

Научная статья
УДК 697.9

Оптимизация процесса принятия решений о техническом состоянии систем вентиляции и кондиционирования воздуха сооружений наземной инфраструктуры ракетно-космического комплекса

Дмитрий Николаевич Гула, Виктор Михайлович Моторин,
Ольга Витальевна Якубенко

Аннотация. В статье предложен метод оптимизации программы диагностирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха сооружений наземной инфраструктуры ракетно-космического комплекса. Критерием оптимизации выступает максимум средней вероятности правильного определения технического состояния. Разработанный метод обеспечивает максимальную достоверность и функциональную эффективность процесса принятия решений о техническом состоянии объекта при контроле и диагностировании военно-технических систем – в частности, систем вентиляции и кондиционирования воздуха, – что позволяет поддерживать нормальные условия функционирования технологического оборудования и жизнедеятельности личного состава.

Ключевые слова: оптимизация; диагностирование; техническое состояние; системы вентиляции и кондиционирования воздуха

Для цитирования: Гула Д.Н., Моторин В.М., Якубенко О.В. Оптимизация процесса принятия решений о техническом состоянии систем вентиляции и кондиционирования воздуха сооружений наземной инфраструктуры ракетно-космического комплекса // Вооружение и экономика. 2026. №2(76). С. 59-63.

Original article

Decision-Making Process Optimization of Ventilation and Air Conditioning Systems Technical Conditioning of the Rocket and Space Complex Ground Infrastructure

Dmitrii N. Gula, Viktor M. Motorin, Olga V. Yakubenko

Abstract. The article proposes a method for optimizing the diagnostic program for ventilation and air-conditioning systems in facilities belonging to the ground infrastructure of a rocket and space complex. The optimization criterion is the maximum average probability of correctly identifying the technical condition. The developed method ensures the highest reliability and functional efficiency of decision-making on the technical condition of military systems during their monitoring and diagnosis – particularly ventilation and air-conditioning systems – thereby helping to maintain normal operating conditions for technological equipment and suitable living and working conditions for personnel.

Keywords: optimization; diagnostics; technical condition; ventilation and air conditioning systems

For citation: Gula D.N., Motorin V.M., Yakubenko O.V. Decision-Making Process Optimization of Ventilation and Air Conditioning Systems Technical Conditioning of the Rocket and Space Complex Ground Infrastructure. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 76(2): 59-63. (In Russ.).

Сооружения наземной инфраструктуры ракетно-космического комплекса (РКК) предназначены для обработки всей собранной информации о состоянии и готовности всех технологических и технических систем РКК [1], бортовой аппаратуры и агрегатов ракеты-носителя и космического аппарата, кондиционности и количестве компонентов ракетных топлив, газов и спецжидкостей, а также о готовности всех служб РКК к предстоящим работам.

Одной из важнейших технических систем сооружений наземной инфраструктуры РКК являются системы вентиляции и кондиционирования воздуха (СВиКВ), предназначенные для создания и поддержания нормальных условий функционирования технологического оборудования и жизнедеятельности личного состава [1; 2].

Одним из фундаментальных свойств любого процесса является его эффективность, под которой понимается приспособленность данного процесса к достижению поставленной цели, его результативность, соотносённая с затратами всех видов ресурсов¹. Для оценивания эффективности процесса принятия решений о техническом состоянии (ТС) объекта

¹ Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика: учебник. М.: Воениздат, 1987. 521 с.

необходимо выбрать показатель эффективности и сформировать критерий, по которому оцениваются различные варианты программы диагностирования СВиКВ. Из трёх известных видов критериев – пригодности, оптимальности и превосходства² в рассматриваемой задаче целесообразно использовать второй. В соответствии с данным критерием должен быть найден такой вариант ветвления граф-дерева, на котором выбранный показатель эффективности Π_i принимает экстремальное значение при условии выполнения заданных ограничений (рисунок 1) [3; 4].

Типовая схема СВиКВ сооружений наземной инфраструктуры РКК включает в себя различное энергомеханическое, сеть воздухопроводов и иное оборудование (рисунок 2).

Под эффективностью процесса принятия решений о ТС элементов СВиКВ в дальнейшем понимается его достоверность. И если универсальным показателем эффективности является вероятность достижения цели, то показатель достоверности – это вероятность D получения правильного решения о ТС СВиКВ. Естественно, что оптимизация должна выполняться по критерию максимума указанного показателя.

