

УДК 629.735.08 (075.8)

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ДВУМЕРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ВЕРТОЛЕТА

Ю.М. ЧИНЮЧИН¹, А.С. СОЛОВЬЕВ¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Описывается новый расчетный программный комплекс, в задачи которого входит поиск оптимального с точки зрения эффективности технической эксплуатации вертолетной техники алгоритма стохастического конструирования и компоновки вертолета. Показано, что использование разработанного расчетного программного комплекса позволяет успешно решать задачи обеспечения конструкции вертолета с высокими показателями эксплуатационной технологичности.

Показано, что для успешного решения задач, связанных со снижением (на этапах эксплуатации) затрат на техническое обслуживание и ремонт при проектировании и компоновке вертолета в конструкторском бюро, целесообразно применение корреляционного анализа для оценки эксплуатационной технологичности совместно с использованием системы автоматизированного проектирования. За основу расчетного программного комплекса взят математический аппарат линейной корреляционной зависимости двумерного (стохастического) процесса. Под линейной корреляционной зависимостью понимается линейная или близкая к ней связь между двумя переменными, для которой справедлива теорема корреляционного анализа.

Представлен алгоритм работы расчетного программного комплекса для оценки эксплуатационной технологичности вертолета, который состоит из пяти шагов: выбор оборудования, которое необходимо установить на вертолет (блоки); подсчет коэффициента корреляции для вертолетов, имеющих данное оборудование и выявление оптимальных вариантов расположения; зональное деление разрабатываемого вертолета и анализ возможности размещения блоков в оптимальном порядке; размещение блоков на проектируемом вертолете; подсчет коэффициента корреляции, построение прямой регрессии для проектируемого вертолета и сравнение данных показателей с вертолетами-аналогами. Приведены результаты расчета характеристик корреляционного анализа, которые свидетельствуют о потенциальной возможности повышения уровня эксплуатационной технологичности вертолета с минимальными затратами труда и времени при разработке отдельной функциональной системы.

Ключевые слова: эксплуатационная технологичность, корреляционный анализ, стохастический процесс.

ВВЕДЕНИЕ

Повышению эффективности процесса технической эксплуатации вертолета способствует сокращение времени, труда и средств на проведение его технического обслуживания и ремонта (ТОиР). При сравнении затрат на ТОиР для отечественных и зарубежных вертолетов одного класса заметим, что затраты на ТОиР составляют 22–27 % от всех переменных и постоянных затрат. Затраты на ТОиР во многом зависят от приспособленности объекта (вертолета) к проведению на нем всех видов работ по поддержанию летной годности. Совокупность свойств конструкции вертолета, характеризующих эту приспособленность к выполнению всех видов работ по ТОиР с использованием наиболее экономичных технологических процессов, принято называть эксплуатационной технологичностью (maintainability) [1, 2, 4, 5, 7, 8].

С каждым годом на вертолете, аналогично самолету, появляется все больше радиоэлектронного и электротехнического оборудования взамен механических приборов и агрегатов. Это обусловлено в первую очередь уменьшением размеров, снижением массы конструкции оборудования вертолета и, как следствие, повышением его экономической эффективности. Но, как показывает статистика для более 300 вертолетов, начиная с 2000 г. и заканчивая 2015 г., половина всех отказов и повреждений вертолетов приходится именно на бортовое радиоэлектронное (БРЭО) и электрооборудование (ЭО). Так как до сих пор на вертолете ответственные объекты несущей системы и системы управления остаются механическими, то в подавляющем боль-

шинстве случаев отказы БРЭО и ЭО не приводят к аварийным или катастрофическим ситуациям. Однако затраты на их обслуживание и ремонт при такой частоте отказов и повреждений существенны.

Основным отличием винтокрылого летательного аппарата от самолета является крайне сжатая в объеме конструктивно-компоновочная схема. Ввиду отсутствия крыла, основным местом размещения всех систем, агрегатов и оборудования является фюзеляж вертолета совместно с мотогондолой (рис. 1). Тесное расположение оборудования и агрегатов систем в данных местах приводит к затенению одних блоков другими, что создает значительные трудности в обеспечении доступа для контроля, обслуживания и их снятия при ремонте [2, 8].

Для успешного решения задач, связанных со снижением затрат на ТОиР при проектировании и компоновке вертолета в конструкторском бюро, целесообразно применение корреляционного анализа для оценки эксплуатационной технологичности совместно с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) [1, 7].

