

– предварительным анализом набора пакетов на предмет полноты и правильности составления. В случае невыполнения этих условий программа выдает соответствующие предупреждения, исключая тем самым возможные ошибки, вносимые оператором при корректировке цепочки пакетов;

– работой в автоматическом режиме. При этом запускается заданная цепочка пакетов с автоматическим изменением данных на каждом цикле выполнения этих пакетов, а объем изменяемых данных задается предварительно оператором;

– анализом протокола обмена, который выявляет ошибки в функционировании ИМС на основании полученных данных и отображает оператору подробную информацию об этом;

– имитацией нештатных ситуаций, которая проверяет работоспособность ИМС при неполноте или недостоверности передаваемой в него информации.

Таким образом, разработанное ПО полностью решает поставленные задачи автономной отработки ИМС, а так-

же, благодаря своим особенностям, позволяет проверять работоспособность ИМС при возникновении нештатных ситуаций путем их моделирования, автономно обрабатывать каждый комплект ИМС (основной/резервный), подключаемый к каждому комплекту ЦПМ (основному/резервному), проводить автономную отработку БУ в сборе.

В настоящее время с помощью данного программного обеспечения проведена автономная отработка ИМС блоков управления космических аппаратов «Муссон». Оно используется и при отработке КА «Глонасс-К», «Луч-5». В ходе проведения испытаний была подтверждена правильность выбранного подхода к построению программного обеспечения, которое доказало свою надежность, универсальность и простоту в использовании, благодаря чему оно может применяться для отработки последующих ИМС блока управления перспективных КА.

Дальнейшим направлением развития программного обеспечения автономной отработки может быть интеграция дополнительных программ в основную для более удобного оперирования с данными на уровне единой программной оболочки.

V. V. Prudkov

## SOFTWARE OF STAND-ALONE DEVELOPMENT OF SUBSYSTEMS OF THE CONTROL MODULE OF THE PERSPECTIVE SPACE VEHICLES

*The conception, composition, principle of construction and interaction of components and also capabilities of stand-alone development of the software for the subsystems of the control module of space vehicles is considered. The developed protocol of exchange of the workplace program and the central-processor module special software is described.*

*Keywords: control module, central-processor module, interfacing of the control module, stand-alone development.*

© Прудков В. В., 2010

УДК 629.735.064

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко, Л. Г. Шаймарданов

## ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

*Проведен анализ правомерности применения традиционного подхода к расчету надежности систем с индивидуальным резервированием. Разработан альтернативный метод расчета систем с индивидуальным резервированием и показана возможность его использования при решении задач оптимизации структуры функциональных систем.*

*Ключевые слова: анализ надежности, оптимизация структуры, функциональные системы.*

Функциональные системы самолетов выполняют большое число жизненно важных функций: осуществляют привод рулевых поверхностей средств механизации планера, обеспечивают питание топливом авиационных двигателей, осуществляют наддув салонов и кондиционирование воздуха в них, снабжают всех потребителей переменным и постоянным током, защищают самолет от обледенения, выполняют функции по пожаротуше-

нию, обеспечивают автоматическое пилотирование и самолетовождение (аэронавигацию).

На всех магистральных самолетах одноименные функциональные системы выполняют одни и те же функции. Вместе с тем одноименные системы различных разработчиков, а зачастую и одного разработчика на различных типах самолетов, имеют существенные различия в структуре функциональных систем. К тому же при од-

ном и том же уровне развития машиностроения, обеспечивающем одинаковый уровень надежности агрегатов систем, степень как индивидуального, так и общего резервирования у одноименных систем различных типов самолетов существенно различается. Такое положение связано с отсутствием исследований в области оптимизации структуры систем.

Проведем анализ возможностей общего и индивидуального резервирования в обеспечении надежности систем.

Рассмотрим систему индивидуального резервирования, содержащую  $n$  последовательно соединенных блоков, каждый из которых включает  $m = 2$  параллельно соединенных агрегатов (рис. 1).

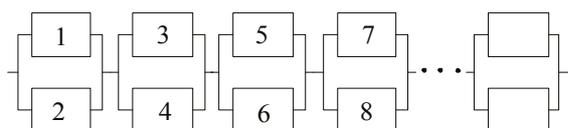


Рис. 1. Структурная схема системы с индивидуальным резервированием

Будем считать, что все агрегаты имеют одинаковые параметры потоков отказов, равные  $\omega$ .

Примем в качестве математической модели вероятности отказа агрегатов распределение с равномерной плотностью вероятности. Тогда интегральная функция вероятности отказа агрегата будет

$$q(t) = \omega \cdot t.$$

Положив  $t = 1$ , найдем вероятность отказа на 1 ч полета:

$$q = \omega.$$

При традиционном подходе к расчету надежности [1; 2] вначале определяется вероятность отказа блоков из параллельно включенных агрегатов

$$q_8 = \omega^2$$

и их вероятность безотказной работы

$$P_8 = 1 - \omega^2.$$

Исходная система в этом случае заменяется системой последовательно соединенных элементов, вероятности безотказной работы которых равны  $P_8$ . Далее определяется вероятность отказа исходной системы:

$$Q_c^r = 1 - (1 - \omega^2)^n. \quad (1)$$

Таким образом, вероятность отказа системы с последовательно соединенными блоками возрастает по мере увеличения числа блоков  $n$ .