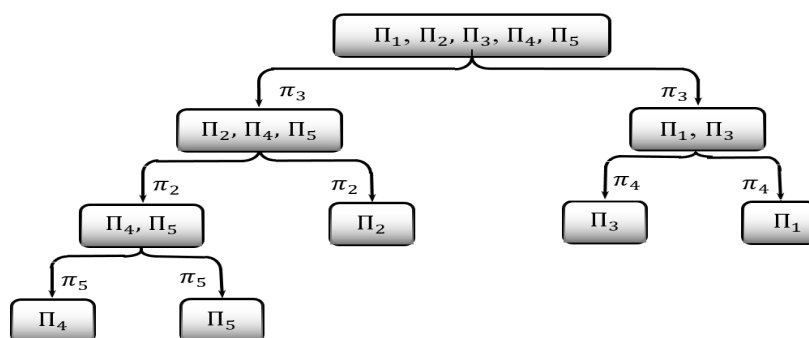
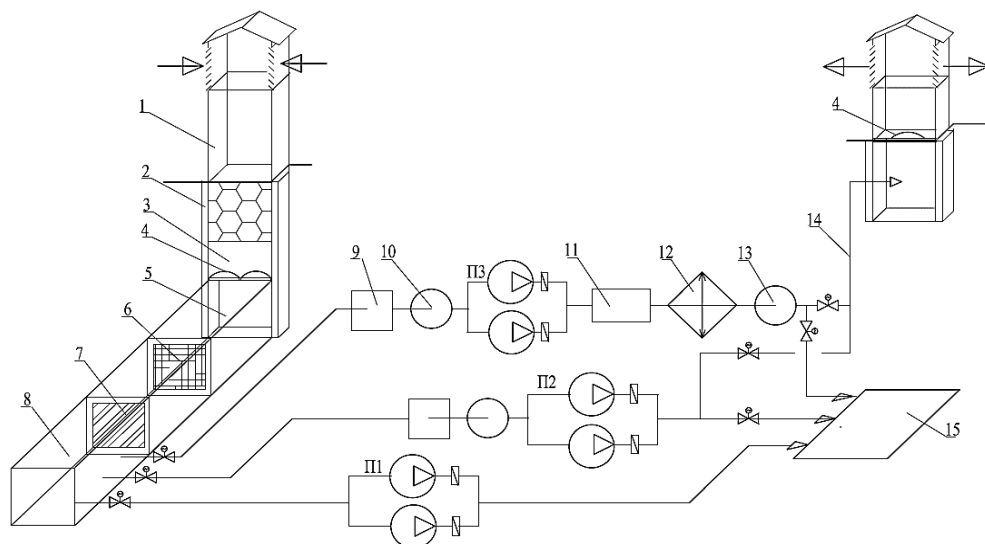


Рисунок 1 – Граф-дерево оптимального алгоритма распознавания технических состояний системы



1 – воздухозаборное устройство; 2 – тепловолногасительное устройство; 3 – камера защитных клапанов; 4 – защитные клапаны; 5 – расширительная камера; 6 – фильтр предварительной очистки воздуха; 7 – воздухонагреватель предварительного подогрева воздуха; 8 – камера распределительная; 9 – пакетный фильтр противопоыльный ПФП-1000; 10 – фильтр-поглотитель ФП-300; 11 – фильтр морской термокаталитический ФМТ-200; 12 – воздухоохладитель; 13 – регенеративный патрон РП-100; 14 – продувочная линия; 15 – воздухоприемная камера центрального кондиционера

Рисунок 2 – Принципиальная схема СВиКВ сооружения

² Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем и оптимального управления: учебник. Ч.2: Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. М.: Воениздат, 1987. 589 с.

Чтобы сформулировать данную задачу на математическом уровне, необходимо на упорядоченном множестве проверок контролируемых признаков (КП) $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j\}$ задать множество перестановок $m\Pi$. Данное множество содержит все возможные упорядоченные сочетания проверок КП. Следовательно, экстремальное значение показателя D необходимо искать именно на множестве $m\Pi$, которое является множеством альтернатив³. Реализация всех перестановок даёт всевозможные варианты ветвления граф-дерева, при этом формируются все подмножества проверок Π_i . Для каждого варианта ветвления можно вычислить значение показателя D , и максимальное из всех полученных значений соответствует оптимальному варианту ветвления.

