

И. В. ЛЫСЕНКО, А. И. ПТУШКИН, Б. В. СОКОЛОВ

МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОМПЛЕКТА ЗИП НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Обсуждается проблема расширения аналитических возможностей методик синтеза комплектов ЗИП сложных технических объектов. Предложена методика синтеза, основанная на применении метода динамического программирования. Особенности методики и ее аналитические возможности иллюстрируются численным примером.

Ключевые слова: синтез комплекта ЗИП, головной разработчик, динамическое программирование.

Введение. Одной из важных задач логистического анализа является снижение количества неудачных проектных решений, влияющих на эффективность эксплуатации изделия. В частности, методики логистического анализа предназначены для наглядной демонстрации заказчику головным разработчиком изделия того, что все меры, обеспечивающие сокращение стоимости его эксплуатации при сохранении заданных значений целевых показателей качества функционирования, приняты.

Существенным фактором, влияющим на стоимость эксплуатации и готовность изделия к применению, является его укомплектованность запасными частями, инструментами и принадлежностями (ЗИП). Однако существующие методики расчета комплекта ЗИП характеризуются слабыми аналитическими, в том числе доказательными, возможностями, ибо позволяют получить только „точечное“ решение для каждой составной части изделия, а не для изделия в целом. Совокупность таких решений не только не гарантирует оптимальность использования денежных средств на комплектование ЗИП изделия, но и не позволяет главному разработчику принять обоснованное решение по корректировке комплектов ЗИП, предложенных разработчиками составных частей (оборудования) изделия.

В отличие от существующих, в настоящей статье предлагается методика синтеза оптимального комплекта ЗИП, основанная на применении метода динамического программирования [см. лит.]. Эта методика позволяет вместо „точечных“ решений для составных частей изделия получить спектр решений как прямой, так и обратной задачи оптимального комплектования ЗИП изделия в целом, что даст возможность главному разработчику глубоко проанализировать предлагаемые разработчиками составных частей изделия варианты комплектования ЗИП и обоснованно предложить заказчику наилучший в сложившихся условиях вариант.

Постановка задачи. После определения коэффициента готовности изделия при наличии комплектов ЗИП оборудования, предложенных их разработчиками, перед главным разработчиком может возникнуть необходимость решения следующих вопросов:

- если коэффициент готовности изделия (K_r) равен требуемому значению ($K_{r,тр}$), то необходимо выяснить возможность обеспечения изделия комплектом ЗИП меньшей стоимости;
- если $K_r > K_{r,тр}$, то решается задача определения комплекта ЗИП минимальной стоимости, который обеспечит требуемое значение коэффициента готовности;
- если $K_r < K_{r,тр}$, то выясняется возможность обеспечения требуемого коэффициента готовности изделия с помощью использования другого комплекта ЗИП с минимальным увеличением его стоимости.

Ответы на эти вопросы могут быть получены в результате решения задач синтеза оптимального комплекта ЗИП с применением метода динамического программирования.

Задача синтеза оптимального комплекта ЗИП формулируется следующим образом.

Дано: N — количество образцов оборудования, каждому из которых присвоен индекс $j = \overline{1, N}$; n_j — количество групп однотипных элементов, подлежащих замене в случае их отказа, каждой из которых присвоен индекс $i = \overline{1, n_j}$; T_{0ij} — среднее время безотказной работы ij -й группы однотипных элементов; T_{vij} и T'_{nij} — среднее время восстановления j -го оборудования в случае отказа элемента i -го типа при наличии ЗИП и среднее время простоя в случае отсутствия ЗИП соответственно; λ_{ij} — интенсивность отказов элементов ij -го типа, l_{ij} и c_{ij} — их количество и стоимость соответственно.

Найти

$$\mathbf{m}^\circ \in \arg \max_{\mathbf{m}} \prod_{j=1}^N K_{rj}(\mathbf{m}_j(c_j))$$

при условии

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} m_{ij} c_{ij} \leq C,$$

где знак „ \circ “ соответствует оптимальному значению параметра; m_{ij} — количество запасных элементов i -го типа j -го оборудования; K_{rj} — коэффициент готовности j -го оборудования; c_j — стоимость комплекта ЗИП j -го оборудования;

$$\mathbf{m}^\circ = [\mathbf{m}_1^\circ, \dots, \mathbf{m}_j^\circ, \dots, \mathbf{m}_N^\circ]^T; \quad \mathbf{m}_j^\circ = [m_{1j}^\circ, \dots, m_{ij}^\circ, \dots, m_{n_j j}^\circ]^T.$$

Так как функциональные зависимости, которые рассматриваются в данных задачах, являются сепарабельными, для их решения целесообразно применить метод динамического программирования.

