

коэффициенты весов показателей и компетентности объектов являются нормированными величинами [3]

$$\sum_{h=1}^l q_h = 1; \sum_{j=1}^m k_j = 1.$$

Коэффициенты весов показателей могут быть определены экспертным путем. Если q_{hj} - коэффициент веса h -го показателя, даваемый j -м экспертом, то средний коэффициент веса h -го показателя по всем экспертам равен [3]

$$q_h = \sum_{j=1}^m q_{hj} k_j (h = 1, 2, \dots, l).$$

Результаты исследований

Вероятность выполнения задания ЛА $P_{вз}$ определяется следующим выражением:

$$P_{вз} = (1 - P_{отк}) (1 - P_{стз}) P_{нвг} P_{обн} P_{ц}, \quad (1)$$

где $P_{отк}$ - вероятность отказа БПЛА, несъемного бортового оборудования или целевой нагрузки на маршруте следования к цели; $P_{стз}$ - вероятность столкновения с землей из-за отказа системы управления ЛА; $P_{нвг}$ - вероятность вывода ЛА в зону поиска объекта (например, терпящих бедствие людей, зон лесного пожара и пр.); $P_{обн}$ - вероятность обнаружения объекта; $P_{ц}$ - вероятность выполнения конечного этапа операции - определения координат объекта с требуемой точностью, передачи данных на центр обработки информации, сброса груза для лиц, терпящих бедствие.

Для однократного применения БПЛА вероятность выживания

$$P_{в} = (1 - P_{откп}) (1 - P_{сбп}) (1 - P_{сто}), \quad (2)$$

где $P_{откп}$ - вероятность отказа БПЛА и бортового оборудования, исключая отказы целевой нагрузки, на всем маршруте полета; $P_{сто}$ - вероятность столкновения ЛА с землей на обратном маршруте (например, из-за нехватки горючего).

Без потери общности можно принять $P_{стз} \approx P_{сто} = P_{ст}$. Тогда

$$P_{в} = (1 - P_{откп}) (1 - P_{ст})^2.$$

Соответственно при многократном применении БПЛА

$$P_{вмн} = (1 - P_{откп}) (1 - P_{ст})^{2m}, \quad (3)$$

где m - число циклов применения ЛА (кратность).

Выражение (3) записано с учетом того, что после очередного полета летательный аппарат проходит в соответствии с регламентом технического обслуживания послеполетный осмотр и подготовку к повторному вылету или предполетную подготовку. Предполагается, что при этом показатели надежности ЛА и бортового обслуживания восстанавливаются до исходных.

Текущая стоимость выполнения задания беспилотным ЛА с унифицированными целевыми нагрузками определяется как сумма затрат на выполнение одиночного задания:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{бпЛА}}{m_{общ}} + \sum_{i=1}^N \frac{C_{цни}}{m_{цни}} + C_{оп} + C_{рм}, \quad (4)$$

где $C_{бпЛА}$ - исходная стоимость БПЛА; $m_{общ}$ - общее число циклов применения; N - число вариантов применяемой целевой нагрузки; $C_{цни}$ - стоимость i -й целевой нагрузки; $m_{цни}$ - число циклов применения i -й целевой нагрузки; $C_{оп}$ - стоимость нагрузки однократного применения (средства помощи лицам, терпящим бедствие, расходуемые средства сигнализации); $C_{рм}$ - стоимость топлива и расходных материалов (ГСМ, технические жидкости, газы и т.п.).

Рассмотрим в качестве иллюстрации частный показатель эффективности применения ЛА как системы массового обслуживания - вероятности отказа из-за занятости БПЛА. Расчеты выполнялись при следующих исходных данных:

- в процессе эксплуатации ЛА должны выполнять задачи двух типов;
- заявки на использование ЛА поступают с интенсивностью λ ;
- среднее время использования ЛА составляет T_{μ} (интенсивность обслуживания равна $\mu = 1/T_{\mu}$);

– в нашем распоряжении имеются несколько ($N_{\text{ла}}$) ЛА.

Потоки заявок и обслуживания считаются простейшими. Тогда вероятность отказа в обслуживании из-за занятости каналов обслуживания рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$P_{\text{отк}} = \left(\frac{\rho^n}{n!} \right) / \left(1 + \sum_{m=1}^n (\rho^m / m!) \right), \quad (5)$$

где $\rho = \lambda\mu$ – относительная интенсивность нагрузки на БПЛА.

Рассмотрены два случая.

1. Имеются специализированные ЛА со сменными целевыми нагрузками, способные выполнять одну из двух задач.

2. Имеются многоцелевые ЛА, способные выполнять любую из двух задач.

Оценивается выигрыш в сокращении общего количества ЛА благодаря их многофункциональности. На рис. 1 – 3 приведены результаты расчётов вероятности отказа. Интенсивности потоков заявок меняются, но считаются одинаковыми для любой из двух задач.

