

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАСЧЁТОВ ПОДДЕРЖАНИЯ В ГОТОВНОСТИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНИКИ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Гера В.И.¹, Аитов Р.Н.²

Калмыков Е.В.³

(Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
Санкт-Петербург)

При создании сложных организационно-технических систем завершения формирования облика их технических и функциональных структур возникает задача формирования организационной структуры, которая будет реализовывать технологический процесс на объекте. Решению такого рода задачи посвящена данная статья, цель которую преследуют авторы, заключается в предложении алгоритма позволяющем определить такой оптимальный по количеству и квалификации состав, который выполнил эксплуатационные мероприятия за минимальное время. Такая задача может возникать не только при вводе в эксплуатации новых объектов, но и при выполнении внеплановых работ, изменении (оптимизации) штатной структуры подразделений.

¹ Василий Иосифович Гера, кандидат технических наук, доцент (Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13, тел. (911)-833-41-13, geratv33@mail.ru).

² Ренат Наильевич Аитов, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского (reshka462@mail.ru).

³ Евгений Витальевич Калмыков, курсовой офицер Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского (ek9112635536@yandex.ru).

Ключевые слова: техническое обслуживание, устройство, распределение специалистов, квалификация, технологический график.

При формировании (моделировании) эксплуатационных процессов, таких как техническое обслуживание, приведение технических устройств (ТУ) в готовность к применению, реализуемых системой технического обеспечения, возникает задача определения такого количественного состава занятых в этих процессах, который бы позволил выполнить заданные мероприятия за минимальное время при ограничении на суммарное количество личного состава в расчётах.

Так как номера расчётов, задействованные в вышеуказанных процессах, имеют различную квалификацию, например, инженеров и техников, следовательно, при определении оптимальной численности состава необходимо также определить оптимальное соотношение между номерами расчётов различной квалификации.

Решение поставленной задачи выполним в два этапа. На первом этапе решим вопрос о распределении специалистов по работам, предполагая, что каждая работа выполняется самостоятельным расчётом, а на втором - сформируем расчёты необходимой численности, исходя из того, что ряд работ, разнесенных по времени, но имеющих сходный характер, могут быть выполнены одним расчётом.

Для решения задачи первого этапа необходимо преобразовать технологический график эксплуатационного процесса, с операциями, выполняемыми последовательно-параллельно, таким образом, чтобы он не содержал параллельных операций. Это достигается путём объединения параллельно выполняемых работ или части работ в одну работу, характеризующуюся суммарными трудозатратами. При этом необходимо знать не только трудозатраты, потребные для выполнения операции в целом, но и трудозатраты, потребные для выполнения её частей.

Для реализации указанного преобразования технологический график необходимо разбить на интервалы так, как это показано на рис.1. На этом рисунке три работы, выполняемые последовательно-параллельно (1,2,3), разбиты на 5 интервалов. Объединив параллельно выполняемые части работ, получим график процесса, содержащий только пять последовательных операций нижняя см. рис.1, для выполнения которых необходимы следующие трудозатраты:

$$C_{1j} = C_{1j}^1, C_{2j} = C_{2j}^1 + C_{2j}^3, C_{3j} = C_{3j}^1 + C_{3j}^2 + C_{3j}^3,$$

$$C_{4j} = C_{4j}^1 + C_{4j}^2, C_{5j} = C_{5j}^2$$

где C_{ij}^m - трудозатраты специалистов j-ой квалификации, необходимые для выполнения части m-ой работы исходного графика, соответствующей i-му интервалу.

i \ m	1	2	3	4	5
1	C_{1j}^1	C_{2j}^1	C_{3j}^1	C_{4j}^1	
2			C_{3j}^2	C_{4j}^2	C_{5j}^2
3		C_{2j}^3	C_{3j}^3		
i					
1	C_{1j}				
2		C_{2j}			
3			C_{3j}		
4				C_{4j}	
5					C_{5j}