Решение этой задачи будем проводить в два этапа. На первом этапе определим функции $K_{rj}(\mathbf{m}_j(c_j))$. Для этого необходимо решить следующую задачу:

найти

$$\mathbf{m}_j^\circ \in \arg \max_{\mathbf{m}_j} \prod_{i=1}^{n_j} K_{\Gamma ij}(\mathbf{m}_{ij}) \quad (1)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^{n_j} m_{ij} c_{ij} \leq C_j. \quad (2)$$

Решение задачи (1), (2) позволяет построить образы множества Парето в пространстве параметров $K_{\Gamma j}(\mathbf{m}_j^\circ)$, C , т. е. дискретные функции $K_{\Gamma j}^\circ(C_j(\mathbf{m}_j^\circ))$, знание которых дает возможность перейти к решению задачи второго этапа: определению варианта оптимального распределения средств на комплектование ЗИП по видам оборудования. Эта задача формулируется следующим образом:

найти

$$\mathbf{D}^\circ \in \arg \max_{\mathbf{D}} \prod_{j=1}^N K_{\Gamma j}(C_j)$$

при условии

$$\sum_{j=1}^N C_j^{\max} \leq C,$$

где $\mathbf{D} = [C_1, C_2, \dots, C_N]^T$.

Рассмотрим алгоритмы решения этих задач методом динамического программирования.

Алгоритм решения задачи первого этапа. Для первого шага алгоритма функциональное уравнение Беллмана имеет вид

$$K_{\Gamma 1j}^{\max}(\xi_{1j}) = \max_{m_{1j}} K_{\Gamma 1j}(m_{1j}(\xi_{1j})),$$

а для последующих шагов вычислений используется рекуррентное соотношение

$$K_{\Gamma ij}^{\max}(\xi_{ij}) = \max_{m_{ij}} \left\{ K_{\Gamma ij}(m_{ij}) K_{\Gamma(i-1)j}^{\max}(\xi_{ij} - c_{ij} m_{ij}) \right\}, \quad i = \overline{2, n_j},$$

где $\xi_{ij} = 0, \Delta \xi_{ij}, 2\Delta \xi_{ij}, \dots, \xi_{ij}^{\max}$; $\Delta \xi_{ij} = \Delta C$ — шаг решения задачи, определяющий точность ее решения.

Для каждого значения ξ_{ij} вычисляются максимальные значения коэффициента готовности i групп однотипных элементов j -го оборудования и соответствующее им условно-оптимальное количество запасных элементов i -й группы:

$$\tilde{m}_{ij}(\xi_{ij}) \in \arg \max_{m_{ij}} K_{\Gamma ij}(m_{ij}) K_{\Gamma(i-1)j}^{\max}(\xi_{ij} - c_{ij} m_{ij}), \quad \tilde{m}_{n_j j}(C_j) = m_{n_j j}^\circ.$$

Оптимальное количество ЗИП для остальных групп однотипных элементов определяется в результате обратного хода по формуле

$$m_{(n_j-k)j}^\circ = \tilde{m}_{n_j j} \left(\xi_{(n_j-k)j} = C_j - \sum_{\ell=0}^{k-1} m_{(n_j-\ell)j}^\circ c_{(n_j-\ell)j} \right), \quad k = \overline{1, n_j - 1}.$$

Алгоритм решения задачи второго этапа. Для первого шага алгоритма решения этой задачи функциональное уравнение Беллмана имеет вид

$$K_{r1}^{\max}(\xi) = K_{r1}(\xi), \quad \xi = 0, \Delta\xi, 2\Delta\xi, \dots, C,$$

а для последующих шагов вычислений используется рекуррентное соотношение

$$K_{ri}^{\max}(\xi) = \max_{C_j} \left\{ K_{rj}(c_j) K_{r(j-1)}^{\max}(\xi - c_j) \right\}, \quad j = \overline{2, N}.$$

