интервале (t_r, t_{r+m+1}) ; $W_m(S_r, \hat{U}_{r,m})$ — показатель вида (6), определяемый для интервала (t_r, t_{r+m+1}) .

По аналогии с (11) показатель $W_m(S_r, \hat{U}_{r,m})$ определяется выражением:

$$W_m(S_r, \hat{U}_{r,m}) = 1 - \frac{M[t_{B\Sigma}/S_r \hat{U}_{r,m}] \cdot C_1 + M[t_{TO}/S_r \hat{U}_{r,m}] \cdot C_2}{t_{r+m+1} - t_r}. \quad (13)$$

Построение алгоритма квазиоптимальной системы обработки технической информации и функциональной готовности РЭС

При небольших значениях m (опыт моделирования показал, что вполне удовлетворительные результаты получаются при $m = 2 \dots 3$) задача (12) решается методом перебора. На основании рассмотренного предлагается следующий алгоритм нахождения квазиоптимальной СОТИФ U_r^* (рис.1).

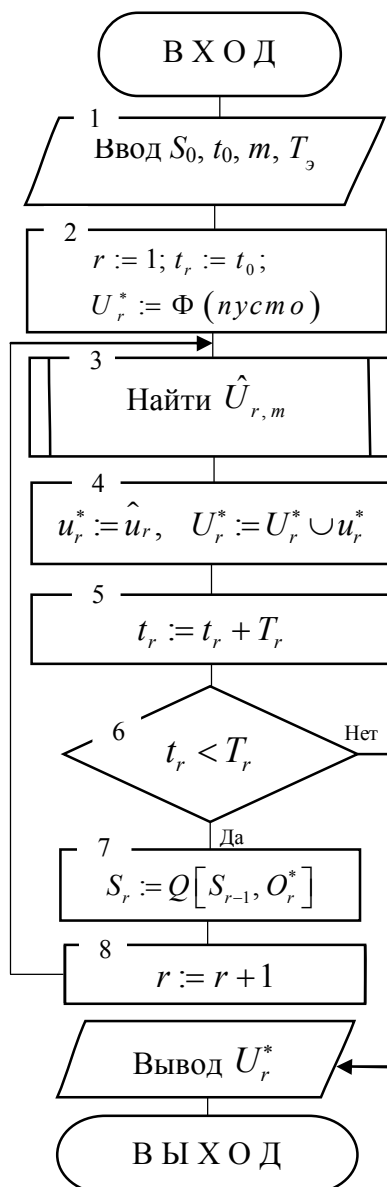


Рис.1. Алгоритм квазиоптимальной системы обработки технической информации и функциональной готовности РЭС

Оператор 1 вводит исходную информацию:

S_0 — информация о функциональном состоянии образца РЭС;

t_0 — назначенное время проведения первого управляющего воздействия. Это время задается произвольно. Позже будет показано, что адаптивная оптимальная СОТИФ не зависит от t_0 ;

m — число интервалов обработки информации, на которых ищутся локально-оптимальные решения $\hat{U}_{r,m}$ в задаче (12);

T_3 — заданный период целевого применения.

Оператор 2 иницирует переменные:

r — номер очередного решения;

t_r — время проведения текущей совокупности операций;

U_r^* — множество (массив), в котором формируется решение.

Оператор 3 находит решение $\hat{U}_{r,m}$ задачи (12).

Оператор 4 формирует квазиоптимальную последовательность U_r^* путем включения в нее элемента $\hat{U}_r$ из последовательности $\hat{U}_{r,m}$.

Оператор 5 вычислит время следующего управляющего воздействия.

Оператор 6 проверяет условие окончания работы алгоритма.

Оператор 7 вычисляет новое состояние образца с учетом выполнения работ в момент времени t_r .

Оператор 8 формирует порядковый номер очередного управляющего решения.

Оператор 9 выводит найденное решение U_r^* .

При этом предполагалось, что состояние образца РЭС S_r определяется точно и его надежностные свойства, устанавливаемые параметром S_0 , остаются неизменными в течение всего периода целевого применения T_3 . Однако в действительности это не так и поэтому получаемое приближенное решение U_r^* может оказаться далеким от оптимального. Последовательный характер предложенного алгоритма позволяет на его основе построить алгоритм перестраиваемой оптимальной СОТИФ, в котором предусматривается получение и использование дополнительной (апостериорной) информации о надежности образца РЭС, получаемой в процессе его боевого применения.

Построение алгоритма обработки и функциональности, адаптивно реагирующего на прогнозируемое изменение технического состояния РЭС

Рассмотренный выше алгоритм нахождения квазиоптимального процесса профилактических воздействий для повышения надежности U_r^* не является оптимальным подстраиваемым по текущему функциональному состоянию образца, несмотря на то, что решение U_r^* формируется последовательно (по шагам). Решение U_r^* , получаемое при реализации алгоритма один раз на основании однажды заданной входной информации S_0 , распространяется на весь период применения образца без учета возможных изменений S_0 в процессе функционирования комплекса военного назначения. В действительности все-

гда оказывается, что, во-первых, надежностные свойства образца S_0 никогда точно не известны, а во-вторых, они изменяются в процессе функционирования под воздействием внешних условий. В связи с этим найденные заранее оптимальное U_k^{opt} или квазиоптимальное U_r^* решения могут быть далекими от действительно оптимального. Поэтому предлагается алгоритм нахождения U_r^* (рис.1) дополнить блоками ввода дополнительной информации о безотказности комплекса и определения уточненного с учетом дополнительной информации текущего функционального состояния S_r .

