

---

УДК: 681.31

**Метод оценки очередности компоновки объектов с учетом обеспечения требований по параметрам ремонтпригодности в пассажирских отсеках магистральных самолетов**

Бодрышев А.В. Куприков М.Ю.

**Аннотация**

В статье рассматривается вопрос оценки положения объекта в заданном месте компоновки исходя из условий оптимального варианта по параметрам ремонтпригодности, легкосъемности и взаимозаменяемости. При этом рассматриваются случаи сравнения компоновки объектов в заданную ячейку по принятым параметрам отказов. Основным сравнительным критерием является коэффициент корреляции между доступностью (геометрической составляющей компоновочного решения) и параметрами эксплуатации

Разработанный расчетный модуль является частью общей программы по созданию оптимального компоновочного решения вновь создаваемого изделия.

**Ключевые слова:** компоновка, коэффициент корреляции, достоверность результатов, коэффициентом желательности Харрингтона.

**Введение**

Под компоновкой изделия понимают совокупность геометрического размещения объектов в заданном пространстве, положение которых зафиксировано относительно общей системы координат и удовлетворяющих заданным эксплуатационным требованиям. Исходя из этого на этапе эскизного проектирования прорабатываются несколько вариантов компоновочных решений. Следующим этапом является вопрос доводки этих решений, исправления ошибок, допущенных на этапе проектирования, с последующим выбором (или созданием) из них оптимального. В данной статье рассматривается методика сравнительного анализа выбора компоновочного решения с учетом их местоположения в конструкции изделия исходя из требования принятого параметра эксплуатации (например, параметра отказов объектов за заданный срок эксплуатации изделия).

Разработанный расчетный модуль является частью общей программы по созданию оптимального компоновочного решения изделия.

### **Актуальность работы**

В данной статье предлагается методика сравнительного анализа нескольких компоновочных решений с целью выбора из них оптимального с учетом корреляционной зависимости между геометрическим расположением объектов в общей конструкции и основными эксплуатационными параметрами. Это позволяет на стадии проектирования выявить более удачную геометрическую компоновку изделия, а следовательно значительно снизить затраты на проектные работы и эксплуатационную составляющую. Данная методика крайне актуальна при создании авиационной техники, где сроки проектирования нового изделия крайне жестки.

Разработанный расчетный модуль является частью общей программы по созданию оптимального компоновочного решения изделия

### **Постановка задачи**

На практике на начальных стадиях разработки изделия рассматриваются несколько вариантов компоновки объектов (блоков) в заданное геометрическое пространство (ячейку). При этом нам необходимо оценить целесообразность правильность выбора последовательности компоновки в заданные ячейки исходя из целостной картины положения объектов в других ячейках.

Для сравнительного анализа выбирается общий критерий оценки, например сравнение по потоку отказов, стоимости обслуживания и т.п. и оценка производится согласно требованиям целесообразности их взаимосвязи.

Рассмотрим некоторую совокупность из  $p$  ячеек и другую совокупность из  $n$  блоков. Предположим, что блоки и ячейки перенумерованы и что  $i$ -й блок может быть помещен в  $j$ -ю ячейку ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ). В этом случае полагаем, что блок заполняет ячейку. Пусть теперь каждому блоку и каждой ячейке поставлены в соответствие некоторые их характеристики, скажем, параметр потока отказов  $\omega_i$   $i$ -го блока и стоимости обслуживания  $c_j$   $j$ -й заполненной блоком ячейки.

Действительно, связывая с  $j$ -й ячейкой некоторые, например, нормированные случайные затраты  $C_j$  на техническое обслуживание заполненной ячейки и с  $i$ -м блоком — некоторую случайную нормированную его характеристику, скажем  $\omega_i$ , мы сможем теперь конструировать случайные двумерные процессы  $(C, \omega)$ , используя для этой цели статистические характеристики случайных величин.

В подобных случаях коэффициент корреляции может служить например мерой ремонтпригодности, легкосъемности, взаимозаменяемости конструкции машины в отношении доступности к ее агрегатов и элементов и определять очередность компоновки объектов в изделие.