На последнем шаге условно-оптимальное значение $\tilde{c}_N(C) = c_N^\circ$. Выполнив операции обратного хода, получим $c_{N-1}^\circ, c_{N-2}^\circ, \dots, c_1^\circ$. Затем для каждого c_j , используя результаты решения задачи (1), (2), также выполняем операции обратного хода и получаем

$$\mathbf{m}_j^\circ = \left[m_1^\circ, m_2^\circ, \dots, m_i^\circ, \dots, m_{n_j}^\circ \right]^T \quad \text{и в итоге } \mathbf{m}^\circ.$$

Пример. Предположим, что изделие (корабль) имеет в своем составе оборудование трех наименований ($N = 3$), каждое из которых имеет три группы однотипных элементов.

Исходные данные, необходимые для определения достаточности предложенного разработчиками оборудования комплекта ЗИП, зададим матрицами

$$\|m_{ij}\| = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 4 \\ 1 & 3 & 2 \end{vmatrix}, \quad \|c_{ij}\| = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 \\ 3 & 4 & 1 \end{vmatrix}, \quad \|l_{ij}\| = \begin{vmatrix} 6 & 3 & 4 \\ 5 & 2 & 7 \\ 8 & 1 & 10 \end{vmatrix},$$

$$\|\lambda_{ij}\| = \begin{vmatrix} 5 & 1 & 8 \\ 4 & 2 & 1 \\ 3 & 9 & 6 \end{vmatrix} \cdot 10^{-5}, \quad \|T_{vij}\| = \begin{vmatrix} 2 & 10 & 20 \\ 5 & 3 & 8 \\ 24 & 15 & 6 \end{vmatrix}, \quad T'_{nij} = 10T_v.$$

Для этих исходных данных и времени $\tau = 3000$ ч, в течение которого необходимо обеспечить готовность изделия, значение K_r при наличии комплекта ЗИП $\|m_{ij}\|$, предлагаемого разработчиками оборудования, определим по формуле

$$K_r = \prod_{j=1}^N K_{rj} = \prod_{j=1}^N \prod_{i=1}^{n_j} K_{rij},$$

где $K_{rij} = \frac{T_{0ij}}{T_{0ij} + T_{nij}}$, $T_{nij} = r_{ij}(m_{ij}, \tau) T_{vij} + (1 - r_{ij}(m_{ij}, \tau)) \cdot T'_{nij}$; здесь $r_{ij}(m_{ij}, \tau) = e^{-l_{ij} \lambda_{ij} \tau} \sum_{v=1}^{m_{ij}} \frac{(l_{ij} \lambda_{ij} \tau)^v}{v!}$ —

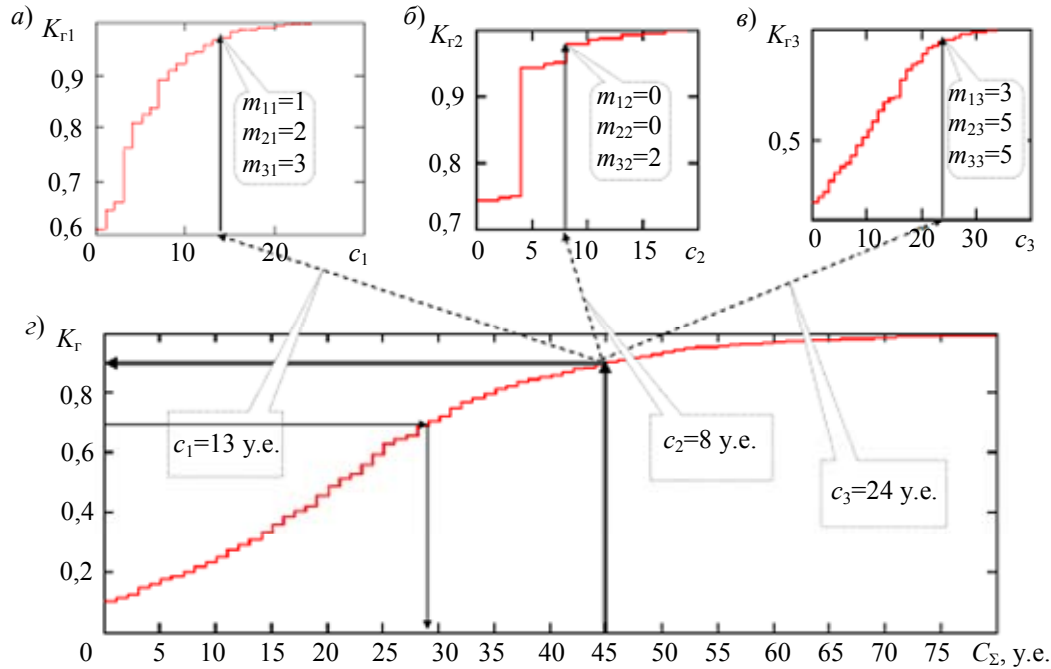
вероятность того, что число отказов элементов i -го типа j -го оборудования за время τ не превысит число имеющихся в наличии запасных элементов m_{ij} .

