

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**Е. В. Копкин (Санкт-Петербург)**

В составе современных сложных технических объектов, как правило, имеются информационно-измерительные системы (ИИС), предназначенные для получения информации, характеризующей техническое состояние объекта анализа путем измерения его параметров (признаков) и анализа измеренных значений по специальным алгоритмам.

Для построения автоматизированных систем анализа технического состояния (ТС) подобных объектов необходима разработка диагностических алгоритмов математического обеспечения ИИС. Реализация этих алгоритмов осуществляется с помощью программного компонента ИИС, а именно – гибких информационно-поисковых стратегий (ИПС), которые позволяют автоматизировать процесс анализа технического состояния объектов на различных этапах их жизненного цикла.

Указанные ИПС позволяют решать две основные задачи анализа – контроль правильности функционирования объекта и поиск дефектов в нем с заданной глубиной в случае потери объектом своей работоспособности. Кроме того, в настоящее время задача анализа ТС объекта обычно формулируется и как оптимизационная, т.е. решение о техническом состоянии, в котором находится объект анализа, необходимо принять таким образом, чтобы обеспечить при этом экстремальное значение выбранного показателя оптимизации, например, средних затрат на распознавание ТС объекта.

Анализируемый объект может случайным образом оказаться в одном из множества искомых состояний. Существует множество путей достижения цели, исходящих из начального состояния процесса анализа. Наиболее удобным способом представления ИПС анализа ТС объекта является ориентированный граф, имеющий одну антитупиковую (начальную) вершину и некоторое число тупиковых (конечных) вершин, обозначающих распознаваемые состояния объекта. Промежуточным вершинам графа соответствуют подмножества «подозреваемых» состояний, в одном из которых находится объект, а дугам – случайные исходы проверок, выполняемых в процессе распознавания его состояния. При разных методах построения получаются разные варианты ИПС для одного и того же объекта. Для выбора наилучшего из этих вариантов используются различные критерии.

Другими словами, анализ ТС объекта можно рассматривать как управляемый с помощью проверок диагностических признаков динамический процесс стохастического типа с заданным правилом остановки. Целенаправленным выбором проверок можно гибко изменить этот процесс, придавая ему желаемые свойства, в том числе и оптимальные.

Для описания процесса анализа воспользуемся диагностической моделью, которая представляется в виде двух упорядоченных множеств

$$\begin{aligned} M_o &= \langle \mathcal{S}, \Pi, L, \Phi^* \rangle; \\ M_n &= \langle \mathcal{S}, \Omega, \mathcal{P}, \hat{\Pi} \rangle, \end{aligned} \tag{1}$$

первое из которых является моделью объекта анализа, а второе – моделью процесса определения ТС объекта, т.е. анализа.

Здесь $\mathcal{S} = \{S_i / i = \overline{1, m}\}$ – множество ТС, в одном из которых может находиться проверяемый объект; $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j / j = \overline{1, n}\}$ – множество проверок, взаимно однозначно соответствующее множеству $\Pi = \{\pi_j / j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков, на котором все ТС $S_i \in \mathcal{S}$ попарно различимы, т.е. $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ есть проверка соответствующего признака $\pi_j \in \Pi$; $L = \{\ell_{ij} / i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ – множество интервалов ℓ_{ij} на вещественной числовой оси, каждый из которых характеризует возможный разброс j -го признака в i -м ТС; $\Phi^* : \mathcal{S} \times \Pi \rightarrow L$ – отображение, устанавливающее связь между элементами множеств L, \mathcal{S}, Π , согласно которому $\ell_{ij} = \Phi^*(S_i, \pi_j)$, $S_i \in \mathcal{S}, \pi_j \in \Pi$; $\Omega = \{R | R \subseteq \mathcal{S}\}$ – алгебра событий, заданных на множестве \mathcal{S} , в которой элементы R играют роль информационных состояний (ИС) моделируемого процесса анализа; $\mathcal{P} = \{P(R) | R \in \Omega\}$ – вероятностная мера, заданная на множестве Ω .

Физически каждое ИС $R \in \Omega$ означает подмножество «подозреваемых» ТС, в одном из которых находится объект. Различают начальное ИС $R = \mathcal{S}$, промежуточные $R \subset \mathcal{S}$ и конечные состояния $R = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$. Каждое из конечных ИС содержит единственное “подозреваемое” состояние S_i , которое воспринимается как опознанное i -е ТС объекта. В дальнейшем конечные ИС будем обозначать $R_i = \{S_i\}$, где $i = \overline{1, m}$, а все остальные (неконечные) – $R_k \subseteq \mathcal{S}$ ($k = m + 1, m + 2, \dots$).