Пусть  $m_\omega$ ,  $m_c$ ,  $\sigma_\omega^2$ ,  $\sigma_c^2$  — соответственно средние значения и дисперсии рассматриваемых величин. В соответствии с работой [1] теорема о математическом ожидании произведения случайных величин в принятых обозначениях получает вид

$$m_{\omega c} = m_\omega m_c + r_{\omega c} \sigma_\omega \sigma_c,$$

где  $r_{\omega c}$  — коэффициент корреляции величин  $\omega$  и  $C$ .

Преобразуем данное выражение

$$r_{\omega c} = (m_{\omega c} - m_\omega m_c) / \sigma_\omega \sigma_c, \quad (1)$$

В последнем выражении значения величин  $m_{\omega c}$ ,  $m_c$ ,  $\sigma_\omega$  и  $\sigma_c$  обуславливаются принятым вариантом построения сложной системы, а коэффициент  $r_{\omega c}$  в зависимости от варианта размещения блоков в ячейках может принимать как положительные, так и отрицательные значения в пределах от +1 до -1. В частности, выбирая вариант с отрицательным значением коэффициента  $r_{\omega c}$  можно существенно снизить затраты  $m_{\omega c}$  на обслуживание сложной технической системы длительного использования.

В связи с этим возникает задача выбора наилучшего в смысле стоимости обслуживания варианта системы из заданного множества вариантов. Для этого, в свою очередь, необходимо указать правило, однозначно определяющее такой вариант.

Пусть

$$\omega_1 \leq \omega_2 \leq \omega_3 \leq \dots \leq \omega_n \quad (2)$$

и

$$C_1 \geq C_2 \geq C_3 \geq \dots \geq C_n. \quad (3)$$

Теперь с помощью выражений (2) и (3) нетрудно выяснить, что в дорогостоящих в смысле обслуживания ячейках располагаются блоки с меньшей интенсивностью отказов, и наоборот. С другой стороны, условия (2) и (3) обеспечивают известное в математике [2] неравенство:

$$m_{\omega c} \leq m_\omega m_c \quad (4)$$

Сравнивая между собой выражения (4) и (1), находим

$$-1 \leq r_{\omega c} \leq 0. \quad (5)$$

Аналогично, если

$$\omega_1 \geq \omega_2 \geq \omega_3 \geq \dots \geq \omega_n$$

и

$$C_1 \leq C_2 \leq C_3 \leq \dots \leq C_n.$$

то имеем

$$m_{\omega c} \geq m_{\omega} m_c \quad (6)$$

и здесь

$$+1 \geq r_{\omega c} \geq 0. \quad (7)$$

Иными словами, если в дорогостоящих ячейках (труднодоступных) располагаются теперь блоки с большей величиной параметров потока отказов, то коэффициент корреляции будет положителен, а стоимость обслуживания возрастет.

Таким образом, в дорогостоящих ячейках нецелесообразно располагать изделия имеющих низкий коэффициентами доступности, легкосъемности, взаимозаменяемости.

Из выражений (4), (5) и (6), (7) следует, что оптимальный в смысле стоимости технического обслуживания вариант системы при указанных характеристик блоков и ячеек расположен в том подмножестве вариантов, для которых корреляция отрицательна. Более того если в выражении (2) или (3) два соседних элемента поменять местами, то стоимость обслуживания системы увеличится, в смысле стоимости обслуживания, вариант сложной системы и является правилом оптимального стохастического конструирования систем.

Доступность к изделию целесообразно оценивать с применением функциональной желательности Харрингтона [ 3]. Наиболее ненадежный блок следует размещать в ячейке, требующей наименьших затрат на обслуживание или замену блока, т. е. с наибольшим значением функциональной желательности Харрингтона.

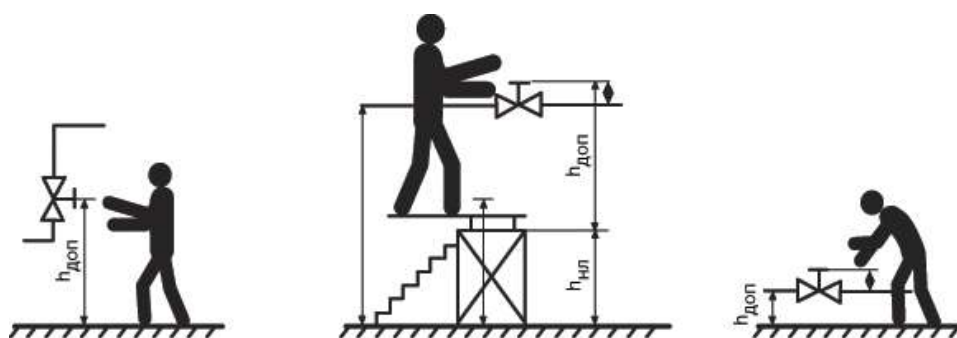
Оценочный коэффициент технологической компоновки конструкции изделия задается величиной определяющимися интервалами