В результате получаем $K_r = 0,731$ при суммарной стоимости комплекта ЗИП $C_\Sigma = 45$ у.е. (далее результаты всех расчетов приводятся в условных единицах стоимости).

После определения коэффициента готовности корабля головной разработчик может получить ответы на сформулированные в постановке задачи вопросы, для чего, как отмечалось ранее, необходимо последовательно решить задачи первого и второго этапов. Результаты их решения, соответствующие приведенным алгоритмам и представленные графически на рисунке, $a—z$, позволяют проверить, рационально ли сформирован комплект ЗИП изделия.

Анализ результатов (см. рисунок, *з*) показывает, что материальные средства могут быть израсходованы гораздо эффективнее; т.е. при стоимости комплекта ЗИП $C_{\Sigma} = 45$ у.е. (см. пример) можно обеспечить коэффициент готовности $K_r = 0,902$ (а не $K_r = 0,731$), если иначе распределить средства между ЗИП оборудования. Если головного разработчика устраивает значение $K_r = 0,707$, то в этом случае потребуется всего лишь 29 у.е.

Результаты распределения средств по видам оборудования и соответствующие им значения для комплектов ЗИП показаны на рисунке, *а—в*.



Отметим особенности предложенной методики, выгодно отличающие ее от других методов расчета комплекта ЗИП.

1. Можно доказать, что полученное решение действительно является наилучшим.
2. Возможность получения спектра решений позволяет обосновать необходимую стоимость комплекта ЗИП.
3. Комплект ЗИП формируется в целях определения оптимальной стоимости корабельного комплекта ЗИП в целом, обеспечивающего требуемое значение коэффициента готовности корабля, а не отдельных видов оборудования. В связи с этим расчет корабельного комплекта ЗИП должен производиться непосредственно головным разработчиком корабля, а не поставщиками оборудования, при этом поставщики должны представить головному разработчику все необходимые для расчета данные.
4. Предложенный метод гарантирует нахождение абсолютного, а не локального экстремума, если задача многоэкстремальна, и, кроме того, позволяет найти все множество решений задачи, при которых имеет место один и тот же экстремум; так, в рассмотренном примере при $C_{\Sigma} = 65$ у.е. можно обеспечить $K_r = 0,978$, используя три различных варианта ЗИП. Наличие таких вариантов позволяет привлечь к рассмотрению, кроме стоимости комплекта ЗИП и обеспечиваемого им коэффициента готовности, и другие показатели, характеризующие этот комплект, например, требуемый объем помещения для размещения ЗИП.
5. Метод позволяет производить распараллеливание вычислений, что может оказаться полезным при решении крупномасштабных задач.

Статья подготовлена по результатам исследований, проведенных при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-08-01016, 11-08-00767, 11-08-01289-а, 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702,

13-08-01250); программы фундаментальных исследований Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.11); программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI/184/2011/14 (2012—2013 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования / Пер. с англ.; Под ред. А. А. Первозванского. М.: Наука, 1965.

Сведения об авторах

- Игорь Васильевич Лысенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория информационно-аналитических технологий в экономике; E-mail: ilyas@iias.spb.su
- Анатолий Иванович Птушкин** — канд. техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра организации эксплуатации вооружения и военной техники, Санкт-Петербург; E-mail: anatoly.ptushkin2011@yandex.ru
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, зам. директора по научной работе; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована кафедрой
СПИИРАН

Поступила в редакцию
15.03.10 г.