

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ «ПО СОСТОЯНИЮ»

В данной статье разработана имитационная статическая модель (ИСМ), предназначенная для прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации сложного технического объекта, зависящих от параметров выбранной стратегии технического обслуживания (ТО). В ИСМ реализованы алгоритмы имитации процессов ТО для трех вариантов стратегий ТО: техническое обслуживание «по состоянию» (ТОС) с постоянной периодичностью контроля; ТОС с адаптивно изменяющейся периодичностью контроля и регламентированного ТО.

Ключевые слова: имитационная статическая модель, техническое обслуживание, моделирование процесса, периодичность контроля.

Вступление. Большинство известных в настоящее время моделей ТО, к сожалению, не позволяют применять их к решению практических задач для реальных сложных технических объектов. В данной диссертационной работе делается попытка для решения таких задач использовать модели ТО, основанные на использовании метода имитационного статистического моделирования. Помимо математических моделей ТО, которые можно уже считать «классическими», существует довольно большое количество работ, посвященных различным подходам к построению моделей ТО, различным аспектам данной проблематики.

В работе [1] сделана одна из первых попыток построения моделей ТО «по состоянию» на основе применения математического аппарата полумарковских случайных процессов. В [2] была построена математическая теория обслуживания сложных технических систем, которая в той или иной мере использовалась в рассмотренных выше классических моделях. Работа [3] посвящена строгим математическим моделям надежности и ТО восстанавливаемых систем, имеющих сложную надежность структуру. Однако, при рассмотрении процессов ТО система представляется без учета ее внутренней структуры, что существенно ограничивает возможности практического применения предложенных моделей ТО.

Кроме того, различные частные вопросы построения моделей ТО рассматриваются также в работах [4, 5].

Основная часть. Моделирование процесса ТОС с фиксированной периодичностью контроля. Суть ТОС с фиксированной периодичностью контроля состоит в том, что в момент контроля производится измерение определяющих параметров всех элементов, потенциально подлежащих обслуживанию. Если измеренное значение нормированного определяющего параметра $u_i(t)$ превышает заданное значение уровня ТО $u_{\text{то}i}$, производится обновление (замена) i -го элемента.

Для моделирования отказов мы используем DN -распределение, являющееся ВФ-моделью отказов. Это значит, что каждый отказ интерпретируется как событие, заключающееся в выходе определяющего параметра элемента за допустимые пределы (значение нормированного определяющего параметра $u_i(t)$ достигло значения 1). Если предположить, что средний ресурс элемента линейно убывает во времени (такое допущение положено в основу ВФ-модели), то величина среднего остаточного ресурса в произвольный момент времени t равна

$$\bar{R}_i(t) = T_{\text{ср}i} - t, \quad (1)$$

где $T_{\text{ср}i}$ - средняя наработка до отказа i -го элемента.

Если в процессе моделирования нам известно, что отказ i -го элемента произойдет в момент времени t_i (это запланированное время отказа), то остаточный ресурс i -го элемента в момент времени t равен

$$R_i(t) = t_i - t. \quad (2)$$

Величина $R_i(t)$ в данном случае является случайной реализацией остаточного ресурса.

Остаточному ресурсу $R_i(t)$ можно поставить в соответствие значение нормированного определяющего параметра, величину которого можно определить следующим образом:

$$u_i(t) = 1 - \frac{R_i(t)}{R_{0i}}, \quad (3)$$

где R_{0i} - случайная реализация полного ресурса i -го элемента, величина которого равна

$$R_{0i}(t) = t_i - t_{0i}. \quad (4)$$

С учетом (1) и (4) вместо (3) можно записать:

$$u_i(t) = \frac{t - t_{0i}}{t_i - t_{0i}}, \quad (5)$$

где t - текущее время контроля;

t_{0i} - времени последнего обновления i -го элемента;

t_i - запланированное время отказа i -го элемента.