- $K \in [0; 0,37]$  - неудовлетворительная компоновка;
- $K \in [0,37; 0,63]$  - удовлетворительно компоновка;
- $K \in [0,63; 0,8]$  - хорошая компоновка;
- $K \in [0,8; 1,0]$  - отличная компоновка.

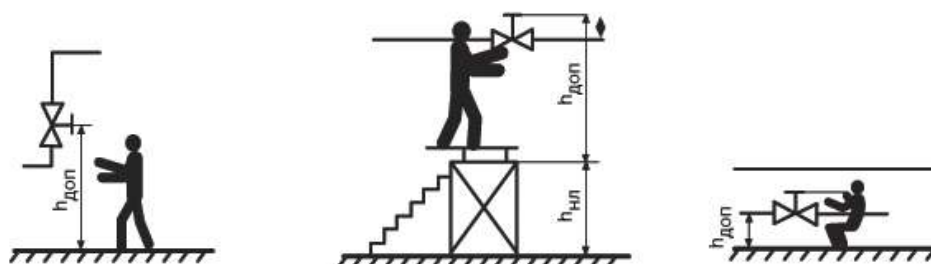
В тоже время место компоновки изделия (местоположение ячейки компоновки) в зависимости от параметров доступности, легкосъемности, взаимозаменяемости зависит от следующих факторов:

- 1) Доступности к изделию обслуживающего персонала.
- 2) Доступности к изделию в зависимости от позы обслуживающего персонала.
- 3) Доступности к изделию в зависимости от положения рабочего места обслуживающего персонала.
- 4). «Геометрической» конфигурации обслуживающего персонала.

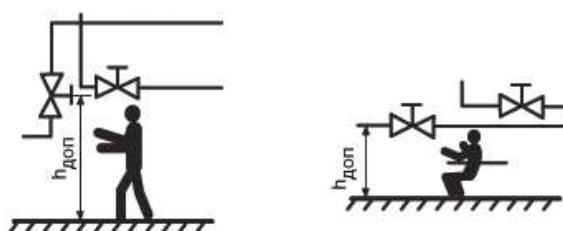
На рис. 1 рассмотрены различные варианты доступности к обслуживанию трубопроводной магистрали (коммуникациям различного назначения). Здесь доступность к объекту определяется не только доступностью к объекту в каком либо направлении, но и позами обслуживающего персонала.



Доступность обеспечивает манипуляции и зрительный контроль за ним



Доступность обеспечивает только манипуляции



Доступность затрудняет манипуляции и не обеспечивает зрительный контроль

Рис. 2. Различные варианты доступности обслуживающего персонала к необходимому объекту

В таблице 1. представлены рекомендуемые значения коэффициента  $K_{допi}$  в зависимости от доступности к изделию с учетом зрительного контроля и ручными

манипуляциями обслуживающего персонала (функциональная желательность Харрингтона).

Таблица 1. Рекомендуемые значения коэффициента  $K_{досi}$ .

Трудоемкость сборки	Оценочный коэффициент $K_{досi}$	Очередность ячейки компоновки
Доступность и легкосъемность обеспечивается в основном манипуляциями и зрительным контролем	$K_{дос1} \in [0,8;1,0]$	4
Доступность и легкосъемность в основном обеспечивается только манипуляциями	$K_{дос2} \in [0,63;0,8]$	3
Доступность и легкосъемность в основном требует сложных манипуляций, но обеспечивает зрительный контроль	$K_{дос3} \in [0,37;0,63]$	2
Доступность и легкосъемность в основном требует сложных манипуляций и не обеспечивает зрительный контроль	$K_{дос4} \in [0;0,37]$	1

Варианты поз при обслуживании объекта показаны на рис. 2. В таблице 2 представлены статистические данные по величине производительности труда для рассматриваемых поз [4]. Безусловно коэффициенты сборности, доступности, легкосъемности, контролепригодности в прямую зависят от необходимой рабочей позы, принимаемой исполнителем. На рис. 3. Представлен пример зон обслуживания в поперечном сечении фюзеляжа учитывающих различные позы принимаемые исполнителем с процентным отношением производительности труда.