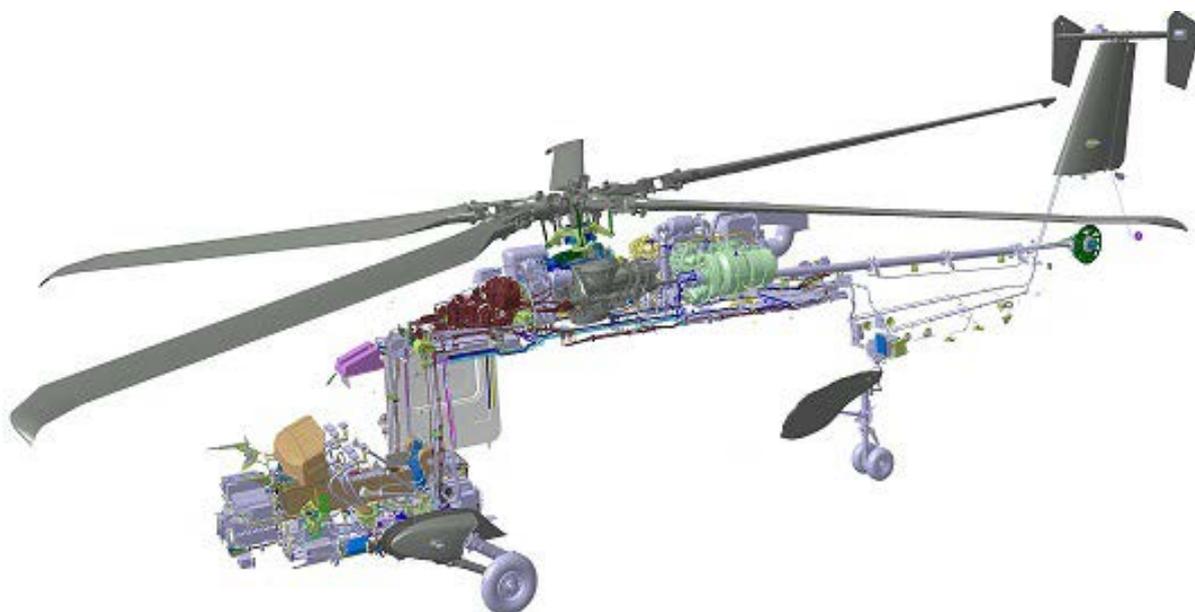


Рис. 1. Размещение оборудования и агрегатов на вертолете
Fig. 1. Equipment and units installation on a helicopter

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ВЕРТОЛЕТА

За основу расчетного программного комплекса взят математический аппарат линейной корреляционной зависимости двумерного (стохастического) процесса [3]. Под линейной корреляционной зависимостью понимается линейная или близкая к ней связь между двумя переменными, для которой справедлива теорема корреляционного анализа

$$M_{xy} = M_x M_y + r \sigma_x \sigma_y, \quad (1)$$

где M_{xy} – математическое ожидание произведения двух случайных величин;
 M_x и M_y – математическое ожидание каждой из случайных величин;
 σ_x и σ_y – среднее квадратическое отклонение каждого из указанных параметров;
 r – линейный коэффициент корреляции.
Следствием данной теоремы является уравнение выборочной прямой регрессии x на y

$$x - M_x = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - M_y), \quad (2)$$

где x и y – значения случайных статистических величин.

В таком случае коэффициент корреляции будет служить мерой эксплуатационной технологичности системы, а наклон линии регрессии, построенной с использованием уравнения выборочной прямой регрессии, будет говорить об уровне оптимизации размещения блоков оборудования и агрегатов на вертолете [1]. Например, положительный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии тенденции к возрастанию прямой регрессии и недостаточной технологичности конструкции вертолета.

Для непосредственного вычисления коэффициента корреляции в расчетном программном методе принимаются значения числа отказов блока или агрегата на 1000 часов работы $x = K_{1000i}$ и общее время устранения повреждения данного изделия $y = t_{yi}$. Причем последнее состоит из времени на обеспечение доступа к блоку $t_{y\text{од}}$ (открытие люка доступа, демонтаж затеяющих агрегатов) и времени снятия и установки самого блока $t_{y\text{суб}}$.