В качестве дополнительной информации о надежности используются следующие данные:

$I_{отк} = \{\bar{t}_{нач}, \bar{t}_r, \bar{n}_{нач}, \bar{n}_r\}$ — статистическая информация об отказах комплекса, включающая $\bar{t}_{нач}, \bar{t}_r$ — вектор наработки элементов комплекса с начала целевого применения (или после замены) и за истекший интервал (t_{r-1}, t_r) соответственно, $\bar{n}_{нач}, \bar{n}_r$ — вектор числа отказов элементов с начала целевого применения (после замены) и за истекший интервал (t_{r-1}, t_r) соответственно;

$I_{пар} = \{\bar{m}_a, \bar{S}_a, \bar{m}_e, \bar{S}_e, \mathbf{X}\}$ — статистическая информация о поведении определяющих параметров комплекса, включающая $\bar{m}_a, \bar{S}_a$ — векторы математических ожиданий и среднеквадратических отклонений для начальных значений определяющих параметров элементов образца, $\bar{m}_e, \bar{S}_e$ — аналогичные векторы для скоростей «ухода» параметров, $\mathbf{X}$ — массив (матрица) результатов измерений определяющих параметров на интервале (t_{r-1}, t_r) .

С учетом дополнительной информации $I_{отк}$ и $I_{пар}$ производится подсчет функций плотности, входящих в выражение $S(t)$ (1) и для $S_r - S_0$.

Пересчет осуществляется следующим образом: новое (пересчитанное) значение функции $f_i(t)$ можно определить из выражения:

$$f_i(t) = c_0 f_i^0(t) + (1 - c_0) \times \times b_i \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=i}^{n_i} p(t - t_{ij}) + f_i^{нар}(t / m_{ai}, S_{ai}, m_{ei}, S_{ei}) \right], \quad (14)$$

где $f_i^0(t)$ — в правой части суммарная (до учета новых условий, до пересчета) функция плотности вероятности наработки до отказа i -го элемента образца;

c_0 — коэффициент, определяющий относительный вес суммарного компонента функции плотности;

n_i — число отказов i -го элемента за период целевого применения до текущего момента времени t_r ;

t_{ij} — реализация наработки между $(j-1)$ и j -м отказами i -го элемента;

$p(t - t_{ij})$ — функция, определяющая вклад j -й реализации наработки до отказа в эмпирическую компоненту функции плотности. Ввиду того, что n_i будет малым или даже равным нулю, для формирования эмпирической компоненты должны использоваться специальные методы работы с малыми выборками [1]. Вид функции $p(t - t_{ij})$ будет зависеть от выбранного метода;

$f_i^{нар}(t / m_{ai}, S_{ai}, m_{ei}, S_{ei})$ — функция плотности вероятности наработки i -го элемента до параметрического отказа при предположении о нормальном законе распределения начального значения и скорости ухода параметра. Эта функция, по имеющимся статистическим данным, может быть получена расчетным путем [4,5];

v_i — нормирующий множитель, величина которого определяется из условий

$$\int_0^\infty f_i^0(t) dt = 1. \quad (15)$$

Блок-схема алгоритма, в котором на каждом шаге выбора элементарного решения U_r^* вводится и используется дополнительная информация $I_{отк}$ и $I_{пар}$, приведена на рис.2.

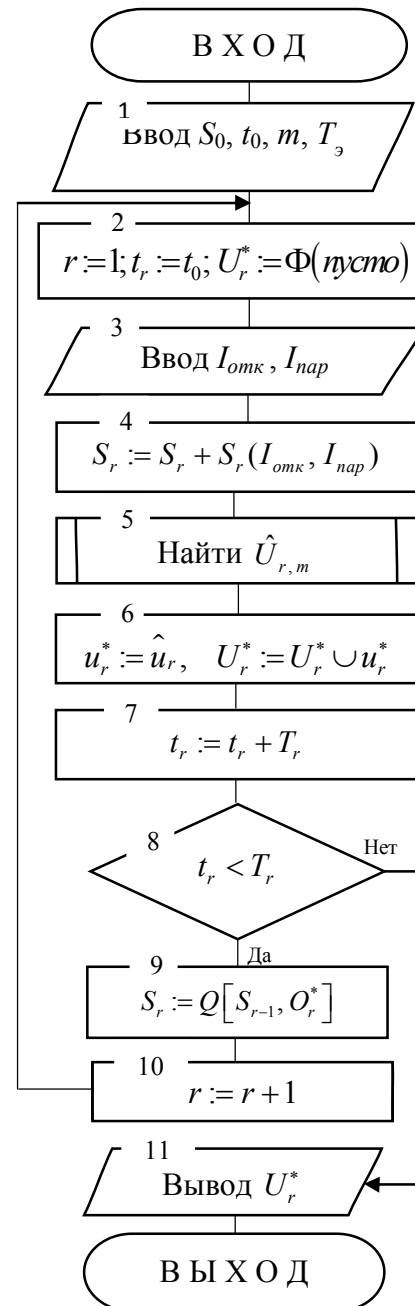


Рис.2. Алгоритм оптимальной системы обработки информации по показателям надежности РЭС

