

УДК 519.681

С.В. Кадигроб¹, О.В. Серая²¹ КП Производственно-технологическое предприятие «Вода», Харьков² Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ПРИОРИТЕТОВ

Рассмотрена задача отыскания рациональной стратегии технического обслуживания для сложных систем, элементы которых функционируют в разных условиях. Показано, что учет различий в режимах и условиях эксплуатации приводит к возникновению приоритетов в обслуживании одних элементов перед другими. Задача оптимизации технического обслуживания в такой системе сформулирована как трехиндексная булева, которая сведена к двухиндексной.

Ключевые слова: сложная система, техническое обслуживание, учет условий и режимов эксплуатации.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Эффективность функционирования сложных технических систем (СТС) существенно определяется совершенством методов их технического обслуживания (ТО) и ремонта. Качество любого метода обслуживания и ремонта определяется тем, насколько полно он обеспечивает соответствие между объективно существующим процессом изменения технического состояния (ТС) СТС и процессом их технической эксплуатации, характеризуемым последовательной во времени сменой различных состояний: применения по назначению, видов обслуживания и ремонта, хранения и т.д.

Традиционный планово-предупредительный метод обслуживания и ремонта, основанный на выполнении профилактических работ определенных объемов через заранее запланированные интервалы времени или наработки независимо от состояния СТС обеспечивает слабое взаимодействие между указанными процессами. Более тесную связь между ними, когда характер и параметры процесса эксплуатации определяются в соответствии с техническим состоянием СТС, обеспечивают методы обслуживания и ремонта по состоянию [1]. Эти методы, как и традиционный метод обслуживания и ремонта по наработке, по своей природе являются планово-предупредительными. Однако планируемыми здесь являются лишь объемы работ по техническому диагностированию систем и периодичность их выполнения. Предупредительный же характер методов обеспечивается путем постоянного наблюдения в процессе эксплуатации за уровнем надежности, а в ряде случаев (при наличии достаточной контролепригодности) и техническим состоянием функциональных систем и изделий, из которых состоит СТС, с целью выявления предотказового их состояния с последующей заменой или восстановлением.

Большое разнообразие возможных методов обслуживания и ремонта по состоянию можно объединить в две основные группы [2]: с контролем уровня надежности и с контролем параметров системы. В первом случае задача обслуживания и ремонта сводится к управлению уровнем надежности совокупности объектов эксплуатации (ОЭ), а во втором – к управлению техническим состоянием каждой конкретной системы. Обслуживание и ремонт по состоянию с контролем уровня надежности основаны на оперативном сборе, обработке и анализе данных о надежности и эффективности эксплуатации однотипных СТС и выработке решений о необходимых объемах профилактических работ или сроках проведения ремонта для всей совокупности систем или для определенной их группы.

Требования к уровню надежности СТС в процессе их эксплуатации очень высоки. В процессе эксплуатации в результате действия механических, тепловых и электрических нагрузок, а также воздействия окружающей среды в системах неизбежно происходят различного рода изменения, которые в конечном счете приводят к несоответствию технического состояния ОЭ совокупности предъявляемых к ним требований.

Все многообразие взаимосвязанных факторов, вызывающих изменения технического состояния ОЭ в процессе эксплуатации, условно может быть разделено на две большие категории: субъективные и объективные. К объективным факторам относятся факторы, влияние которых обусловлено внешними воздействиями окружающей среды, внутренними процессами, протекающими в системе и ее элементах. К субъективным факторам относятся факторы, зависящие исключительно от действий обслуживающего персонала.

Известно большое число факторов окружающей среды, влияющих на техническое состояние

СТС. Основными из них являются температура и влажность окружающего воздуха, атмосферное давление, биологические факторы (плесень), атмосферная коррозия, солнечная радиация, контактная коррозия, запыленность окружающего воздуха, ветер.

Эти факторы и многие другие необходимо учитывать при организации технического обслуживания СТС.