Точечной оценкой математических ожиданий данных величин служат их средние арифметические значения:

$$M_{K_{1000}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_{1000i}; \quad Mt_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{yi}. \quad (3); (4)$$

Точечной оценкой дисперсий данных величин могут служить их средние арифметические значения

$$D_{K_{1000}} = \sigma_{K_{1000}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (K_{1000i} - M_{K_{1000}})^2}{N-1}; \quad D_{t_y} = \sigma_{t_y}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{yi} - Mt_y)^2}{N-1}. \quad (5); (6)$$

Коэффициент корреляции вычисляется по формуле

$$r = \frac{M_{K_{1000}t_y} - M_{K_{1000}} M_{t_y}}{\sigma_{K_{1000}} \sigma_{t_y}}. \quad (7)$$

Уравнение выборочной прямой регрессии x на y примет вид

$$x - M_{K_{1000}t_y} = r \frac{\sigma_{K_{1000}}}{\sigma_{t_y}} (y - M_{t_y}). \quad (8)$$

Проводить корреляционный анализ эксплуатационной технологичности целесообразно с использованием ЭВМ. Наиболее эффективным будет разработка кода и создание программы, общей для всех вертолетов, в известных программных продуктах (например, Visual Basic for Applications в среде Microsoft Excel).

АЛГОРИТМ РАБОТЫ РАСЧЕТНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ВЕРТОЛЕТА

Алгоритм работы расчетного программного комплекса для оценки эксплуатационной технологичности вертолета состоит из пяти шагов.

1. Выбор оборудования, которое необходимо установить на вертолет (блоки).
2. Подсчет коэффициента корреляции для вертолетов, имеющих данное оборудование и выявление оптимальных вариантов расположения.
3. Зональное деление разрабатываемого вертолета и анализ возможности размещения блоков в оптимальном порядке.
4. Размещение блоков на проектируемом вертолете.
5. Подсчет коэффициента корреляции, построение прямой регрессии для проектируемого вертолета и сравнение данных показателей с вертолетами-аналогами.

Шаг 1. Выбор оборудования. Вместе с выбором i -го блока в таблицу заносятся статистические данные K_{1000i} и t_{yi} каждого типа вертолета, имеющего данный блок. Статистические данные берутся из базы данных в автоматическом режиме или заносятся вручную.

Шаг 2. Подсчет коэффициента корреляции для вертолетов, имеющих данное оборудование, и выявление оптимальных вариантов расположения. На данном шаге происходит автоматический подсчет коэффициента корреляции и построение прямой регрессии для вертолетов-аналогов. Также отмечаются расположения блоков, время на устранение неисправностей которых (замены) минимально.

Шаг 3. Зональное деление разрабатываемого вертолета и анализ возможности размещения блоков в оптимальном порядке. Проектируемый вертолет необходимо разделить на ячейки – места установки (размещения) блоков (рис. 2). В системе автоматизированного проектирования проводится оценка наличия функциональных связей между блоками и возможности размещения любого блока в любой ячейке. Блоки, имеющие функциональную связь с другими системами, исключаются из расчетной системы. Их размещение на вертолете необходимо проводить отдельно, с учетом функциональных связей. Ячейки, в которых невозможно или нецелесообразно размещение всех блоков системы, не принимаются во внимание.