Рисунок 1 - Технологический график условного эксплуатационного процесса

Предположим, что необходимо выполнить r последовательных операций расчётного графика (графика, содержащего только последовательные работы) с помощью r групп специалистов, из которых далее будут сформированы расчёты. Тогда интересующая нас задача может быть сформирована следующим образом: разделить количественный состав групп для каждой квалификации специалистов, при котором обеспечивалось бы минимальное время выполнения всего комплекса операций при ограничении на суммарное количество специалистов каждой квалификации, т.е. найти такие n_{ij} ($i=1, \dots, r; j=1, \dots, i$), при которых функция

$$(1) \quad T = \sum_{i=1}^r t_i(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii}),$$

примет минимальное значение и выполняются ограничения

$$(2) \quad \sum_{i=1}^r n_{ij} \leq N_{j\text{доп}},$$

$$(3) \quad n_{ij}^{\min} \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max},$$

где t_i - время выполнения i -ой операции расчётного графика; n_{ij} - количество специалистов j -ой квалификации в группе, выполняющей i -ую операцию; T - время выполнения всего комплекса операций; $N_{j\text{доп}}$ - располагаемое количество личного состава j -ой квалификации.

Ограничения (3) всегда имеют место в реальных эксплуатационных процессах и определяют минимально и максимально допустимые количества специалистов j -ой квалификации, выполняющих i -ую работу. Вместо ограничений (2) могут быть рассмотрены ограничения вида

$$(4) \quad \sum_{j=1}^i \sum_{i=1}^r n_{ij} \leq N_{\text{доп}},$$

или

$$(5) \quad \sum_{j=1}^i \sum_{i=1}^r h_{ij} n_{ij} \leq H_{\text{доп}},$$

где h_{ij} - стоимость работы специалиста j -ой квалификации, занятого на i -ой операции; $H_{\text{доп}}$ - допустимая стоимость выполнения всего комплекса операций; $N_{\text{доп}}$ - максимально допустимое суммарное количество личного состава, занятого выполнением всего комплекса операций.

Так как критерий оптимальности (I) является аддитивным, то, используя принцип оптимальности, для вычисления его минимального значения можно получить следующие рекуррентные соотношения:

$$(6) f_1(\xi_{11}, \xi_{12}, \dots, \xi_{1i}) = \min_{n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}} t_1(n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i}),$$

$$(7) f_i(\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{ii}) = \min_{n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii}} [t_i(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii}) + f_{i-1}(\xi_{i1} - n_{i1}, \xi_{i2} - n_{i2}, \dots, \xi_{ii} - n_{ii})], \quad i = 2, \dots, r$$

где

$$(8) f_i(\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{ii}) = \min_{\substack{n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1i} \\ n_{21}, n_{22}, \dots, n_{2i} \\ \dots \\ n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii}}} \sum_{k=1}^i t_k(n_{k1}, n_{k2}, \dots, n_{ki}),$$

при условии, что

$$(9) \sum_{k=1}^i n_{kj} \leq \xi_{ij}, \quad j = 1, \dots, i,$$

ξ_{ij} - возможное значение людского ресурса, последователь-

но выбираемого из ряда

$$(10) \left. \begin{aligned} \xi_{ij} &= \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\min} (1) \left(N_j - \sum_{k=i+1}^r n_{kj}^{\min} \right), \\ \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max} &\triangleright \left(N_j - \sum_{k=i+1}^r n_{kj}^{\min} \right) \\ \xi_{ij} &= \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\min} (1) \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max}, \\ \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max} &\triangleleft \left(N_j - \sum_{k=i+1}^r n_{kj}^{\min} \right). \end{aligned} \right\}$$

Ряд допустимых значений n_{ij} для каждого ξ_{ij} может быть определено из следующих соотношений:

$$(11) \left. \begin{aligned} n_{1j} &= n_{1j}^{\min} (1) \xi_{1j}, \\ n_{i+1,j} &= A(1)B, \end{aligned} \right\}$$

$$A = \begin{cases} n_{i+1,j}^{\min}, & \text{если } \left(\xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max} \right) \leq n_{i+1,j}^{\min}, \\ \xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max}, & \text{если } \left(\xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\max} \right) > n_{i+1,j}^{\min}, \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\min}, & \text{если } \left(\xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\min} \right) \leq n_{i+1,j}^{\max}, \\ n_{i+1,j}^{\max}, & \text{если } \left(\xi_{i+1,j} - \sum_{k=1}^i n_{kj}^{\min} \right) > n_{i+1,j}^{\max}. \end{cases}$$