Вопросу разработки математических моделей, позволяющих учитывать условия, в которых происходит функционирование, посвящено большое число работ. Отметим следующие [3 – 6]. Нужно иметь в виду, что в большинстве работ, посвященных разработке различных моделей учета условий и режимов эксплуатации, эти проблемы обсуждаются с точки зрения влияния на один из основных и традиционно наиболее используемый показатель технического состояния – безотказность ОЭ. Модели эволюции контролируемых параметров, определяющих ТС, и модели, описывающие процесс изменения показателей надежности, однотипны. Поэтому, по аналогии с общепринятым термином "модели надежности" будем использовать термин "модель технического состояния" для описания законов изменения любых параметров технического состояния ОЭ.

В [7] проведен обзор ряда моделей учета условий эксплуатации при оценке надежности аппаратуры и предложена общая методика получения соответствующих моделей. В соответствии этой методикой показатель надежности аппаратуры $R(\varepsilon)$ определяют по результатам испытаний, проведенных в различных режимах ε , а затем полученные значения $R(\varepsilon)$ аппроксимируют подходящей аналитической зависимостью $f(\varepsilon)$ от условий эксплуатации

$$R(\varepsilon) = Cf(\varepsilon), \quad \varepsilon \in E,$$

где C – оцениваемая константа; f – некоторая функция; E – множество режимов содержания или условий эксплуатации.

Это соотношение должно:

учитывать уже установленные теоретические представления о механизмах отказовых явлений, выраженные некими зависимостями;

позволять учитывать еще не установленные зависимости.

Этим условиям удовлетворяет представление $R(\varepsilon)$ в виде регрессионной зависимости возможно большей общности, причем коэффициенты регрессии определяются по статистическим данным. Подобная идея реализуется, например, в виде многофакторного регрессионного полинома. Традиционно используемая форма аналитического представления такого полинома, линейного по параметрам, но нелинейного по факторам, имеет вид

$$R(\varepsilon) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i f_i + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 > i_1}^n b_{i_1 i_2} f_{i_1 i_2} + \dots + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 > i_1}^n \dots \sum_{i_d > i_{d-1}}^n b_{i_1 i_2 \dots i_d} f_{i_1 i_2 \dots i_d}.$$

Здесь (f_1, f_2, \dots, f_m) – набор факторов, задающих условия и режим эксплуатации. Общепринято, что одним из наиболее информативных показателей надежности является интенсивность отказов. При этом конкретный набор факторов для конкретных условий и режима эксплуатации ε_j системы определяет интенсивность $\lambda(\varepsilon_j)$ ее отказов. Значения интенсивности отказов в зависимости от условий эксплуатации СТС используются для решения задач оптимизации стратегии технического обслуживания.

Основным содержанием технического обслуживания любой СТС является контроль технического состояния, занимающий до 90% времени, отводимого на ТО. Поэтому задача выработки стратегии ТО, определяющей сроки и объем обслуживания, сводится, по существу, к выбору соответствующей стратегии контроля технического состояния, то есть назначению периодичности проведения проверок и распределению полноты контроля подсистем СТС по видам контроля.

Эта задача легко решается для каждой конкретной системы. Однако она существенно усложняется, когда планируется обслуживание совокупности объектов, эксплуатируемых в разных условиях, что может привести к существенным различиям в интенсивности их старения.

Цель статьи. Поставим задачу организации технического обслуживания для сложных многоэлементных независимо функционирующих систем.

Постановка задачи

Сложная многоэлементная система состоит из совокупности территориально распределенных объектов, каждый из которых эксплуатируется в своих условиях. Пусть j -й объект системы эксплуатируется в условиях ε_j , $j = 1, 2, \dots, n$, и соответствующая этим условиям интенсивность отказов равна $\lambda(\varepsilon_j)$. Тогда вероятность безотказной работы этого объекта на интервале $[0, T]$ определяется соотношением

$$P_j(0, T) = \exp \left\{ - \int_0^T \lambda(\varepsilon_j) dt \right\}.$$

Предположим далее, что техническое обслуживание объектов выполняется специально обученными бригадами, оснащенными соответствующим оборудованием и материально-техническими средствами. Будем считать, что средняя продолжитель-

ность обслуживания любого объекта любой из бригад равна T_0 .