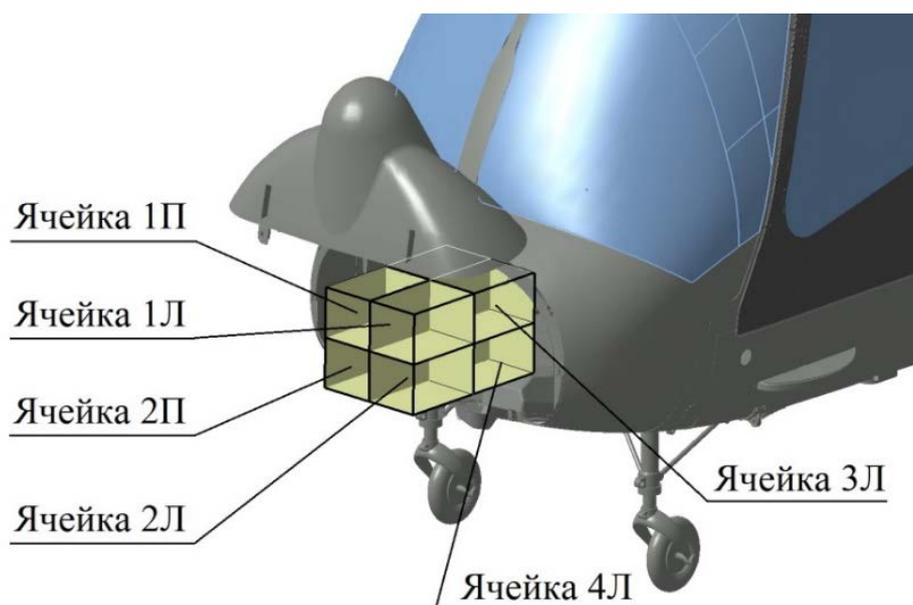


Рис. 2. Схема деления носовой части вертолета на ячейки (места установки блоков):
ячейки 3П и 4П расположены симметрично ячейкам 3Л и 4Л

Fig. 2. Chart of a helicopter forward part composition into compartments (places for units mounting):
compartments 3П and 4П are located symmetrically to compartments 3Л and 4Л

Шаг 4. Размещение блоков на проектируемом вертолете. Каждый i -й блок должен быть помещен в j -ю ячейку, исходя из оптимального соотношения числа отказов и времени замены (обеспечение доступа и съема изделия). Принимается предварительная конструктивная схема системы.

Шаг 5. Подсчет коэффициента корреляции, построение прямой регрессии для проектируемого вертолета и сравнение данных показателей с вертолетами-аналогами. Производится расчет показателей корреляционного анализа эксплуатационной технологичности принятой конструктивной системы (рис. 3) и сравнение их с показателями вертолетов-аналогов.