Функционирование гибкой ИПС заключается в получении и анализе информации о состоянии наблюдаемого (проверяемого) объекта. При этом процесс анализа последовательно переходит из одного ИС $R_k \in \Omega$ в другое, содержащее меньшее число элементов S_i . Процесс переходов завершается при достижении одного из конечных состояний R_i , $i = \overline{1, m}$, содержащих единственное состояние S_i , воспринимаемое как опознанное. Описанным процессом можно управлять, целенаправленно, выбирая в каждом неконечном состоянии $R_k \subseteq \mathcal{S}$ проверку $\hat{\pi}_j$, которая должна принадлежать множеству $\hat{\Pi}_k$ допустимых в данном состоянии R_k проверок, определяемому из условия

$$\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (\ell_{ij} \cap \ell_{fj} = \emptyset). \quad (2)$$

Переход от одного состояния R_k к другому осуществляется с помощью отображения

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v, \quad v = \overline{1, \omega_{kj}}, \quad (3)$$

где $R_{kj}^v = \{S_i | S_i \in R_k, y_j \in \Delta_{kj}^v\}$; $\Delta_{kj}^v = \bigcap_{i: S_i \in R_{kj}^v} \ell_{ij}$.

Это отображение относится к классу линейных непрерывных самосопряженных операторов, называемых операторами проектирования (проекторами). Оно проектирует исходное пространство на его подпространства вплоть до одномерного подпространства. Отображение (3) можно записать в следующих равносильных формах:

$$R_{kj}^v = \hat{\pi}_j(R_k) = R_k \setminus \ker \hat{\pi}_j(R_k) = \text{im } \hat{\pi}_j(R_k), \quad (4)$$

где $\ker \hat{\pi}_j(R_k) = \{S_i / S_i \in R_k, \hat{\pi}_j(S_i) = 0_{\langle n \rangle}\}$, $\text{im } \hat{\pi}_j(R_k) = \{S_i / S_i \in R_k, \hat{\pi}_j(S_i) = S_i\}$,

$0_{\langle n \rangle}$ – нулевой вектор размерности n .

Результатом выполнения отображения (3), т.е. исходом проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в состоянии R_k , является событие, заключающееся в попадании измеренного значения y_j признака π_j в подынтервал Δ_{kj}^v с вероятностью $P(y_j \in \Delta_{kj}^v)$, которую можно определить по формуле

$$P(y_j \in \Delta_{kj}^v) = P_k(\hat{\pi}_j^v) = \frac{|\Delta_{kj}^v|}{|\nabla_{kj}^v|}, \quad (5)$$

где $\nabla_{kj}^v = \bigcup_{\{i: S_i \in R_{kj}\}} \ell_{ij}^v$, а вертикальные черточки обозначают длину соответствующих подынтервалов Δ_{kj}^v и ∇_{kj}^v .

Начальное состояние процесса поиска $R_k = \mathcal{S}$ задано. Известна также алгебра событий $\Omega_i \subset \Omega$, содержащая конечные состояния $R_i = \{S_i\}$, $i = \overline{1, m}$, т.е. $\Omega_i = \{R_i | i = \overline{1, m}\}$.

Задача многошаговой оптимизации заключается в следующем: выбрать на каждом шаге проверку из числа допустимых в рассматриваемом состоянии $R_k \subseteq \mathcal{S}$ таким образом, чтобы в совокупности выбранное конечное число проверок обеспечивало достижение каждого конечного состояния $R_i \in \Omega_i$, $i: S_i \in R_k$ наилучшим в смысле выбранного показателя образом.

В качестве показателей оптимизации можно использовать:

– средние затраты на распознавание конкретного ТС объекта

$$\bar{C} = \sum_{\{k: R_k \in \Omega_k\}} P(R_k) c(\pi_j), \quad (6)$$

где $c(\pi_j)$ – цена (в условных единицах) проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в состоянии R_k ;

• среднюю информативность (на основе шенноновской меры информации) синтезируемой информационно-поисковой стратегии

$$\bar{I} = \sum_{\{k: R_k \in \Omega_k\}} P(R_k) \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) [-\log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v)]; \quad (7)$$

• среднюю полезность информации, получаемой в процессе анализа состояния объекта (определение полезной информации позволяет существенно сократить ее «семантическую избыточность», под которой понимается не избыток смыслового содержания получаемых сообщений, а бесполезность некоторых из них для раскрытия этого содержания)

$$\bar{J} = \sum_{\{k: R_k \in \Omega_k\}} P(R_k) \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \left[\omega_{kj} \log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v) - \log_2 \prod_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \right]; \quad (8)$$

• среднюю достоверность синтезируемой информационно-поисковой стратегии

$$\bar{D} = \sum_{G_r \in U} P(G_r) \prod_{\pi_j \in \Pi_r} d_{kj}^v, \quad (9)$$

где d_{kj}^v – достоверность v -го исхода проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в ИС R_k ; G_r – отдельная ветвь ИПС с порядковым номером r (последовательность случайных исходов $\hat{\pi}_{kj}^v$ соответствующих проверок $\hat{\pi}_j$, выполняемых при реализации данной ветви); Π_r – подмножество признаков π_j , входящих в r -ю ветвь ИПС и упорядоченное по очередности их проверки;

- среднюю производительность синтезируемой ИПС (показатель производительности имеет смысл дисперсии непрерывного признака, принимающего различные случайные значения в разных ТС объекта)

$$\bar{Q} = \sum_{\{k: R_k \in \Omega_k\}} P(R_k) \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \left[s_{kj}^v - \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) s_{kj}^v \right]^2, \quad (10)$$

где $s_{kj}^v = \frac{1}{2}(\Delta_{kj}^{vl} + \Delta_{kj}^{vp})$ – середина (центр) подынтервала Δ_{kj}^v , а Δ_{kj}^{vl} и Δ_{kj}^{vp} – его левая и правая границы соответственно.