Оптимальное распределение специалистов по группам определяется по формуле

$$n_{r-k,j}^* = \hat{n}_{r-k,j} (\xi_{r-k,1} = N_1 - \sum_{\rho=0}^{k-1} n_{r-\rho,1}^*; \xi_{r-k,2} = N_2 - \sum_{\rho=0}^{k-1} n_{r-\rho,2}^*; \dots; \xi_{r-k,i} = N_i - \sum_{\rho=0}^{k-1} n_{r-\rho,i}^*), j = 1, \dots, i, k = 1, \dots, r-1$$

где $\hat{n}_{r-k,j} (\xi_{r-k,1}, \xi_{r-k,2}, \dots, \xi_{r-k,i})$ - количество специалистов j -ой квалификации, занятых на $(r-k)$ -ой работе, при котором

$$(13) f_{r-k} (\xi_{r-k,1}, \dots, \xi_{r-k,i}) = \min_{n_{r-k,1}, n_{r-k,2}, \dots, n_{r-k,i}} \sum_{\rho=0}^{r-k} t_{\rho} (n_{\rho_1}, \dots, n_{\rho_i}),$$

Решение сформулированной задачи при больших значениях i , т.е. при большом разнообразии квалификаций специалистов связано с исключительно большими вычислительными трудностями. Однако на практике i , как правило, не превосходит 3 (инженеры, техники, рядовой состав). Это обстоятельство, а также тот факт, что для реальных эксплуатационных процес-

сов ограничения (3) в большинстве случаев не позволяют расширять фронт работ в сколько-нибудь значительных пределах, делают возможным решение задачи об определении оптимальной численности расчётов методом динамического программирования при довольно большом количестве работ.

Вид функции $t_i(n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ii})$ на сложность решения задачи практически влияния не оказывает.

Рассмотрим случай, когда в работах участвуют специалисты двух квалификаций: инженеры и техники.

Обозначим

C_{i1} - трудоёмкость i -ой операции в случае её выполнения специалистами, имеющими квалификацию инженеров;

C_{i2} - трудоёмкость i -ой операции в случае её выполнения специалистами, имеющими квалификацию техников; и предположим, что в пределах ограничений (3) время выполнения i -ой операции специалистами только одной j -ой квалификации определяется формулой

$$(14) \quad t_{ij} = \frac{C_{ij}}{n_{ij}}.$$

Тогда время выполнения этой операции одновременно специалистами различных квалификаций будет равно

$$(15) \quad t_i = \left(\sum_{j=1}^2 \frac{n_{ij}}{C_{ij}} \right)^{-1}.$$

проявиться только в том случае, если i -ая операция имеет подоперации, время выполнения которых зависит от способностей исполнителей решать творческие задачи, например, искать неисправности, принимать решения (в том числе организационные) в нестандартных ситуациях. Именно при таких условиях и имеет место сформулированная ранее задача, которую можно формализовать следующим образом:

Найти такое распределение инженеров n_{i1} и техников n_{i2} по операциям, при котором время выполнения всего комплекса операций

$$(15) t_i = \left(\sum_{j=1}^2 \frac{n_{ij}}{C_{ij}} \right)^{-1}.$$

$$(16) T = \sum_{i=1}^r \left(\sum_{j=1}^2 \frac{n_{ij}}{C_{ij}} \right)^{-1},$$

будет минимально и будут выполнены ограничения

$$(17) \left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^r n_{i1} &\leq N_1, \\ \sum_{i=1}^r n_{i2} &\leq N_2, \\ n_{i1}^{\min} &\leq n_{i1} \leq n_{i1}^{\max}, \\ n_{i2}^{\min} &\leq n_{i2} \leq n_{i2}^{\max}. \end{aligned} \right\}$$