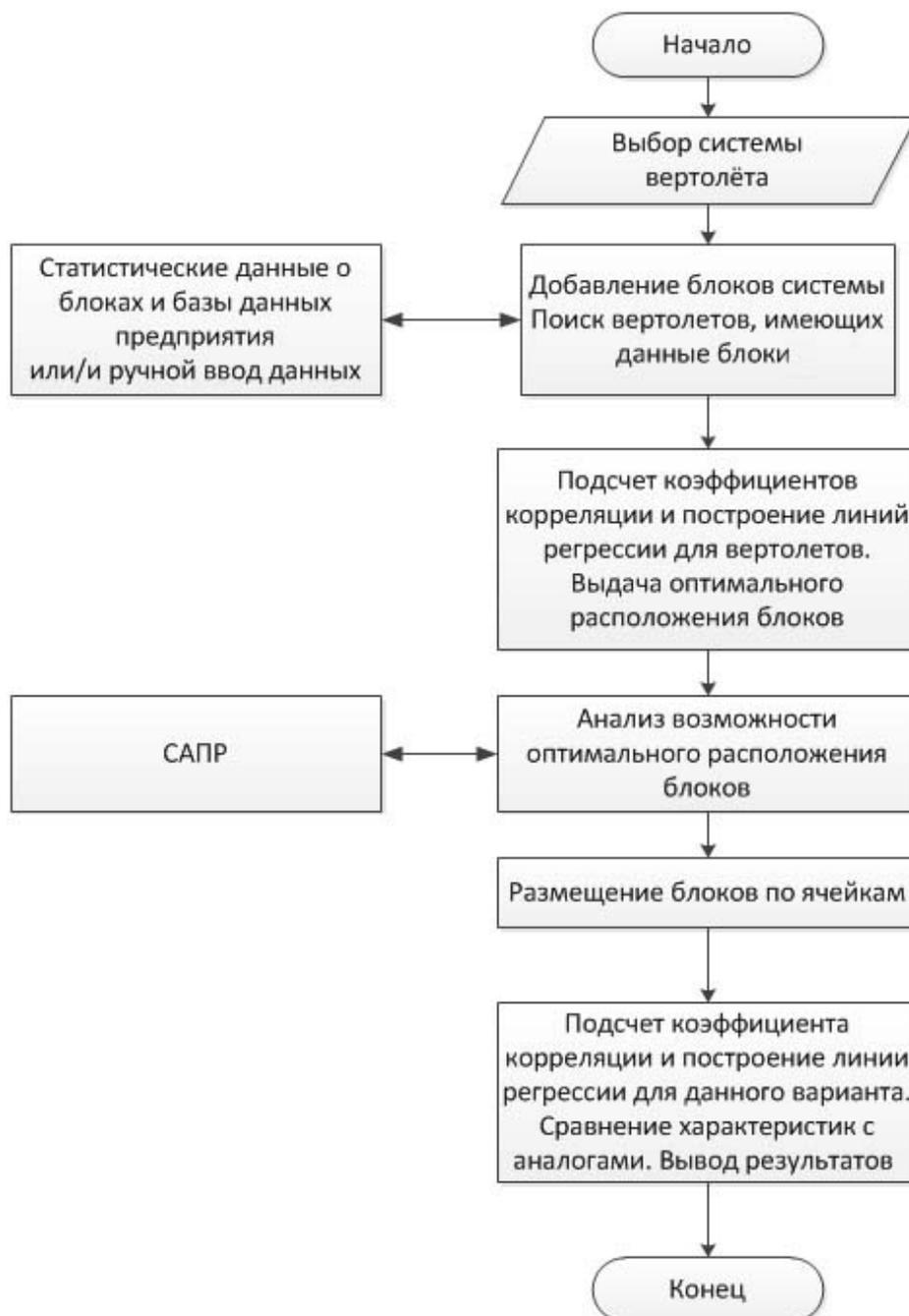


Рис. 3. Блок-схема расчетного программного комплекса корреляционного анализа эксплуатационной технологичности вертолета

Fig. 3. Block-diagram of computation software complex for correlation analysis of helicopter maintainability

При неудовлетворительном уровне технологичности принимаются следующие меры:

- выбор другого варианта размещения блоков;
- внедрение конструктивных доработок в конструкцию вертолета с целью снижения времени на обеспечение доступа к блокам рассматриваемой системы;
- внедрение конструктивных доработок в блоки, имеющие наиболее низкие значения показателей надежности или технологичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

С помощью данного расчетного программного комплекса был выполнен предварительный корреляционный анализ эксплуатационной технологичности для некоторых блоков системы радионавигационного оборудования проектируемого вертолета (рис. 4). В качестве вертолетов-аналогов приняты вертолеты Ка-52 и Ми-24. При компоновке агрегатов с учетом корреляционного анализа удалось вдвое увеличить абсолютное значение коэффициента корреляции и снизить на 17 % средние затраты на устранение отказов в сравнении с вертолетами-аналогами.