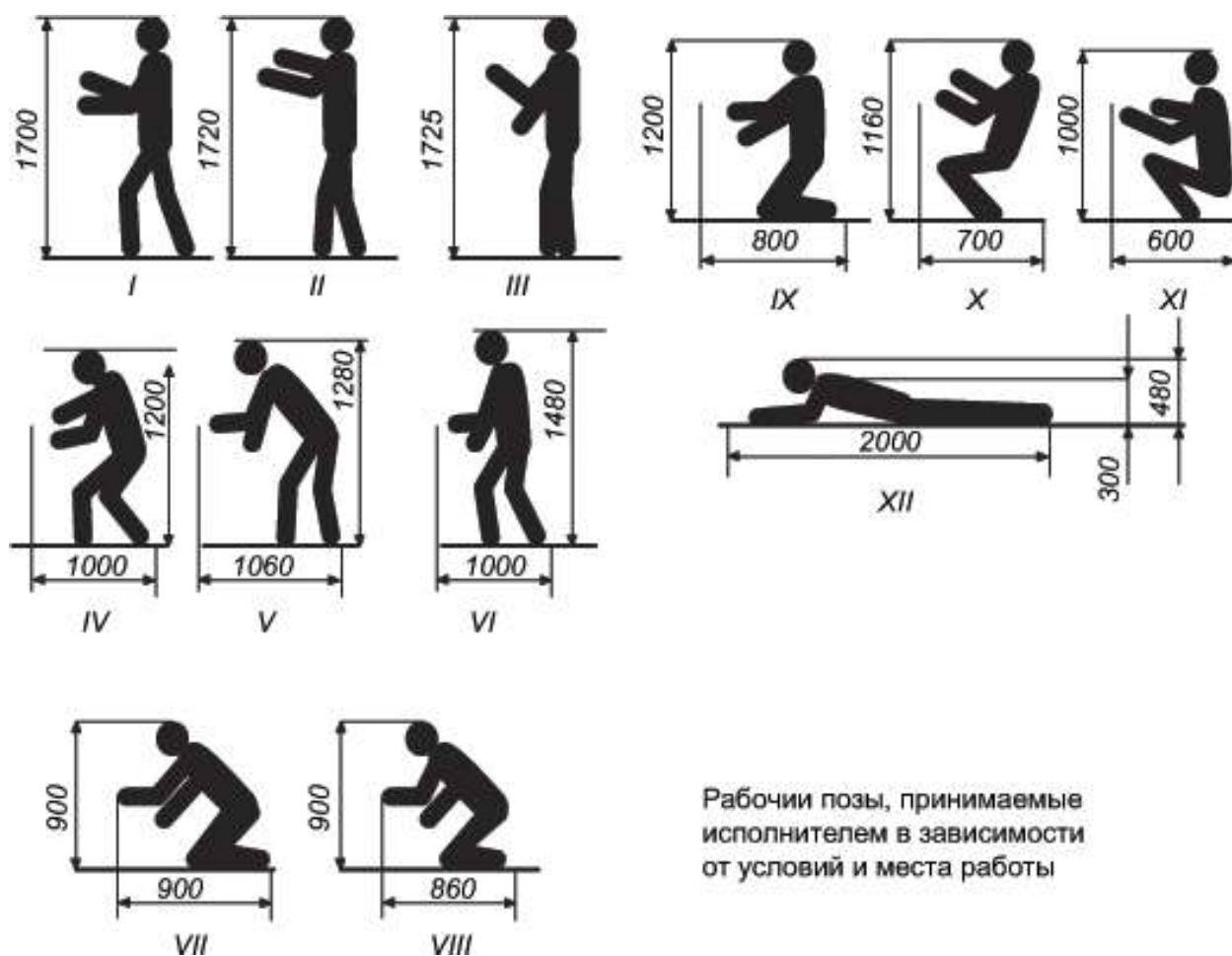


Рис. 2. Рабочие позы, принимаемые исполнителем в зависимости от условий места работы

Таблица 2.