В формулах (6)–(8) $P(R_k)$ – вероятность того, что процесс анализа находится в ИС R_k ; $\Omega_k = \Omega \setminus \Omega_i$ ($i = \overline{1, m}$).

Оптимальные и квазиоптимальные ИПС можно синтезировать, используя различные методы, такие как метод динамического программирования (МДП), принцип максимума Понтрягина (ПМП), метод ветвей и границ (МВГ), последовательный метод выполнения проверок.

Использование МДП позволяет синтезировать гибкие оптимальные ИПС по показателям (6)–(9). Кроме того, использование минимаксной стратегии позволяет получить «гарантированный» результат, когда процесс анализа развивается по самой «неблагоприятной», в смысле выбранного показателя оптимизации, ветви ИПС.

При использовании ПМП можно синтезировать гибкие оптимальные ИПС по показателям (6)–(8).

Применение МВГ позволяет синтезировать гибкие квазиоптимальные ИПС по показателям (6)–(9). При этом результат близок к оптимальному, а вычислительные затраты, связанные с перебором большого количества ИС, значительно меньше, чем при использовании МДП или ПМП. МВГ позволяет также получить оптимальный результат за счет введения рекурсии в процедуру синтеза. Это увеличивает количество элементов перебора и несколько усложняет процедуру распознавания ТС объекта, но результат получается такой же, как при использовании МДП.

Последовательным методом выполнения проверок можно синтезировать гибкие ИПС по показателю (10).

Таким образом, представление исходных данных в виде множеств $\mathcal{S} = \{S_i / i = \overline{1, m}\}$, $\Pi = \{\pi_j / j = \overline{1, n}\}$ и $L = \{\ell_{ij} / i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ позволяет синтезировать гибкие ИПС, оптимальные по выбранному показателю.

Для проверки эффективности разработанных методик и алгоритмов было проведено имитационное моделирование на ЭВМ процессов синтеза оптимальных и квазиоптимальных ИПС для конкретного технического объекта, для которого было задано восемь технических состояний и 10 диагностических признаков. Синтез ИПС осуществлялся по всем рассмотренным показателям оптимизации и всеми рассмотренными методами.

По результатам моделирования можно сделать ряд выводов.

1. Гибкие оптимальные ИПС, синтезированные методом динамического программирования и на основе принципа максимума Понтрягина (по критериям минимума средних затрат, максимума информативности и максимума полезности получаемой информации), полностью идентичны между собой.

2. При выборе в качестве показателя оптимизации средних затрат на распознавание ТС объекта и среднего количества информации, получаемой при распознавании ТС объекта, предпочтительнее использовать для синтеза ИПС метод ветвей и границ, поскольку при небольшом количестве анализируемых информационных состояний значение средних затрат на реализацию ИПС и среднего количества информации, получаемой в процессе анализа, незначительно отличаются от оптимальных значений, которые можно было получить при использовании МДП, а значения других показателей качества находятся на приемлемом уровне.

3. При выборе в качестве показателя оптимизации средней полезности информации, получаемой при распознавании ТС объекта, или средней достоверности распознавания ТС объекта предпочтительнее использовать для синтеза ИПС последовательный метод, поскольку при существенно меньших вычислительных затратах значения средней полезности и средней достоверности синтезированных ИПС незначительно отличаются от оптимальных, которые можно было получить при использовании МДП, а значения других показателей качества находятся на приемлемом уровне.

Таким образом, для получения приемлемых результатов (в смысле выбранного показателя качества) при синтезе ИПС можно использовать или метод ветвей и границ или последовательный метод. При этом вычислительные затраты существенно ниже, чем при использовании МДП, а гарантированное распознавание ТС объекта обеспечивается уже после выполнения двух или трех проверок, т.е. количество анализируемых диагностических признаков уменьшается на 70–80%.

На этапе проектирования технического объекта можно синтезировать ИПС анализа его технического состояния, используя различные методы синтеза и различные показатели оптимизации. В зависимости от решаемых задач и условий применения объекта можно использовать для анализа его ТС какую-либо из синтезированных ИПС, которая определяет состав диагностических признаков и последовательность выполнения их проверок с целью решения либо задачи контроля, либо задачи поиска места отказа с заданной глубиной.