Условие достижения определяющим параметром $u_i(t)$ заданного уровня u_{toi} в этом случае запишется в виде следующего неравенства:

$$t \geq t_{0i} + u_{toi}(t_i - t_{0i}). \quad (6)$$

Если обслуживаемый элемент является резервированной группой элементов, то степень близости группы к состоянию отказа определяется величиной

$$u_i(t) = \frac{n_{pi}(t)}{n_i}, \quad (7)$$

где n_i - число элементов в резервированной группе;

$n_{pi}(t)$ - число работоспособных элементов в резервированной группе в момент времени t .

Структурная схема алгоритма моделирования ТО изображена на рис. 1.

Алгоритм выполняется в текущий момент модельного времени t , являющийся временем контроля с фиксированной периодичностью T_k .

Операторы 1, 7 и 8 образуют цикл, в котором производится перебор номеров потенциально обслуживаемых элементов. В операторе 1 одновременно



Рис. 1. Алгоритм моделирования ТОС с фиксированной периодичностью контроля

инициализируются переменные $\tau_{\text{то}}$ и $C_{\text{то}}$, в которых будут формироваться значения продолжительности и стоимости ТО.

Оператор 2 имитирует измерение определяющего параметра i -го элемента. Программно измеренное значение параметра $u_i(t)$ определяется выражением (3) или (5).

Оператор 3 проверяет условие достижения определяющим параметром $u_i(t)$ уровня ТО $u_{\text{то}i}$ (проверяется выполнение неравенства $u_i(t) \geq u_{\text{то}i}$). Если условие выполняется, управление передается операторам 4-6. Оператор 4 имитирует обновление (замену) i -го элемента. Заново генерируется величина случайной наработки до отказа, определяется новое значение запланированного времени отказа i -го элемента, и полученное значение t_i сохраняется в календаре событий. Если элемент представляет собой резервированную группу или последовательное соединение однотипных элементов, то обновляется вся группа.

Оператор 5 запоминает время последнего обновления i -го элемента t_{0i} .

Оператор 6 осуществляет накопление данных в переменных $\tau_{\text{то}}$ и $C_{\text{то}}$:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{то}} &:= \tau_{\text{то}} + \tau_{\text{то}i} + P_{\text{зам}i} \tau_{\text{зам}i}; \\ C_{\text{то}} &= C_{\text{то}} + C_{\text{то}i} + P_{\text{зам}i} C_{\text{зам}i}.\end{aligned}$$

Оператор 9 завершает формирование значений продолжительности ТО $\tau_{\text{то}}$ и стоимости ТО $C_{\text{то}}$ путем добавления к этим значениям затрат времени и стоимости на диагностирование при проведении ТО).

Рассмотренный алгоритм реализует операторы 10-11 основного алгоритма ИСМ в случае ТОС с фиксированной периодичностью контроля. Результатом выполнения алгоритма являются:

1) *действия* – перепланирование моментов времени отказов элементов, подвергшихся ТО, и

2) *информация* – продолжительность ТО $\tau_{\text{то}}$ и затраты стоимости на ТО $C_{\text{то}}$.

Моделирование процесса ТОС с адаптивным изменением периодичности контроля. Идея ТОС с адаптивным изменением периодичности контроля состоит в следующем. В процессе эксплуатации объекта производится накопление и запоминание информации о свойствах определяющих параметров элементов. В качестве основной характеристики определяющего параметра $u_i(t)$ определяется средняя скорость деградации параметра $a_i(t)$, измеренная в момент времени t :

$$a_i(t) = \frac{u_i(t) - u_i(t_{0i})}{t - t_{0i}}, \quad (8)$$

где $u_i(t)$ и $u_i(t_{0i})$ - значения определяющего параметра i -го элемента в моменты времени t и t_{0i} соответственно;

t_{0i} - момент времени последнего обновления (замены) i -го элемента.

Обновление элемента происходит или при его восстановлении после отказа, или при выполнении ТО элемента. Далее будем полагать, что как при восстановлении, так и при ТО происходит полное обновление элемента, следовательно, в (8) $u_i(t_{0i}) = 0$.