Формулы (6) и (7) в этом случае примут соответственно следующий вид

$$(18) f_1(\xi_{11}, \xi_{12}) = \min_{n_{11}, n_{12}} \left(\frac{n_{11}}{C_{11}} + \frac{n_{12}}{C_{12}} \right)^{-1} = \left(\frac{\xi_{11}}{C_{11}} + \frac{\xi_{12}}{C_{12}} \right)^{-1};$$

$$(19) f_i(\xi_{i1}, \xi_{i2}) = \min_{n_{i1}, n_{i2}} \left[\left(\frac{n_{i1}}{C_{i1}} + \frac{n_{i2}}{C_{i2}} \right)^{-1} + f_{i-1}(\xi_{i1} - n_{i1}, \xi_{i2} - n_{i2}) \right],$$

Определение оптимального количества специалистов n_{ij}^* занятых на отдельных операциях производится по формуле (11). После выполнения указанных расчётов необходимо перейти ко второму этапу решения задачи, т.е. определению количественного состава расчётов одной специальности.

Сначала по результатам анализа сущности выполняемых операций определяется комплекс операций, который может быть

заменен расчётом одной специальности. Затем оставшиеся операции, т.е. операции, для выполнения которых необходимо применять расчёты разных специальностей, разбиваются на необходимое число параллельно выполняемых операций и производится определение специалистов по этим операциям. Для этого по известным к данному моменту решения задачи величинам C_{ij} и n_{ij} определяется

$$(20) t_i^* = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{n_{ij}^*}{C_{ij}} \right)^{-1}.$$

А по формуле

$$(21) n_{ij}^m = \frac{C_{ij}^m}{t_i^*},$$

находится искомое распределение специалистов по i -ым участкам операции m исходного графика. Количество специалистов, которое необходимо выделить для выполнения работы, видимо, не должно быть меньше, чем наибольшее значение n_{ij}^m , ибо иначе работа не будет выполнена. Поэтому

$$(22) n_j^m = \max_{i \in L} n_{ij}^m$$

где n_j^m - количество специалистов j -ой квалификации, занятых на работе m ;

L - множество индексов i , соответствующее участкам разбиения работы m .

Качественный состав расчётов определяется по формуле

$$(23) n_k = \max_{m \in G_n} n_1^m + \max_{m \in G_n} n_2^m,$$

где n_k - количество людей в K -ом расчёте; G_k - множество работ, выполняемых K -ым расчётом.

Рассмотренная методика справедлива при предположении о том, что параллельные участки работ начинаются и заканчиваются одновременно. Очевидно, что при снятии этого ограничения можно достигнуть большего сокращения времени

выполнения работ. Однако решение такой задачи является более сложным.

Литература

1. БЕЛЛМАН Р., ДРЕЙФУС С. *Прикладные задачи динамического программирования*. Пер. с англ. под ред. А.А. Первозванского. – М.: Изд-во "Наука", 1965, 460 с.

**THE PROBLEM OF THE OPTIMUM COMPOSITION
FORMATION OF SUPPORT CREW ON THE READINESS
OF THE TECHNIQUES MAINTENANCE IN THE
ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEM**

Vasiliy Gera, the head of the Faculty of Engineering and Electromechanical maintenance, Mozhaisky Military Space Academy, e-mail: geratv33@mail.ru, (197198, Russia, St.-Petersburg, Zhdanovskaya street, 13)

Renat Aitov, the post-graduate student of the Department of Life-support systems of the ground space infrastructure objects, Mozhaisky Military Space Academy, e-mail: reshka462@mail.ru

Evgeniy Kalmykov, the officer of the Faculty of Engineering and Electromechanical maintenance, Mozhaisky Military Space Academy, e-mail: ek9112635536@yandex.ru

Abstract: When creating complex organizational and technical systems completion of formation the image its technical and functional structures there is a problem of formation of the organizational structure that will implement the technological process in the object. The solution of this kind of the problem is presented in the article. The purpose of the article is algorithm which allows determinate optimal composition, which is performed exploitation events in the minimum time. This problem may occur not only when entering into the exploitation new facilities, but also in the performance of the unscheduled work, changing (optimization) standard structure of a crew.

Keywords: the maintenance, the device, the distribution of specialists, the qualification, the technological graphic.