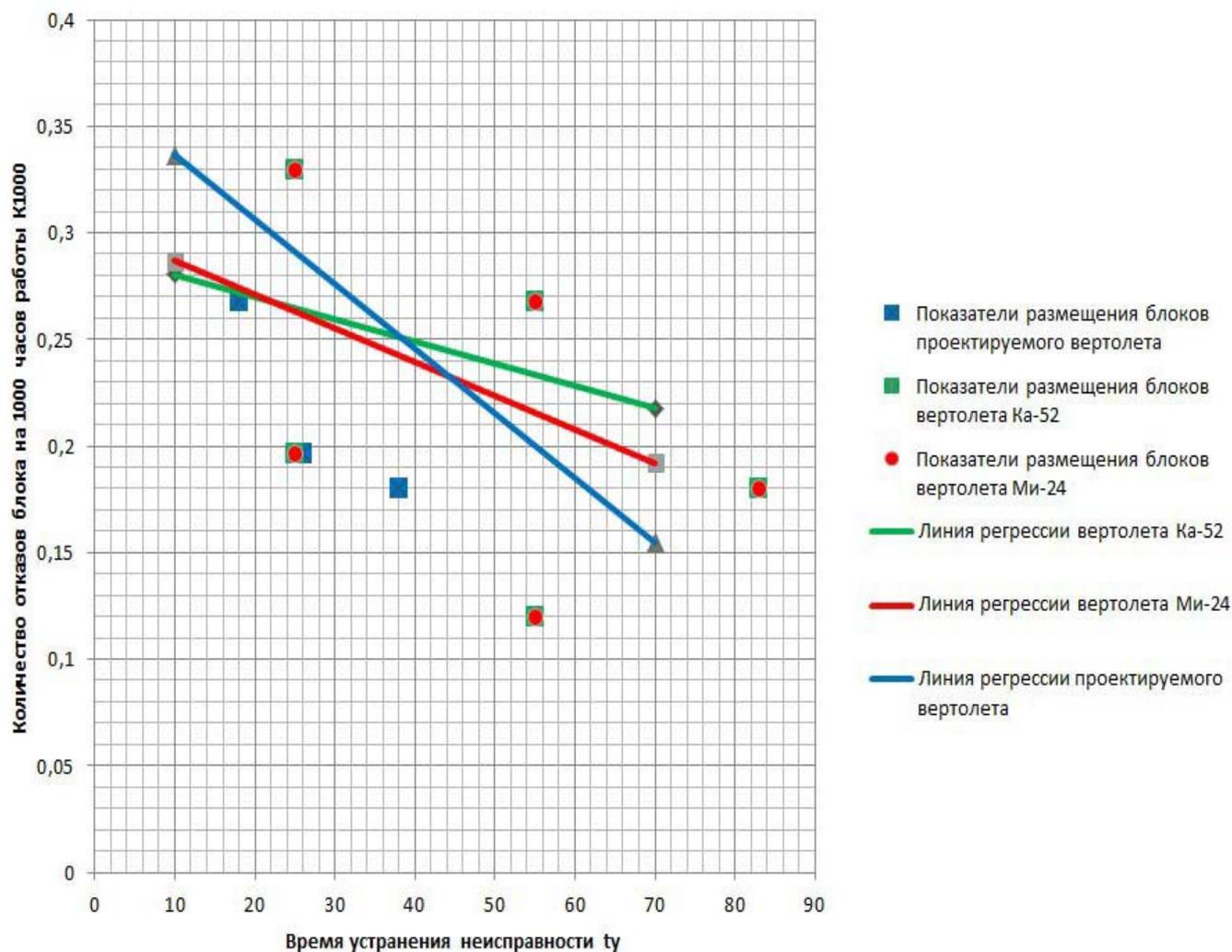


Рис. 4. Графическое представление показателей корреляции для вертолетов
Fig. 4. Graphical presentation of correlation indicators for helicopters

Количественные характеристики результатов проведенного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Количественные показатели корреляционного анализа
Correlation Analyses Quantity Indicators

Показатель	Вертолет		
	Ка-52	Ми-24	Проект
Коэффициент корреляции	-0,37883	-0,33436	-0,64911
Средние затраты на устранение отказов блоков	9,89	7,45	6,33

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для снижения затрат на ТОиР вертолета необходима тщательная проработка вопросов эксплуатационной технологичности. Корреляционный анализ, используемый в расчетном программном комплексе, позволяет повысить уровень эксплуатационной технологичности вертолета с минимальными затратами труда и времени при разработке системы вертолета. Данный комплекс может найти применение как в авиационной промышленности, так и в других технических областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1994. 256 с.
2. Чинючин Ю.М. Технологические процессы технического обслуживания летательных аппаратов. М.: Университетская книга, 2008. 408 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1999. 456 с.
4. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учебник. М.: МГТУ ГА, 2015. 505 с.
5. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А., Чинючин Ю.М. Надежность и эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. М.: МИИГА, 1989. 112 с.
6. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Современные проблемы технической эксплуатации воздушных судов. Часть 1. М.: МГТУ ГА, 2007. 80 с.
7. Чинючин Ю.М. Модель и основные принципы управления эксплуатационной технологичностью магистральных самолетов // Техническая эксплуатация летательных аппаратов в условиях ускорения научно-технического прогресса. М.: МИИГА, 1989. С. 16–22.
8. Чинючин Ю.М., Чичерин А.С. Оценка единичных свойств эксплуатационной технологичности изделий авиационной техники // Современные задачи повышения эффективности технической эксплуатации летательных аппаратов. М.: МИИГА, 1988. С. 71–74.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 12-е изд., перераб. М.: Высшее образование, 2006. 479 с.
10. Далецкий С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 2005. 416 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чинючин Юрий Михайлович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

Соловьев Алексей Сергеевич, аспирант кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, soloviev-avia@yandex.ru.

THE USE OF CORRELATION ANALYSIS OF TWO-DIMENSION STOCHASTIC PROCESS FOR HELICOPTER MAINTENANCE WORKABILITY ESTIMATION

Yuriy M. Chinyuchin¹, Alexey S. Solov'ev¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The new calculated program complex which main task is to find the optimal algorithm of stochastic helicopter design and assembling in terms of maintenance efficiency is described. It is shown that the use of the developed calculated program complex allows to efficiently solve the problems of helicopter construction with high-rating maintenance workability factors.