Предполагается, что в техническом объекте имеется встроенная автоматизированная система контроля, средствами которой осуществляется измерение определяющих параметров $u_i(t)$, вычисляются оценки средней скорости деградации параметров $\tilde{a}_i(t)$ и сохранение этих оценок в долговременной памяти системы. Оценка $\tilde{a}_i(t_k)$ в некоторый k -й момент времени измерения i -го параметра вычисляется по формуле экспоненциального

сглаживания:

$$\tilde{a}_i(t_k) = \beta \tilde{a}_i(t_{k-1}) + (1 - \beta) a_i(t_k), \quad (9)$$

где $\tilde{a}_i(t_{k-1})$ - оценка скорости, полученная в момент времени t_{k-1} ;

$a_i(t_k)$ - текущее значение средней скорости деградации i -го параметра, измеренное в момент времени t_k ;

β - постоянная сглаживания ($\beta \in [0, 1]$). Чем больше величина β , тем больший вес придается прогнозируемым (априорным) значениям скорости деградации определяющих параметров.

Величина $a_i(t_k)$ вычисляется по измеренному в момент времени t_k значению определяющего параметра $u_i(t_k)$ по формуле:

$$a_i(t_k) = u_i(t_k) / (t_k - t_{0i}). \quad (10)$$

В процессе эксплуатации, по мере накопления статистики, оценка $\tilde{a}_i(t)$ приближается к истинному (неизвестному) значению средней скорости деградации i -го параметра, соответствующей реальному уровню безотказности i -го элемента.

С учетом того, что мы используем модель DN -распределения, для оценки $\tilde{a}_i(t)$ можно записать:

$$\tilde{a}_i(t) = 1 / \tilde{T}_{cpi}(t), \quad (11)$$

где $\tilde{T}_{cpi}(t)$ - оценка средней наработки до отказа i -го элемента, определяемая по накопленной информации измерений определяющего параметра. Чем более длительной будет эксплуатация объекта, тем ближе оценка $\tilde{T}_{cpi}(t)$ будет приближаться к ее истинному значению.

Динамически уточняемые оценки $\tilde{T}_{cpi}(t)$ принимаются как прогноз на предстоящий период времени $> t$.

По полученным оценкам средней наработки до отказа элементов $\tilde{T}_{cpi}(t)$ можно рассчитать прогнозируемую оценку средней наработки до отказа объекта $\tilde{T}_{cp}(t)$. С учетом того, что используется модель DN -распределения наработки. Например, если все элементы объекта соединены в смысле надежности последовательно, то величина $\tilde{T}_{cp}(t)$ рассчитывается по формуле:

$$\tilde{T}_{cp}(t) = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tilde{T}_{cpi}(t)}}, \quad (12)$$

где n - число элементов объекта.

Если в текущий момент времени t_k была получена оценка $\tilde{T}_{cp}(t)$, тогда время до следующего ТО $\tilde{T}_{то}$ определяется по формуле: $\tilde{T}_{то} = \tilde{T}_{то}(t_k) = \gamma \tilde{T}_{cp}(t_k)$, (13)

где γ - коэффициент упреждения, оптимальная величина которого определяется в результате моделирования.

На рис. 2 изображена структурная схема алгоритма, которым моделируется рассмотренный процесс ТО с адаптивным изменением периодичности контроля. Структура этого алгоритма в целом такая же, как и у алгоритма моделирования ТО с фиксированной периодичностью



Рис. 2. Алгоритм моделирования ТОС с адаптивным изменением периодичности контроля

контроля (рис. 1). Поэтому рассмотрим только операторы, отличные от операторов алгоритма рис. 1.

Оператор 3 определяет измеренное текущее значение средней скорости деградации определяющего параметра i -го элемента $a_i(t)$ по формуле (10).

Оператор 8 производит вычисление нового значения накопленной оценки $\tilde{a}_i(t)$ по формуле (11). Полученное новое значение $\tilde{a}_i(t)$ сохраняется в долговременной памяти системы.

Оператор 12 производит расчет времени до следующего ТО по формуле (3.40).