Вместе с тем, следует учесть конструктивные особенности каждого из объектов, различия в условиях их эксплуатации, а также разный уровень подготовки, опыт и накопленные навыки проведения работ по техническому обслуживанию для разных бригад. Тогда можно оценить эффективность назначения бригад для выполнения работ на разных объектах, введя матрицу (P_{ij}) , где P_{ij} – вероятность выполнения технического обслуживания i -й бригадой на j -м объекте за время T_0 , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Пусть к моменту начала очередного планового периода назначения бригад для проведения обслуживания известны продолжительности безотказной работы для каждого из объектов, то есть задан набор (T_1, T_2, \dots, T_n) , где T_j – продолжительность безотказной работы j -го объекта после предыдущего обслуживания или ремонта. Если обслуживание j -го объекта предполагается провести в $(k+1)$ -м цикле назначений бригад, то вероятность безотказной работы j -го объекта к моменту начала обслуживания будет равна

$$P_j(0, T_j + kT_0) = \exp \left\{ - \int_0^{T_j + kT_0} \lambda(\varepsilon_j) dt \right\}.$$

Это соотношение, по существу, определяет меняющийся приоритет для каждого из объектов в зависимости от условий его эксплуатации и времени, прошедшего после проведения предыдущего технического обслуживания.

При этом можно ввести совокупность комплексных показателей эффективности назначения бригад для проведения технического обслуживания (c_{ijk}) , где $c_{ijk} = P_j(0, T_j + kT_0)P_{ij}$ – есть вероятность нормального функционирования j -го объекта от момента предыдущего до очередного обслуживания в течение временного интервала длиной $T_j + kT_0$ после проведения обслуживания i -й бригадой, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, m$.

Основные результаты

Рассмотрим задачу рациональной организации технического обслуживания системы с учетом динамически меняющихся приоритетов. С этой целью введем набор булевых индикаторов

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-ая бригада планируется} \\ & \text{для выполнения обслуживания на} \\ & j\text{-м объекте в } k\text{-м временном} \\ & \text{интервале;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда можно сформулировать задачу отыскания набора $X = (x_{ijk})$, максимизирующего

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ijk} x_{ijk} \quad (1)$$

и удовлетворяющего ограничениям:

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^m x_{ijk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Критерий (1) имеет ясный смысл – это среднее число нормально функционирующих объектов после проведения планового периода назначений. Ограничения (2) означают, что каждая из бригад на любом временном интервале $[T_0(k-1), T_0k]$ будет назначена для проведения технического обслуживания на каком-либо из объектов. Ограничения (3) обеспечивают назначение какой-либо из бригад в каком-либо временном интервале для проведения обслуживания для каждого из объектов.

Рассмотрим метод решения задачи (1) – (3).

Задача (1) – (3) является трехиндексной булевой аксиально-планарной задачей назначения. Технология непосредственного точного решения подобных задач отсутствует (за исключением, понятно, полного перебора). Однако, эта задача может быть преобразована таким образом, чтобы обеспечить возможность ее решения. Введем новый индекс

$$l = (k-1)m + i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Тогда трехиндексная матрица (c_{ijk}) размера $(m \times n \times m)$ преобразуется в двухиндексную матрицу (c_{lj}) размера $(m^2 \times n)$. Аналогично этому трехиндексная матрица (x_{ijk}) преобразуется в двухиндексную (x_{lj}) . Понятно, что общее число элементов всех этих матриц во всех случаях одинаково и равно m^2n , однако структура двухиндексных матриц (c_{lj}) и (x_{lj}) позволяет переформулировать задачу следующим образом: найти набор (x_{lj}) , максимизирующий

$$\Phi(x) = \sum_{l=1}^{m^2} \sum_{j=1}^n c_{lj} x_{lj} \quad (5)$$

и удовлетворяющий ограничениям:

$$\sum_{j=1}^n x_{lj} = 1, \quad l = 1, 2, \dots, m^2; \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^{m^2} x_{lj} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (7)$$

$$x_{lj} = \{0;1\}, \quad l = 1, 2, \dots, m^2, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

