

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

А.Б. Чернов

(представил д.т.н. проф. Б.Н. Ланецкий)

Предлагается метод и алгоритм решения задачи оптимизации состава рабочих эталонов для подвижных метрологических лабораторий, обеспечивающего метрологическое обслуживание заданной номенклатуры средств измерительной техники. В качестве критерия оптимальности принимается минимум суммарной стоимости эталонов, а ограничениями – их суммарные объем и масса, а также номенклатура поверяемых средств измерительной техники.

Создание парка подвижных метрологических лабораторий (ПМЛ) для метрологического обслуживания средств измерительной техники (СИТ) в местах их эксплуатации требует решения комплекса задач. Одной из них является задача оптимизации состава рабочих эталонов (РЭ) ПМЛ, обеспечивающее метрологическое обслуживание заданной номенклатуры СИТ. В условиях жестких ограничений ассигнований на разработку ПМЛ с одной стороны, и необходимость обслуживания необходимой номенклатуры СИТ с другой стороны, такая постановка задачи достаточно актуальна.

В качестве критерия оптимальности можно использовать минимум суммарной стоимости рабочих эталонов, входящих в состав рабочих мест ПМЛ. При этом в качестве ограничений выступают суммарные масса и объем, которые не должны превосходить заранее заданных значений. Кроме того, необходимо, чтобы обеспечивалось метрологическое обслуживание (МОб) заданной номенклатуры СИТ. Такая постановка задачи возникает при предъявлении требований к создаваемым и модернизируемым ПМЛ.

При формализации такой задачи можно использовать подход, основанный на анализе так называемых функциональных максимально – избыточных схем (ФМИС) поверки СИТ [1]. Для каждого типа СИТ с учетом особенностей его поверки составляется ФМИС поверки. В нее включаются все РЭ, которые могут быть использованы для поверки и определяются возможности их взаимозамены. В формализованном виде эти схемы могут быть представлены логической формулой. Для решения поставленной задачи (МОб определенной номенклатуры СИТ) необходимо использовать общую схему поверки, составляемую путем соедине-

ния частных схем через операцию конъюнкции. В этом случае формальная запись условия выполнения поверки СИТ имеет вид:

$$\bigcap_{i=1}^L f_i(\mathbf{X}) = 1, \quad (1)$$

где L - количество типов СИТ для которых планируется проведение Моб;

$f_i(\mathbf{X})$ - логическая функция, определяющая возможность проведения Моб i -го типа СИТ и принимающая одно из двух значений $\{0,1\}$. Если проведение поверки возможно, то функция принимает значение 1 , в противном случае – 0 ;

\mathbf{X} – множество РЭ, входящих в состав ПМЛ.

В формализованном виде задачу можно представить следующим образом:

$$C = \sum_{i=1}^M c_i \cdot x_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

где C – суммарная стоимость РЭ, входящих в состав ПМЛ;

M – общее количество типов РЭ;

c_i - стоимость образца РЭ i -го типа;

x_i - переменная, определяющая количество образцов РЭ i -го типа в составе ПМЛ и принимающая целые неотрицательные значения.

При этом должны соблюдаться условие выполнения всех операций (МГО) для рабочих эталонов лаборатории:

$$\sum_{i=1}^M m_i \cdot x_i \leq M_{\text{доп}}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M v_i \cdot x_i \leq V_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где m_i - масса образца РЭ i -го типа;

$M_{\text{доп}}$ – допустимая суммарная масса РЭ в ПМЛ;

v_i – объем для образца i -го типа;

$V_{\text{доп}}$ - допустимый суммарный объем РЭ в ПМЛ.

Масса образцов РЭ рассчитывается при их полной укомплектованности. Объем РЭ определяется с учетом возможности совместного размещения. Ограничения должны быть заранее установлены исходя из возможностей средства подвижности лаборатории. Кроме ограничений (3), (4) возможно введение дополнительного ограничения на суммарную потребляемую мощность РЭ (при этом необходимо учесть и потребление образцов СИТ), однако при условии питания от внешней сети это ограничение не является критичным.

В [1] рассматривался подход, при котором анализируется соотношение (1) путем приведения его к графовой структуре. Однако, при увеличении количества обслуживаемых типов средств измерительной техники значительно увеличивается объем вычислительных операций.