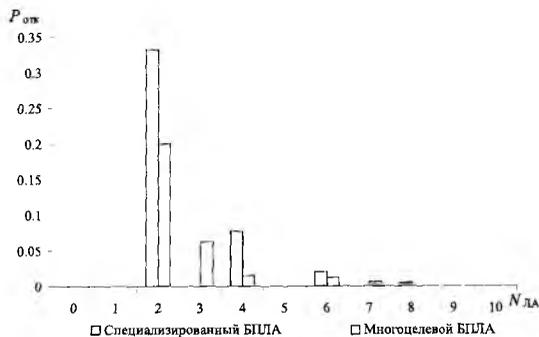


Рис. 1. Низкая нагрузка на БПЛА ($\lambda=0,5$; $\mu=1$; $\rho=0,5$)

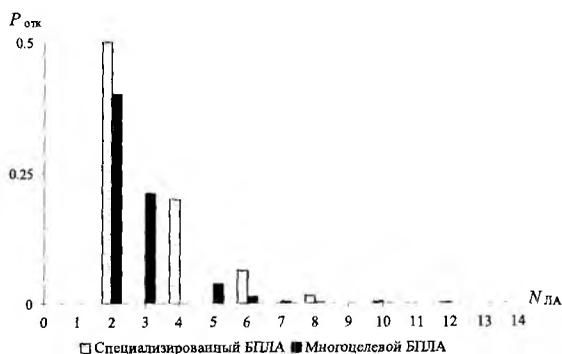


Рис. 2. Одинаковые интенсивности потоков заявок и обслуживания ($\lambda=\mu=1$; $\rho=1$)

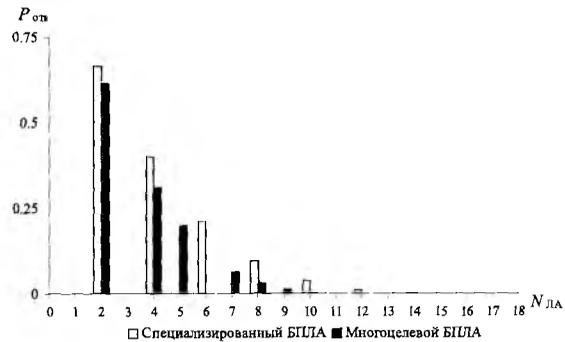


Рис. 3. Повышенная нагрузка на БПЛА ($\lambda=2$; $\mu=1$; $\rho=2$)

Отсутствие ожидаемого на первый взгляд двукратного снижения потребного количества многофункциональных БПЛА по сравнению со специализированными БПЛА объясняется конкуренцией между поставленными задачами. Сокращение потребного количества многофункциональных БПЛА составляет около 30% при умеренных интенсивностях нагрузки на один БПЛА и около 20% при высоких интенсивностях нагрузки на один БПЛА, то есть выигрыш от универсализации снижается при интенсификации использования БПЛА.

Рассмотрим для данных задач функции чувствительности решений по выбору класса нагрузок, топологий и/или архитектур ПО к ошибкам задания исходных данных. Причины ошибок могут быть как объективного, так и субъективного характера [5]. Вследствие этого возникают погрешности вычисления собственных значений и собственных векторов, что приведет к неверному выбору наилучшего решения, получаемого методом анализа иерархий. Другими словами, из-за ошибочного задания (измерения, вычисления) исходных данных возникает риск неправильной ориентации на целевую нагрузку, выбора неверного маршрута или не самого эффективного класса ПО.

Вычислительная задача заключается в нахождении собственного значения матрицы приоритетов системы

$$Ax = \lambda x. \quad (6)$$

Функция чувствительности собственных значений к вариациям различных параметров системы $\dot{y} = Ay$ имеет вид

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial p} = \frac{((\partial A / \partial p) x_i, v_i)}{(x_i, v_i)}. \quad \text{Эту формулу}$$

удобно использовать для оценки чувствительности метода решения к вариациям исходных данных [5]. Была исследована зависимость максимального собственного значения от погрешности точного значения одного из элементов матрицы приоритетов, выбираемых на основе парных сравнений.

На рис. 4 изображен график функции чувствительности, вычисленной методом Хаусхолдера приведения матрицы парных сравнений к почти треугольной форме Гессенберга с дальнейшим вычислением собственных значений методом *QR*-итераций со сдвигом. Отметим, что колебания решения носят слабо выраженный характер. Это объясняется возможностью дополнительной настройки программ вычислений и регулировки шага итераций. Кроме того, при изменениях величины элементов матрицы приоритетов до 50% отклонение даже наибольшего собственного значения от точной величины не превышает 5% - 10% величины спектрального радиуса матрицы – Евклидовой нормы максимального собственного значения. Следовательно, средний риск перескока на неверное решение является величиной второго порядка малости, а само такое событие может быть отнесено к классу редких событий или грубых промахов.

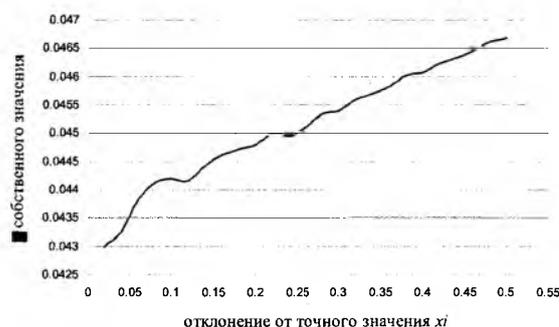


Рис. 4. Функция чувствительности. Метод Гессенберга и *QR*-алгоритм.

Выводы

Метод анализа иерархий может применяться для решения широкого круга прикладных задач выбора класса оборудования, топологий сети, программного обеспечения и пр. При использовании эффективных численных методов для

точной оценки собственных значений матриц приоритетов чувствительность решения к ошибкам задания исходных данных оказывается достаточно низкой. Можно утверждать, что сбои процедуры выбора наилучшего решения будут весьма редкими событиями, а вероятность таких событий – величина второго порядка малости.

Список литературы

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М.: Радио и связь, 1989.
2. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. - М.: Статистика, 1980. - 263 с.
3. Евланов Л.Г., Кутузов В.А. Экспертные оценки в управлении. М.: Экономика, 1978. 133 с.
4. Ростопчин В.В. Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем. <http://www.avia.ru/author/a61.shtml>
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. - 487 с.