Из рисунка видно, что данный алгоритм от алгоритма на рис.1 отличается лишь двумя дополнительными операторами 3 и 4.

Оператор 3 вводит в момент времени t_r дополнительную информацию $I_{отк}$ и $I_{пар}$.

Оператор 4 формирует уточненное функциональное состояние РЛ комплекса S_r с учетом введенной дополнительной информации.

Операторы 5-11 полностью совпадают с операторами 3-9 алгоритма на рис.1.

Заключение

Данный алгоритм с полным основанием можно назвать перестраиваемым оптимальным алгоритмом. По терминологии [6] в алгоритме реализуется первый тип адаптации, согласно которому алгоритм управления остается неизменным, а изменяются только параметры этого алгоритма. СОТИФ, получаемая на основе данного алгоритма, называется адаптивной СОТИФ.

В работе предложен алгоритм оптимальной системы обработки технической (функциональной) информации и прогнозируемой готовности, которая, с одной стороны, по возможности использует подходы и методы уже известных моделей, а с другой стороны, соответствует основным особенностям многофункциональных образцов РЭС и условиям их применения по назначению.

Представленная в алгоритме модель учитывает такие основные особенности РЭС, как сложность (большое число элементов, многорежимность и т.п.) и существенные различия элементов РЭС по характеру протекающих в них деградиционных процессов, проявляющихся в различиях их вероятностных характеристик безотказности. В модели СОТИФ РЭС учитывается тот факт, что, с одной стороны, реальные свойства безотказности РЭС могут изменяться в процессе целевого применения под воздействием внешних факторов, а с другой стороны, имеющаяся информация о безотказности РЭС всегда неполная и неточная. Поэтому в такой модели системы предусмотрена возможность ввода дополнительной (апо-

стериорной) информации и пересчета найденных ранее оптимальных сроков и объемов технических воздействий.

1. Зубарев Ю.М. Основы надежности машин и сложных систем: учебник. СПб.: Лань, 2020. 180 с.
2. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 80 с.
3. Схиртладзе А.Г., Уколов М.С., Скворцов А.В. Надёжность и диагностика технологических систем: учеб. М.: Новое знание, 2008. 518 с.
4. Масюков К.П., Коновалов Д.Ю., Михеев Д.В. Характеристики качества оценивания координат техногенных космических объектов // Радиотехника. 2019. Т. 83. №11(17). С.59-65.
5. Ниворожкина Л.И., Арженовский С.В., Рудяга А.А. и др. Статистические методы анализа данных: учебник. М.: Риор: Инфра-М, 2016. 333 с.
6. Масюков К.П., Коновалов Д.Ю., Куликов С.В. Особенности формирования алгоритма системы обработки информации на основе эмпирических данных // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. Т.25. №3. С.57-64.

References

1. Zubarev Yu.M. Osnovi nadezhnosti mashin i slozhnykh sistem [Fundamentals of reliability of machines and complex systems: textbook]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2020, 180 p.
2. Shubin R.A. Nadezhnost tehnikeskikh sistem i tehnogenniy risk [Reliability of technical systems and technogenic risk: a textbook]. Tambov, "TSTU" Publishing, 2012, 80 p.
3. Skhirtladze A.G., Ukolov M.S., Skvordtsov A.V. Nadezhnost i diagnostika tehnologicheskikh sistem [Reliability and diagnostics of technological systems: textbook]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2008, 518 p.
4. Nivorozhkina L.I., Arzhenovsky S.V., Trudyaga A.A. Statisticheskiye metody analiza dannykh [Statistical methods of data analysis]. Moscow, Rior, 2018, 320 p.
5. Mashukov K.P., Kononov D.Yu., Mikheev D.V. Harakteristiki kachestva ocenivaniya koordinat tehnogennih kosmicheskikh objektov [Characteristics of quality evaluation of the coordinates of the manmade objects in outer space]. Radio engineering, 2019, vol.83, no.11 (17), pp.59-65.
6. Masyukov K.P., Kononov D.Yu., Kulikov S.V. Osobennosti formirovaniya algoritma sistemi obrabotki informacii na osnove empericheskikh dannykh [Features of the formation of the algorithm of the information processing system based on empirical data]. Electromagnetic waves and electronic systems, 2020, vol.25, no.3, pp.57-64.