№ позы	Производительность труда, %	№ позы	Производительность труда, %
I - III	100	VII - IX	50-60
IV	95	X	67
V	75	XI	36
VI	53	XII	30-40

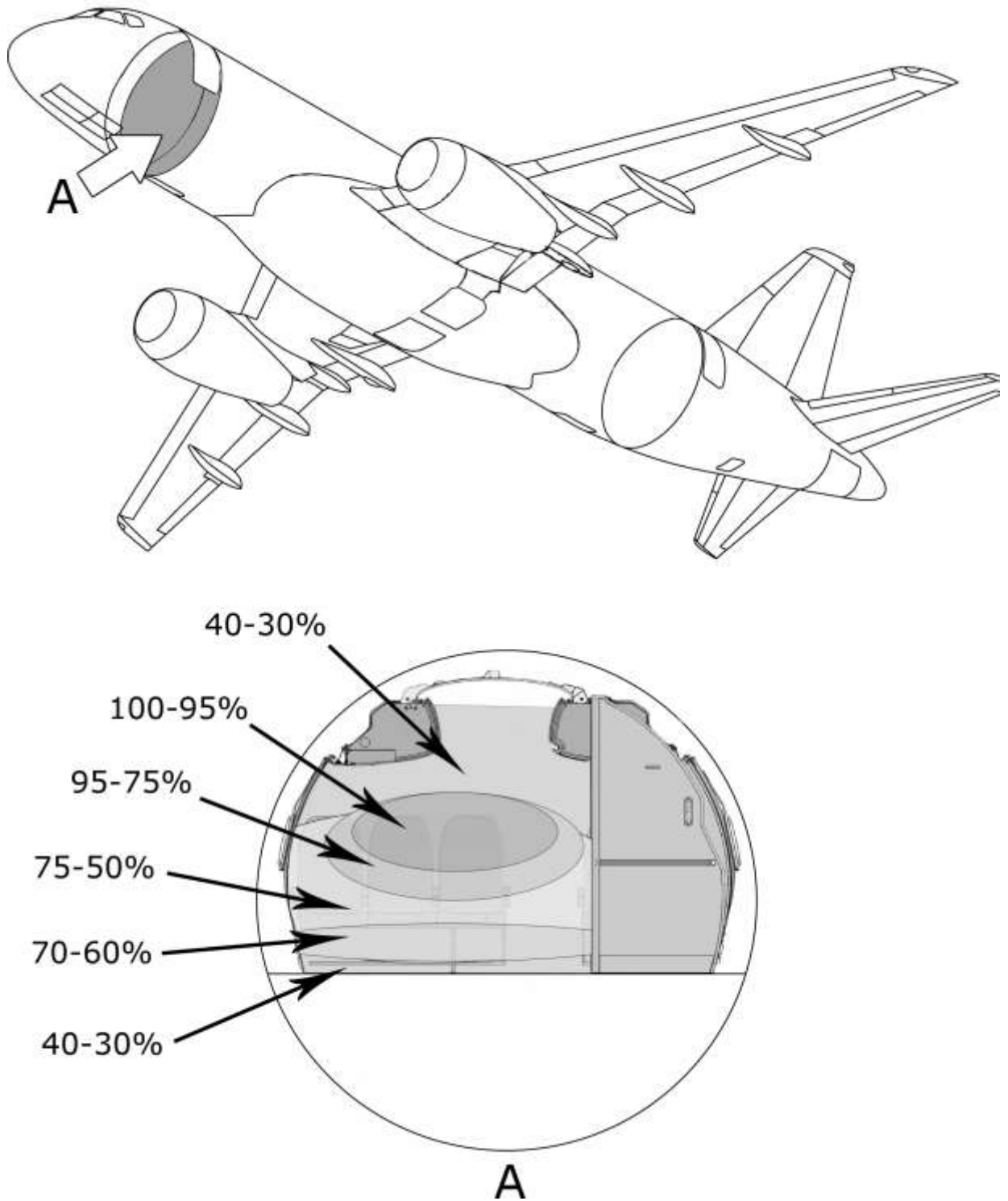


Рис.3. Схематичное изображение зон производительности труда в поперечном сечении гражданского самолета.



В таблице 3 представлены рекомендуемые значения коэффициента  $K_{doci}$  в зависимости от позы обслуживающего персонала (функциональная желательность Харрингтона).