It is shown that for efficient problem solving connected with Maintenance and Repair costs reduction while helicopter engineering and assembling in design office it is appropriate to use correlated analysis for maintenance workability estimation with the use of CAD system. The calculated program complex is based on mathematical apparatus of linear correlated dependence of two-dimension (stochastic) process. The linear correlated dependence is considered as linear or any connection close to it between two variables for which the correlated analysis theorem is true.

The algorithm of calculated program complex for helicopter maintenance workability estimation consists of five steps: choice of equipment that needs to be installed on the helicopter; correlation coefficient calculation for helicopters having this equipment and revealing of optimal variants of location; zone partition of the developed helicopter and analysis of possible disposal of clusters in optimal order; disposal of clusters on the designed helicopter; correlation coefficient calculation, direct regression construction for the designed helicopter and comparison of these readings with helicopters-analogues. The calculation data of correlated analysis characteristics which indicate a possibility of increase of helicopter maintenance workability level with a modicum of effort and time when working out the particular functional system is given.

Key words: maintenance workability, correlation analysis, stochastic process.

REFERENCES

1. **Smirnov N.N., Chinyuchin Yu.M.** *Ekspluatatsionnaya tehnologichnost letatelnykh apparatov* [Maintainability of aircraft]. Moscow, Transport, 1994. (in Russian)
2. **Chinyuchin Yu.M.** *Tehnologicheskie protsessy i tehnicheskogo obsluzhivaniya letatelnykh apparatov* [Technological processes of maintenance of aircraft]. Moscow, *Universitetskaya kniga* [University book], 2008. (in Russian)
3. **Venttsel E.S.** *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, *Vysshaya shkola* [Higher school], 1999. (in Russian)
4. **Smirnov N.N., Chinyuchin Yu.M.** *Osnovy teorii tehnikosoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov. Uchebnik* [Bases of technical operation of aircraft theory. Textbook]. Moscow, MSTUCA, 2015, 505 p. (in Russian)
5. **Smirnov N.N., Itskovich A.A., Chinyuchin Yu.M.** *Nadezhnost i ekspluatatsionnaya tehnologichnost letatelnykh apparatov* [Reliability and manufacturability of the aircraft]. M., MIIGA, 1989, 112 p. (in Russian)
6. **Smirnov N.N., Chinyuchin Yu.M.** *Sovremennyye problemy tehnikosoy ekspluatatsii vozdushnykh sudov. Chast 1* [Modern problems of technical operation of the aircraft. Part 1: Textbook]. Moscow, MSTUCA, 2007, 80 p. (in Russian)
7. **Chinyuchin Yu.M.** *Model i osnovnyye printsipy upravleniya ekspluatatsionnoy tehnologichnostyu magistralnykh samoletov* [The model and the basic principles of management of exploitation-tional adaptability haul aircraft]. *Tehnicheskaya ekspluatatsiya letatelnykh apparatov v usloviyakh*

uskoreniya nauchno-tehnicheskogo progressa [Technical operation of aircraft in terms of accelerating scientific and technological progress]. Moscow, MIIGA, 1989, pp. 16–22. (in Russian)

8. Chinyuchin Yu.M., Chicherin A.S. *Otsenka edinichnykh svoystv ekspluatatsionnoy tehnologichnosti izdeliy aviatsionnoy tekhniki* [Evaluation of individual properties maintainability products aeronautical engineering]. *Sovremennyye zadachi povyisheniya effektivnosti tekhnicheskoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov* [Modern problems of increase of efficiency of technical operation of aircraft]. Moscow, MIIGA, 1988, pp. 71–74. (in Russian)

9. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: Textbook. allowance. 12th ed., Revised. Moscow, Higher Education, 2006, 479 p. (in Russian)

10. Daletskiy S.V. *Formirovaniye ekspluatatsionno-tehnicheskikh harakteristik vozdukhnykh sudov grazhdanskoy aviatsii* [Formation of operational and technical characteristics of civil aircraft]. Moscow, *Vozdushnyy transport* [Air transport], 2005, 416 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chinyuchin Yuriy Michaylovich, Professor, Doctor of Science, Head of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

Solov'ev Alexey Sergeevich, Post Graduate of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, soloviev-avia@yandex.ru.