Рассмотренный алгоритм является реализацией оператора 10 основного алгоритма ИСМ в случае ТОС с адаптивно изменяемой периодичностью.

Моделирование процесса регламентированного ТО. Суть стратегии регламентированного ТО заключается в том, что ТО проводятся в заранее запланированные моменты времени с заданным фиксированным объемом работ. При этом сроки и объем работ ТО не зависят от фактического технического состояния объекта. Параметрами регламентированной стратегии ТО являются:

$N_{то}$ - число видов ТО;

$T_{тоj}$ и $E_{тоj}$ - периодичность и объем

ТО j -го вида ($j = \overline{1, N_{то}}$). Объем ТО здесь

задается множеством $E_{тоj}$ элементов, которые подлежат обслуживанию при ТО j -го вида.

Структурная схема алгоритма моделирования регламентированного ТО приведена на рис. 3. Алгоритм выполняется в момент времени t , соответствующий событию ТО j -го вида. Номер вида ТО j уже известен в момент времени t .

Работа алгоритма моделирования регламентированного ТО заключается в следующем. Оператор 1 инициализирует переменные:

i - номер обслуживаемого элемента;

$\tau_{то}$ и $C_{то}$ - переменные, в которых формируются значения продолжительности и стоимости ТО.

Оператор 2 формирует указатель e_i на область памяти, в которой хранится информация о характеристиках i -го элемента из множества $E_{тоj}$ (параметры μ_i и ν_i).

Оператор 3 имитирует обновление i -го элемента: генерирует новое значение случайной

наработки до отказа элемента и календаре событий формирует новое значение запланированного времени отказа t_i .

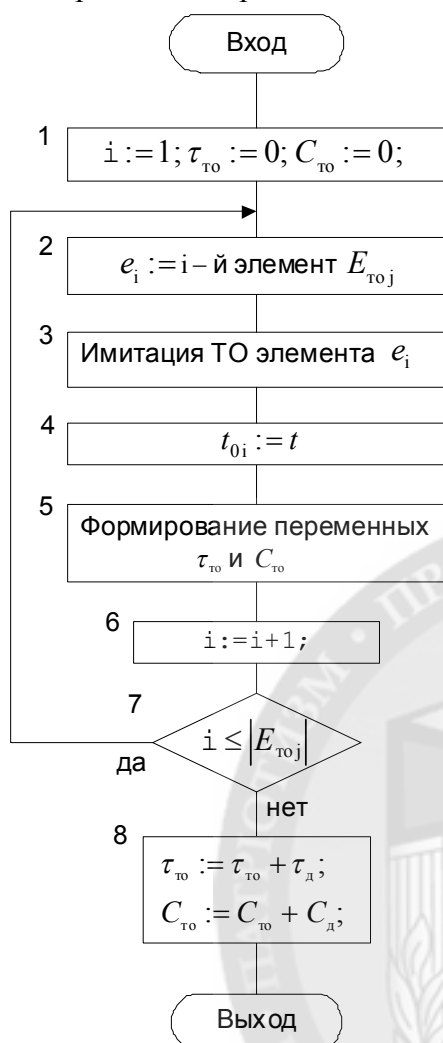


Рис.3. Алгоритм моделирования регламентированного ТО

Оператор 4 запоминает время последнего обновления i -го элемента t_{oi} .

Оператор 5 формирует значения переменных τ_{to} и C_{to} .

Оператор 6 формирует значение номера i следующего элемента в списке E_{toj} . Если список номеров еще не исчерпан, оператор 7 передает управление оператору 2 и процесс моделирования повторяется описанным образом.

Если список номеров элементов E_{toj} исчерпан, выполняется оператор 8, который к значениям переменных τ_{to} и C_{to} добавляет значения продолжительности и стоимости диагностирования при проведении ТО τ_{dj} и C_{dj} . На этом работа алгоритма завершается.

Выводы:

1. Разработана ИСМ, предназначенная для прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации сложного технического объекта, зависящих от параметров выбранной стратегии ТО. В ИСМ реализованы алгоритмы имитации процессов ТО для трех вариантов стратегий ТО:

- ТОС с постоянной периодичностью контроля;
- ТОС с адаптивно изменяющейся периодичностью контроля;
- регламентированного ТО.