Если вместо непосредственного анализа (21) проводить анализ состава РЭ, то задачу определения оптимального состава РЭ можно сформулировать как задачу дискретной оптимизации. Предполагая, что x_k может принимать одно из двух значений $\{0,1\}$, задачу можно представить как задачу **0 - 1** программирования (или решаемую в булевых переменных). В исключительных случаях предусматривается возможность использования одновременно нескольких однотипных РЭ. С этой целью каждый последующий образец необходимо рассматривать как отдельный тип, обозначаемый своей переменной x_k . То есть, осуществляется введение дополнительных переменных, что целесообразно только в обоснованных случаях, так как это увеличивает трудоемкость решения.

Наиболее эффективным методом решения задачи является аддитивный алгоритм [2]. В соответствии с этим алгоритмом на каждом уровне рассмотрения множество решений делится на два непересекающихся подмножества:

- 1) подмножество, в котором присутствует определенный тип РЭ;
- 2) подмножество, в котором этот тип РЭ отсутствует.

Эта процедура допускает применение двух альтернативных подходов к решению обусловленных двойственностью подобных задач [2]:

1) последовательное включение типов РЭ, т.е. исходное множество эталонов пустое. Анализ текущей ветви дерева вариантов решений (ДВР) прекращается, когда выполнится условие (1). Недостаток этого подхода заключается в том, что начальные промежуточные решения получаются удаленными от оптимального;

2) последовательное исключение из состава ПМЛ рабочих эталонов. Первоначально устанавливается, что в состав ПМЛ входят все типы РЭ, обеспечивающие поверку заданной номенклатуры СИТ. Анализ текущей ветви ДВР прекращается, если не выполняется условие поверки (выражение (1) принимает значение **0**).

Анализ схем поверки показывает, что РЭ можно разделить на независимые подгруппы. Это обусловлено тем, что РЭ допускают взаимозаменяемость сравнительно узким и стабильным множеством других РЭ. Отмеченная особенность позволяет организовать блочную оптимизацию состава РЭ. Для этого необходимо выделять независимые подгруппы эталонов, т.е. такие подгруппы, в состав которых входят только взаимосвязанные рабочие эталоны, а любой РЭ из одной подгруппы не взаимосвязан с любым другим из любой другой подгруппы. Под взаимозависимостью здесь понимается возможность замены РЭ другим рабочими эталонами или группой РЭ.

Для определения подгрупп необходимо анализировать выражение (1). При этом необходимо выделять не только прямые зависимости между РЭ (присутствующие в одной конъюнктуре (1)), но и косвенные зависимости (когда эталоны находятся в разных конъюнктах, но имеются другие РЭ, которые их связывают). Основная трудность – выделение косвенных связей. Для решения этой задачи можно применить различные подходы, в частности, метод, основанный на дизъюнктивном вложении матриц [3]. Он позволяет из матрицы связностей (прямые зависимости – возможность непосредственной замены) получить матрицу достижимостей (все зависимости), из которой затем выделяются независимые подгруппы и входящие в них РЭ. Этот подход целесообразно применять тогда, когда ограничения (3) и (4) не играют важной роли при нахождении решения задачи, т.е. при сравнительно большой грузоподъемности средства подвижности или для стационарных лабораторий. Кроме того, такой подход целесообразно использовать для получения предварительного решения, которое при соответствии его МГО, является оптимальным значением, а при несоответствии может сравниваться по ходу решения с промежуточным для оценки качества последнего.

Алгоритм содержит возможность получения квазиоптимального результата, если оптимального времени не будет хватать для определения оптимального решения. В предлагаемом алгоритме не предусмотрено проведение блочной оптимизации (описанной ранее), так как заранее не известна «жесткость» массогабаритных ограничений. Однако этот алгоритм можно без изменений применять для оптимизации состава «подгруппы РЭ».

Кроме того, установлено, что на эффективность получаемых промежуточных решений оказывает влияние порядок исключения переменных x_i (типов РЭ). Поэтому целесообразно в алгоритме предусмотреть возможность их упорядоченного исключения. Правила, по которым упорядочиваются переменные для исключения, могут быть различными, но можно предложить следующие (в данном случае эвристические):

- 1) исключаются наиболее дорогие РЭ;
- 2) исключаются РЭ, реже встречающиеся в выражении (1);
- 3) комбинация этих правил, например, упорядочение РЭ для исключения по показателю: «отношение числа вхождений эталона в выражение (1) к его стоимости»;
- 4) другие правила.