Пусть множество видов ТС объекта, как и прежде⁴, индексируется множеством F , мощность которого равна количеству рассматриваемых видов ТС: $|F| = m$. С учётом данного обозначения оптимизационная задача формулируется следующим образом. Найти последовательность $(\Pi_f)_{f \in F}$ упорядоченных подмножеств проверок КП такую, что:

$$D(\Pi_f)_{f \in F} = \max_{p \in m\Pi} D\{(D(\Pi_f)_{f \in F})_p\}. \quad (1)$$

Ограничением на состав КП является условие попарной различимости изображений видов ТС объекта⁵. При этом должны выполняться и ограничения на временные и трудовые ресурсы. В явном виде последние ограничения будут сформированы ниже.

Для решения оптимизационной задачи (1) целевая функция должна быть задана в явном виде. Её построение осуществляется на основе следующих рассуждений.

В соответствии с принятой ранее вероятностной моделью:

$$M = (E, A_E, P, \Theta), \quad (2)$$

где: E – множество изображений видов ТС объекта, сформированных в результате обучения (множество исходов эксперимента);

$A_E = \{R | R \subset E\}$ – алгебра подмножеств множества E , в которой элементы R имеют смысл фазовых состояний моделируемого процесса;

$P = \{P(R) | P(R) = \sum_{E_i \in R} P(E_i), R \in A_E\}$ – вероятностная мера, заданная на алгебре A_E ;

$\Theta = \{\Theta_i | \Theta_i: E \rightarrow R_i, i = 1, m\}$ – множество операторов, описывающих переходы из начального фазового состояния $R = E$ к конечным фазовым состояниям $R_i = \{E_i\}$, каждое из которых содержит единственный элемент E_i , представляющий опознанный вид ТС объекта, событие, заключающееся в том, что объект находится в i -м виде ТС будет обозначаться через E_i .

Вероятность такого события $P(E_i)$ полагается заданной. Событие, заключающееся в том, что в результате выполнения проверок КП зафиксирован i -й вид ТС, будет обозначаться через R_i .

Пусть зафиксирован i -й вид ТС при условии, что реальное состояние объекта также соответствует i -му виду ТС, т.е. одновременно произошли события E_i и R_i . Следует заметить, что событие R_i – это не вполне достоверный результат из-за наличия инструментальных и методических погрешностей при выполнении проверок.

Очевидно, что условная вероятность $P(R_i | E_i)$ представляет собой вероятность D_i получения правильного решения для i -го вида ТС:

$$D_i = P(R_i | E_i).$$

Так как при идентификации i -го вида ТС реализуются проверки из упорядоченного подмножества Π_i , можно записать, что:

³ Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем... Указ. соч.

⁴ Сеньченков В.И. Модели, методы и алгоритмы анализа технического состояния. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 377 с.

⁵ Там же.

$$D_i = D\Pi_i.$$

Вероятность D правильного решения в целом по программе определяется как средняя вероятность, которая аппроксимирует математическое ожидание величины D_i :

$$D = ED(\Pi_i)_{i=\overline{1,m}} = \sum_{i=1}^m P(E_i)P(R_i|E_i). \quad (3)$$

Структура ограничений оптимизационной задачи формируется из аналогичных рассуждений. Если $\sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j)$ и $\sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j)$ – суммарные затраты времени и ресурсов на выполнение проверок КП, необходимых для определения i -го вида ТС, то математическое ожидание затрат в целом по программе определяется из выражений:

$$ET = \sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j), \quad (4)$$

$$EC = \sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j). \quad (5)$$

Для того чтобы производить оптимизацию процесса принятия решений о ТС объекта, необходимо оперировать выражением (3). Следовательно, должны быть выведены соотношения для определения вероятностей типа $P(R_i|E_f)$, которые характеризуют вероятности как правильных решений о ТС объекта при $i = f$, так и ошибочных решений ($i \neq f$).

Для идентификации произвольного вида ТС объекта необходимо выполнить ряд проверок КП. Возникающие при этом вероятности ошибок первого и второго рода зависят только от точностных характеристик контрольно-измерительных приборов и значений допусков на КП. Поэтому вероятности этих ошибок для разных проверок статистически независимы. Исходя из этого выражение для вычисления $P(R_i|E_f)$ можно записать в виде произведения:

$$P(R_i|E_f) = \prod_{\pi_j \in \Pi_i} \gamma_{if}(\pi_j), \quad (6)$$

в котором сомножители $\gamma_{if}(\pi_j)$ определяются на основе решающего правила и вероятностей ошибок первого и второго рода производимых проверок. С учётом определения указанных ошибок, которое приведено выше, вытекает правило вычисления данных сомножителей при контроле работоспособности и диагностировании:

$$\gamma_{if}(\pi_j) = \begin{cases} 1 - \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=\overline{0,m}} \{|y_{ij} - e_{fj}|\}, i = 0; \\ 1 - \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=\overline{0,m}} \{|y_{ij} - e_{fj}|\}, i = \overline{1,m}; \\ \alpha_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=\overline{0,m}} \{|y_{ij} - e_{fj}|\}, i = 0; \\ \beta_j, & \text{если } |y_{ij} - e_{ij}| = \min_{f=\overline{0,m}} \{|y_{ij} - e_{fj}|\}, f = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, учитывая соотношения (6) и (7), математическая формулировка задачи оптимизации по критерию максимума средней вероятности получения правильного решения о ТС объекта при ограничениях на временной и трудовой ресурсы состоит в следующем. Найти упорядоченные подмножества $\Pi_i \subseteq \Pi$, $i = \overline{1,m}$ такие, что:

$$ED = \max_{p \in m\Pi} \left\{ \sum_{i=1}^m P(E_i) \left(\prod_{\pi_j \in \Pi_i} \gamma_{ij}(\pi_j) \right)_p \right\};$$

$$\sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} t(\pi_j) \leq M_t; \sum_{i=1}^m P(E_i) \sum_{\pi_j \in \Pi_i} c(\pi_j) \leq M_c, \quad (8)$$

где: M_t , M_c – максимально допустимые расходы временного и трудового ресурсов соответственно.

Решение задачи (8) обеспечивает максимальную достоверность, т.е. функциональную эффективность процесса принятия решений о ТС объекта. Данное свойство имеет особенно важное значение при контроле и диагностировании военно-технических систем, в частности, СВикВ [5; 6]. Это объясняется высокой ответственностью решений, принимаемых по результатам анализа ТС. Если работоспособный объект признаётся

неработоспособным, то он выводится из эксплуатации, что ведёт к неоправданным затратам по производству ремонтных работ.

Попытка применения по назначению неработоспособного объекта, ошибочно принятого как работоспособный, ведёт к срыву выполнения боевой задачи. Кроме этого, возможные последствия чрезвычайно опасны для обслуживающего персонала, если объекты представляют собой тепломеханические или электромеханические системы с высокими значениями температур и давлений рабочих тел, подвижными инерционными массами. Поэтому обеспечение максимальной достоверности диагностирования СВикВ является весьма актуальной задачей.

Диагностирование можно рассматривать как управляемый дискретный многошаговый процесс стохастического типа. Он обладает свойствами Марковского процесса⁶, так как переход из любого его состояния в другое полностью определяется предыдущим состоянием и выбранной в нём проверкой. Кроме этого, задача диагностирования допускает декомпозицию на относительно самостоятельные подзадачи меньшей размерности. Любая программа диагностирования может быть представлена как композиция отдельных подпрограмм, которые начинаются с промежуточных фазовых состояний [5].

Оптимизация таких процессов производится различными методами дискретного программирования [7], в частности, динамического программирования. Другой способ нахождения оптимального решения состоит в построении всех возможных гибких программ диагностирования путём задания различных вариантов ветвления. Указанные варианты реализуются при изменении порядка проверок. В связи с тем, что в рассматриваемом случае число видов ТС СВикВ и количество проверок невелико, для поиска оптимального решения применяется метод прямого перебора вариантов ветвления.

Таким образом, формализация последовательности выполнения проверок и оптимизация процессов принятия решений о ТС СВикВ выполнена для различной формы представления и физической природы выходных процессов объекта, что является дальнейшим развитием известных разработок в области контроля и диагностирования.

Список источников

1. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126 с.
2. Сенченков В.И. Теоретические основы моделирования контроля и технического диагностирования: монография. М.: Воениздат, 1998. 78 с.
3. Сеньченков В.И. Решающие правила в алгоритмах определения технического состояния системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т.56. №3. С. 5-11.
4. Сеньченков В.И., Моторин В.М., Грушковский П.А. Построение оптимальных алгоритмов диагностирования с ограничениями методом динамического программирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т.58. №10. С. 783-791.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
6. Теоретические основы системного анализа / Под ред. В.И. Новосельцева. М.: Майор, 2006. 591 с.
7. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969. 120 с.

Информация об авторах

Д.Н. Гула – кандидат технических наук, SPIN 9147-9805.
В.М. Моторин – кандидат технических наук, доцент, SPIN 6215-0267.
О.В. Якубенко – кандидат технических наук, доцент, SPIN 4215-0563.

⁶ Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения: учебник в 2-х т. М.: Мир, 1984.