Режим моделирования регламентированного ТО введен с целью обеспечения полноты анализа возможных стратегий ТО проектируемого объекта и прогнозирования возможного выигрыша в надежности и стоимости эксплуатации объекта за счет применения стратегий ТОС.

2. В алгоритмы ИСМ «встроена» МБ сложного технического объекта, за счет чего в модели реализована зависимость моделируемого процесса ТО от параметров конструктивной и надежностной структуры объекта. Перед началом моделирования пользователь должен задать подмножество восстанавливаемых и потенциально обслуживаемых элементов путем их выбора (маркирования) в дереве конструктивной структуры объекта. Генерирование случайных значений наработки до отказа отдельных элементов, подчиненных DN -распределению, осуществляется с помощью датчика случайных чисел.

3. Верификация ИСМ производилась следующим образом. Правильность алгоритмов имитации процесса отказов-восстановлений проверялась путем сравнения результатов моделирования с точными расчетными значениями средней наработки на отказ, полученными для отдельно взятого элемента. Полученная таким способом инструментальная точность модели, оцениваемая величиной относительной ошибки, составила менее 1%. Правильность алгоритмов имитации процессов ТО проверялась качественно (по

непротиворечивости получаемых результатов моделирования).

Методическая точность ИСМ определяется такими факторами:

- исходной надежностью объекта (заданными показателями надежности элементов);
- числом реализаций (продолжительностью) моделирования;
- заданной продолжительностью эксплуатации объекта.

Из указанных факторов наиболее существенным является первый. В большинстве практически интересных случаев относительная ошибка результатов моделирования не превышает 10-20%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Барзилович Е.Ю., Куликов Ю.Д., Сергеев Ю.А. Проблемы обеспечения эффективности сложных систем. – Основные вопросы теории и практики надежности. – Мн.: Наука и техника, 1982, С. 155-167.

2. Оценка эффективности технических мероприятий по обеспечению надежности радиоэлектронной аппаратуры. Авт. А.С.Груничев и др. – М.: Сов радио, 1976. – 136 с.

3. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975. – 472 с.

4. Банзак Г.В. База данных о надежности сложных объектов радиоэлектронной техники / К.Ф. Боряк, В.Н. Цыцарев, Г.В. Банзак // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2010. – № 27. – С.89 – 97.

5. Оценка показателей безотказности сложного восстанавливаемого объекта РЭТ при произвольных законах распределения наработки до отказа элементов / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, В.Н. Цыцарев, Г.В. Банзак, В.В. Крыхта // Сучасна спеціальна техніка. – 2010. – № 3(22). – С.86 – 98.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Банзак Г.В.

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ «ПО СОСТОЯНИЮ»

У даній статті розроблена імітаційна статична модель (ИСМ), призначена для прогнозування показників надійності й вартості експлуатації складного технічного об'єкта, що залежать від параметрів обраної стратегії технічного обслуговування (ТО). В ИСМ реалізовані алгоритми імітації процесів ТО для трьох варіантів стратегій ТО: технічне обслуговування «по стану» (ТОС) з постійною періодичністю контролю; ТОС із адаптивне періодичністю, що змінюється, контролю й регламентованого ТО.

Ключові слова: імітаційна статична модель, технічне обслуговування, моделювання процесу, періодичність контролю

Ph.D. Banzak G.V.

ALGORITHMS OF DESIGN OF PROCESS OF TECHNICALSERVICE "ON THE STATE"

In given clause the imitating static model (ISM), intended for forecasting parameters of reliability and cost of operation of the complex technical object, depending from parameters of the chosen strategy of maintenance service (MS) is developed. In ISM algorithms of imitation processes MS for three variants of strategy MS are realized: maintenance service «on condition» (MSC) with constant periodicity of the control; MSC with MS is adaptive a changing periodicity of the control and regulated.

Keywords: imitating static model, maintenance service, modeling of process, periodicity of the control