Таблица. 3. Рекомендуемые значения коэффициента  $K_{doci}$  в зависимости от позы обслуживающего персонала.

Рабочие позы принимаемые исполнителем в зависимости от места положения объекта (рис. 2)	Коэффициент доступности к изделию $K_{doci}$	Очередность ячейки компоновки
Позы 1-4	$K_{doc5} \in [0,8;1,0]$	4
Позы 5, 10	$K_{doc6} \in [0,63;0,8]$	3
Позы 6-9	$K_{doc7} \in [0,37;0,63]$	2
Позы 11, 12	$K_{doc8} \in [0;0,37]$	1

На рис. 4 схематически показано рабочее место специалиста при расположении рабочего места в виде полукруга [6]. Цифрами показаны различные зоны доступности (чем меньше номер, тем удобнее работать специалисту).

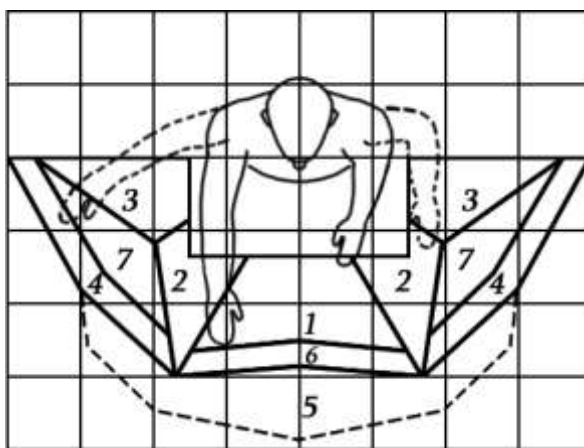


Рис. 4. Различные варианты области доступности для оператора

В таблице 4 представлены рекомендуемые значения коэффициента  $K_{doci}$  в зависимости от дальности места положения изделия от оператора.

Таблица. 4. рекомендуемые значения коэффициента  $K_{\text{doc}i}$  в зависимости от дальности места положения изделия от оператора

Расстояние и место положения изделия от оператора (рис. 11)	Коэффициент доступности к изделию $K_{\text{doc}i}$	Очередность ячейки компоновки
Зоны 1-3	$K_{\text{doc}9} \in [0,8;1,0]$	4
Зона 7	$K_{\text{doc}10} \in [0,63;0,8]$	3
Зоны 4, 6	$K_{\text{doc}11} \in [0,37;0,63]$	2
Зона 5	$K_{\text{doc}12} = \in [0;0,37]$	1

На практике для обслуживания объекта возникают варианты:

а) обеспечении доступностью к объекту:

- доступностью в одном направлении;
- доступностью в двух направлениях;
- доступностью к трем направлениям;
- доступностью к шести направлениям.

б) доступность к объекту с учетом демонтажа других объектов.

в) доступность к объекту с учетом перемещения других объектов.

В таблице 5 представлены рекомендуемые значения коэффициента  $K_{\text{doc}i}$  в зависимости от обеспечения доступности к сторонам объекта .

Таблица. 5. рекомендуемые значения коэффициента  $K_{\text{doc}i}$  в зависимости от обеспечения доступности к сторонам объекта

Варианты доступности к объекту	Коэффициент доступности к изделию	Очередность ячейки компоновки
Необходимая доступность в одном направлении	$K_{\text{doc}13} [0,8;1,0]$	4
Необходимая доступность в двух направлениях	$K_{\text{doc}14} \in [0,63;0,8]$	3
Необходимая доступность в трех направлениях	$K_{\text{doc}15} \in [0,37;0,63]$	2
Необходимая доступность в шести направлениях	$K_{\text{doc}16} = \in [0;0,37]$	1

В таблице 6 представлены рекомендуемые значения коэффициента  $K_{doc}$  в зависимости от доступности к объекту с учетом демонтажа или перемещении других объектов.

Таблица. 6. рекомендуемые значения коэффициента  $K_{doc}$  в зависимости от доступности к объекту с учетом демонтажа или перемещении других объектов

Варианты доступности к объекту	Коэффициент доступности к изделию	Очередность ячейки компоновки
Необходимая доступность без демонтажа другого объекта	$K_{doc 17} \in [0,8;1,0]$	3
Необходимая доступность к объекту при перемещении другого объекта	$K_{doc 18} \in [0,37;0,8]$	2
Необходимая доступность с демонтажом другого объекта	$K_{doc 19} \in [0;0,37]$	1

Таким образом рассмотрены различные варианты компоновочных решений при обслуживании компонуемых объектов. Таблицы.1, 3-6 оценивают основные показатели коэффициентов зон доступности. Но в некоторых случаях необходимо дополнить значения  $K_{doc}$  за счет других вариантов.