Следует отметить, что реализация второго правила критична к виду логического представления выражения (1). Первое правило не зависит от логического представления выражения (1) и может быть применено без предварительного анализа. При реализации предложенного алгоритма применяется первое правило. Для этого осуществлена замена множества X множеством W , элементы которого упорядочены по убыванию стои-

мости РЭ. Для упорядочения элементов целесообразно применять алгоритм сортировки Шелла [4].

При реализации алгоритма оптимизации состава рабочих эталонов вводятся следующие переменные:

z - уровень ветвления дерева вариантов решений (глубина);

C_p - минимальная суммарная стоимость РЭ среди уже рассмотренных вариантов комплектования ПМЛ, начальное значение которой определяется по формуле:

$$C_p = \sum_{i=1}^M c_i, \quad (5)$$

Таким образом, алгоритм решения задачи имеет вид:

1. Формируется множество W , с элементами, упорядоченными в порядке убывания стоимости, и проводится соответствующая замена переменных в выражениях (1) – (5).

2. Присваивается $z := 0$, формируется множество: $W = 1$. Рассчитывается начальное значение C_p по формуле (5).

3. Увеличивается значение $z := z + 1$.

4. Проверяется условие $z > N$. Если оно выполняется, то осуществляется переход к п.9, иначе переход к п. 5.

5. Принимается значение $w[z] := 0$.

6. Проверяется условие выполнения проверки по выражению (1). Если оно выполнено, то осуществляется переход к п. 10, иначе к п. 7.

7. Осуществляется включение очередного типа РЭ в состав ПМЛ. Для этого $w[z] = 1$.

8. Осуществляется переход к п. 3.

9. Изменяется значение $z := z - 1$.

10 Если выполняются МГО (3), (4) и условия проверки (1), то в качестве промежуточного решения принимается текущее множество W и изменяется значение $C_p := C$. Осуществляется вывод этого решения. Организуется переход к п. 3, иначе происходит переход к п. 11.

11. Проверяется условие $z = 0$. Если оно выполняется, то осуществляется переход к п. 13, иначе к п. 12.

12. Проверяется условие $w[z] = 1$, если оно выполняется, то осуществляется переход к п. 9, иначе к п. 7.

13. Проверяется выполнение массогабаритных требований выражение (3) для Mx и выражение (4) для Vx . Если они одновременно выполняются, то сформированное множество W является оптимальным. Иначе делается вывод, что нет решений, которые одновременно удовлетворяют заданным МГО и требованиям осуществления проверки.

14. Осуществляется вывод полученного результата.

В результате расчета по этому алгоритму определяется оптимальный состав РЭ (квазиоптимальный при наличии лимита времени и прерывания работы по алгоритму) или будет сделано заключение о невоз-

возможности получения допустимого решения для заданных условий и ограничений.

Предложенный алгоритм легко быть преобразован для других критериев оптимальности, в частности, если рассматривать c_i в (2) как массу (объем) соответствующего образца и исключении ограничения (3) (или (4) для объема), расчет по алгоритму позволит определить состав РЭ с минимальной массой (объемом).

Предложенный метод и алгоритм оптимизации состава рабочих эталонов для ПМЛ позволяют обосновывать требования к необходимому составу РЭ при заданной номенклатуре поверяемой СИТ. При этом предлагаемое эвристическое правило упорядочения РЭ при их исключении позволяет за ограниченное время получать результаты, близкие к оптимальному.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.М. Анапко, В.А. Пономарев. Метод формирования оптимальных рабочих мест в войсковых подвижных лабораториях измерительной техники. Сборник трудов войсковой части 55215. Вып. 12. 1988.

2. Сергиенко. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – Киев: Наукова думка, 1988. – 472 с.

3. Кристофидес. Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978. – 475 с.

4. Осваиваем микрокомпьютер: В 2 – х кн.: Кн. 2: Пер. с англ./Б.Р. Смит, Л. Хаурт, Л. Уоттс и др. – М.: Мир, 1989. – 136 с.