При этом получена несимметричная задача назначения с m^2 строками и n столбцами. Эта задача допускает возможность приведения ее к стандартной форме. С этой целью введем $(m^2 - n)$ дополнительных фиктивных объектов с номерами $(n+1, n+2, \dots, m^2)$, для которых эффективность обслуживания любой из бригад будем считать равной нулю, то есть положим

$$c'_{lj} = \begin{cases} c_{lj}, & j = 1, 2, \dots, n; \\ 0, & j = n+1, n+2, \dots, m^2. \end{cases}$$

Тогда целевая функция (5) и ограничения (6) – (8) преобразуются к виду:

$$\Phi'(x) = \sum_{l=1}^{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} c'_{lj} x_{lj}; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{m^2} x_{lj} = 1, \quad l = 1, 2, \dots, m^2; \quad (10)$$

$$\sum_{l=1}^{m^2} x_{lj} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m^2; \quad (11)$$

$$x_{lj} = \{0;1\}, \quad l = 1, 2, \dots, m^2, \quad j = 1, 2, \dots, m^2. \quad (12)$$

Задача (9) – (12) является обычной задачей назначения, которая точно решается известными методами (венгерский алгоритм). В полученном в результате решения наборе (x_{lj}) , естественно используются только те индикаторы назначения, для которых $j = 1, 2, \dots, n$. При этом индекс l для ненулевой переменной x_{lj} позволяет однозначно определить соответствующие номера бригады и интервала назначения по формулам:

$$i = l - m \text{Ent} \left(\frac{l}{m} \right); \quad k = \frac{l-i}{m} + 1,$$

где $\text{Ent}(z)$ – символ выделения целой части числа z .

Таким образом, задача (1) – (3) решена.

Выводы

Предложена методика организации технического обслуживания сложной системы, территориально распределенные элементы которой эксплуатируются в разных условиях. Следствием этого являются существенные различия в интенсивности их старения и соответствующих законах изменения вероятностей безотказной работы. Возникающая при этом нетривиальная задача отыскания рациональной стратегии технического обслуживания формулируется как трехиндексная булева аксиально-планарная. Показано, что эта задача сводится к двухиндексной задаче назначения, решаемой известными методами.

Список литературы

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высшая школа, 1982. – 232 с.
2. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт техники по состоянию / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович. – М.: Транспорт, 1980. – 229 с.
3. Барзилович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович, В.А. Капитанов. – М.: Сов. радио, 1971. – 271 с.
4. Коваленко И.Н. Исследования по анализу надежности сложных систем / И.Н. Коваленко. – К.: Наук. думка, 1975. – 209 с.
5. Лавриненко В.Ю. Основы эксплуатации аппаратуры / В.Ю. Лавриненко. – М.: Высш. школа, 1978. – 320 с.
6. Червоный А.А. Надежность сложных систем / А.А. Червоный, В.И. Лукьяненко, Л.В. Котин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
7. Вопросы математической теории надежности / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.

Поступила в редколлегию 17.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Г. Раскин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ БАГАТОЕЛЕМЕНТНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ПРІОРИТЕТІВ

С.В. Кадигроб, О.В. Сіра

Розглянуто задачу відшукування раціональної стратегії технічного обслуговування для складних систем, елементи яких функціонують в різних умовах. Показано, що облік відмінностей в режимах і умовах експлуатації приводить до виникнення пріоритетів в обслуговуванні одних елементів перед іншими. Задачу оптимізації технічного обслуговування в такій системі сформульовано як трьохіндексну булеву, яка зведена до двохіндексної.

Ключові слова: складна система, технічне обслуговування, облік умов і режимів експлуатації.

ORGANIZATION OF TECHNICAL MAINTENANCE OF THE MULTIELEMENTS SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF PRIORITIES

Kadigrob S.V., Sira O.V.

The task of searching for of rational strategy of technical service is considered for the difficult systems the elements of which function in different terms. It is rotined that the account of distinctions in the modes and external environments results in the origin of priorities in maintenance of one elements before other. The task of optimization of technical service in such system is formulated as the three-index is boole, which is taken to twoindex.

Keywords: difficult system, technical service, account of terms and modes of exploitation.