В конечном случае комплексный показатель технологической компоновки конструкции изделия  $K^{из}_{doc}$  в зависимости от рассмотренных вариантов зон доступности определяется формулой

$$K^{ткки из}_{doc} = \sum_{j=1}^{\varphi} K^{ткки из}_{doc j} \alpha^{ткки из}_{doc j} / \sum_{j=1}^{\varphi} \alpha^{ткки из}_{doc j}. \quad (8)$$

Здесь  $K^{ткки из}_{doc j}$  – частный коэффициент  $j$ -го варианта доступности (см. таблицы 1, 3-6);  $\alpha^{ткки из}_{doc j}$  – весовой коэффициент  $K^{ткки из}_{doc j}$ ;  $\varphi$  – количество признаков рассматриваемых вариантов доступности (в нашем случае выборка из  $K_{doc 1} - K_{doc 19}$ ).

Коэффициент  $K^{из}_{doc}$  и его составляющие в первую очередь определяют трудоемкость доступности и легкоъемности к данному изделию и ее составных частей (определяются коэффициентами доступности  $K_D$  и легкоъемности  $K_L$ ). Оптимизируя эти параметры мы можем добиться выбора наилучшего варианта компоновки изделия из составных частей и подбора оптимального изделия из ряда имеющихся.

**Пример 1. Комплексный случай оценки компоновки изделия по параметрам отказа изделия и времени устранения отказа (параметр доступности к изделию)**

Пусть изделие, состоящее из шести укрупненных блоков, находилась в режиме подконтрольной эксплуатации (рис. 5). Результаты статистического обследования системы представлены в табл. 7, где  $\omega = K_{1000}$  означает число отказов блоков, приходящееся на 1000 ч работы, а  $C = t_B$  время устранения отказа (замены блока). Требуется дать оценку подконтрольного изделия путем определения коэффициента корреляции между  $K_{1000}$  и  $t_B$ .

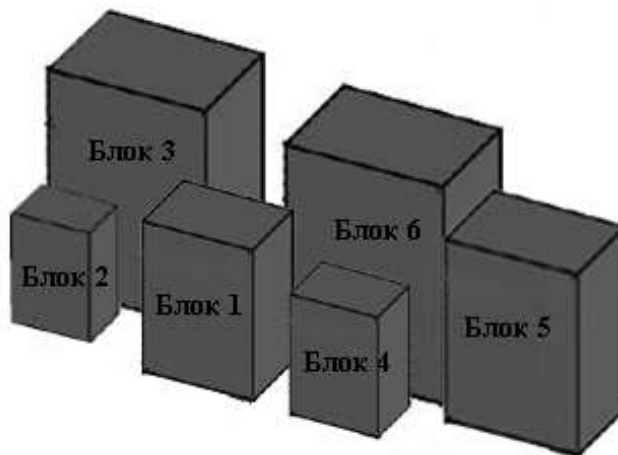


Рис. 5. Расположение объектов определяется: числом отказов, временем обслуживания

Таблица 7. Результаты статистического обследования.

№ блока	$K_{1000}$	$t_B, \text{мин}$
1	0,234	105
2	0,358	100
3	0,265	120
4	0,078	110
5	0,452	135
6	0,0624	140

Из формулы (1) находим выборочный коэффициент корреляции  
 $r_{t_B K_{1000}} = (m_{\omega c} - m_{\omega} m_c) / \sigma_{\omega} \sigma_c = (28,4 - 0,242 * 118,3) / (0,02 * 227,6)^{0,5} = -0,094$

Уравнение регрессии определяем в соответствии с зависимостями

$$K_{1000} = A + \rho_{t_B K_{1000}} * t_B. \quad (9)$$

Здесь  $\rho_{t_B K_{1000}}$  – выборочный коэффициент регрессии.

Исходя из общей теории отыскания параметров выборочного уравнения прямой регрессии по несгруппированным данным имеем

$$\rho_{t_B K_{1000}} = (n \sum t_B * K_{1000} - \sum t_B \sum K_{1000}) / (n \sum t_B^2 - (\sum t_B)^2);$$

$$A = (\sum t_B^2 * \sum K_{1000} - \sum t_B * \sum t_B K_{1000}) / (n \sum t_B^2 - (\sum t_B)^2).$$

Согласно данным таблицы 2 уравнение 8 будет иметь вид

$$K_{1000} = 0,252 - 0,0000875 t_B.$$

Как видно, коэффициент корреляции  $r_{t_B K_{1000}} = -0.094$  в данном случае отрицателен, но его абсолютное значение мало. А это означает, что при существующем уровне безотказности блоков размещение их по ячейкам произведено не наилучшим образом.

Таким образом в данном примере нет тенденции компоновки блоков с большей величиной отказов и временем их устранения в более «дорогостоящих» ячейках.

### **Пример 2. В условиях приведенного выше примера требуется указать лучший вариант размещения блоков в изделии.**

Для решения этой задачи воспользуемся правилом конструирования, согласно которому *наиболее ненадежный блок следует размещать в ячейке, требующей наименьших затрат на обслуживание или замену блока*. Используя данное правило, приходим к следующей схеме размещения блоков (таблица 8). При этом затраты по всем ячейкам сохраняются неизменными.

Таблица 8. Схеме размещения блоков

№ блока	$K_{1000}$	$t_B$ , мин
1	0,234	1120
2	0,358	105
3	0,265	110
4	0,078	135
5	0,452	100
6	0,0624	140
Среднее	0,242	118,3

Повторяя схему расчетов, используемую в примере 1, находим средние и дисперсии величин  $K_{1000}$  и  $t_B$ .

Для коэффициента корреляции в данном случае получаем значение

$$r_{t_B K_{1000}} = (26,71 - 0,242 * 118,3) / (0,02 * 227,6)^{0,5} = -0.89$$

и уравнение регрессии имеет следующий вид

$$K_{1000} = 0,34 - 0,00083 t_B.$$

Таким образом, средние затраты на устранение отказов блоков становятся меньше (26,71 против 28,4 в предыдущем примере), а абсолютное значение коэффициента корреляции  $r_{t_B K_{1000}} = -0.89$  получается почти в 10 раз выше прежнего

### **Выводы**

1. Оценка размещения объектов в заданном компоновочном решении определяется коэффициентом корреляции между оцениваемыми параметрами.
2. Чем больше отрицательное значение коэффициента корреляции, тем заданное компоновочное решение более предпочтительно.
3. Наиболее «ненадежный» блок по принятому эксплуатационному параметру необходимо «размещать» на месте, требующего наименьших затрат на обслуживание или замену блока.
4. Оценка суммарного коэффициента технологической компоновки конструкции изделия по критерию доступности целесообразно проводить с применением функциональной желательности Харрингтона, применяя его для всех вариантов влияющих на доступность к объекту для обслуживания данного объекта.

#### **Библиографический список**

1. Венцель Е.С. Теория вероятностей. 4-ое изд.. М. «Наука», 1969, 576 с.
2. Бронштейн И.Н. , Семендяев К.А. Справочник по математике. М. издательство физ.-мат. Литературы, 1962, 607 с
3. Карташева Т.М., Штаркман, Б.П. Обобщенный критерий оптимизации – функция желательности // Информационные материалы ВИНТИ, 2003. №8. С. 45.
4. Малыгин Е.Н., Егоров С.Я., Немтинов В.А., Громов М.С. Информационный анализ и автоматизированное проектирование трехмерных компоновок оборудования химико-технологических схем Тамбов, Издательство ТГТУ 2006
5. Аристов А.И., Волков П.Н., Дубицкий Л.Г. и др. Ремонтпригодность машин. М., «Машиностроение», 1975
6. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры/ Изд. 2-е, дополненное и переработанное, М., «Сов. Радио», 1975 г, 352 с.

## **Сведения об авторах**

Бодрышев Антон Валерьевич, аспирант Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета),

тел.: (926) 223-8551; e-mail: mazovski@gmail.com;

Куприков Михаил Юрьевич, профессор Московского авиационного института  
(национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: (499) 158-41-24; e-mail:  
kuprikov@mai.ru