Однако в действительности это далеко не так. Исходная система (см. рис. 1) откажет только в том случае, если в одном из блоков (любом) откажут оба агрегата. А по-

скольку вероятности отказов агрегатов в 1 ч одинаковы и равны  $\omega$ , то возможны различные сценарии отказов агрегатов, не приводящие к отказу системы, например могут отказаться агрегаты 1, 3, 6, 7 безразлично в какой последовательности. И чем больше  $n$ , тем меньше вероятность отказа двух агрегатов в одном блоке.

Определим эту вероятность. Первым может отказать любой агрегат системы с вероятностью  $\omega$ . Вероятность того, что вторым откажет агрегат, установленный в одном блоке с первым, равна  $\frac{1}{2n-1}\omega$ . Тогда наибольшая вероятность отказа рассматриваемой системы при предлагаемом альтернативном подходе к расчету систем с индивидуальным резервированием будет

$$Q_c^a(n) = \frac{\omega^2}{2n-1}. \quad (2)$$

Другие возможные сценарии развития отказа в системе определяют существенно меньшие вероятности отказа в соответствии с выражением

$$Q_{ci}^a(n) = \frac{\omega^i}{\prod_{j=2}^i (2n-j-1)}, \quad (3)$$

где  $i$  – число отказавших агрегатов в системе, приводящее ее к отказу при рассматриваемом сценарии развития отказов.

Здесь важно подчеркнуть тот факт, что при увеличении числа  $n$  последовательно соединенных блоков вероятность отказа в соответствии с (2) и (3) уменьшается, а не возрастает в соответствии с традиционным подходом (1).

Разработанный альтернативный метод расчета надежности систем с резервированием позволяет по-новому взглянуть на возможности повышения надежности систем за счет изменения подхода к применению сочетания общего и индивидуального резервирования.

Рассмотрим систему, состоящую из двух параллельно работающих подсистем, содержащих по 16 последовательно соединенных агрегатов (рис. 2).

Вероятность отказа такой системы определится как

$$Q_c^{\text{общ}} = [1 - (1 - \omega)^2]^{16}, \quad (4)$$

где  $n = 16$  – число последовательно соединенных агрегатов;  $m = 2$  – число параллельно соединенных подсистем;  $\omega = 0,01$  – параметр потока отказов, одинаковый для всех агрегатов.

Не изменяя числа агрегатов в системе и степень ее резервирования, разделим систему на  $z$  частей, соединенных последовательно (рис. 3).

Рассчитаем надежность этой системы. Вероятность отказа каждой ветви любой из четырех частей будет

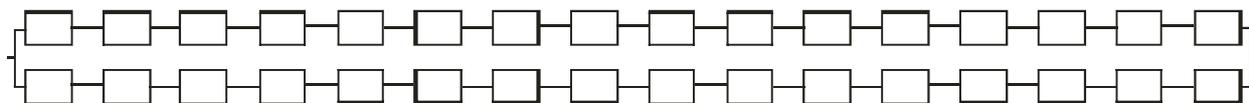


Рис. 2. Система общего резервирования

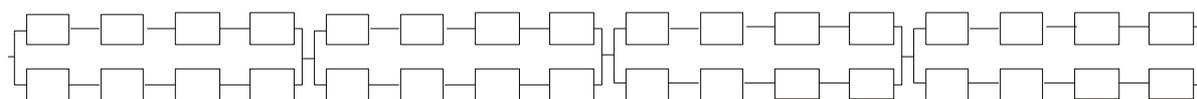


Рис. 3. Исходная система, разделенная на  $z = 4$  части общего резервирования

$$Q_b = 1 - (1 - \omega)^4 \quad (5)$$

Тогда система, представленная на рис. 3, преобразуется к следующему виду (рис. 4).

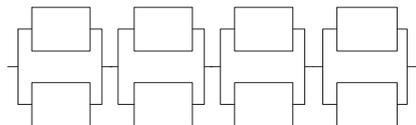


Рис. 4. Исходная система, разделенная на  $z = 4$  частей и преобразованная к схеме индивидуального резервирования

В этой системе вероятность отказа каждого элемента равна  $Q_b$  и определяется по формуле (5). Первая и наибольшая вероятность отказа системы (см. рис. 4) реализуется, когда откажут два элемента в одном блоке:

$$Q^a(z) = \frac{\omega^2}{7}$$

Для рассматриваемых систем были выполнены расчеты вероятностей отказов при общем резервировании, и после разбиения на  $z$  частей по традиционной и альтернативной методикам построены зависимости от  $z$   $\frac{Q_{\text{общ}}}{Q^{\text{общ}}(z)}$  и  $\frac{Q_c}{Q^{\text{общ}}(z)}$  (рис. 5–8).

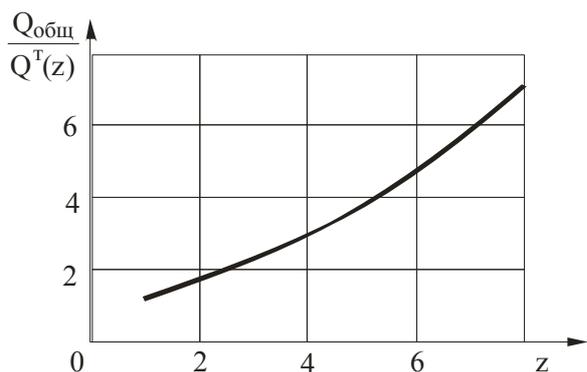


Рис. 5. Зависимость от  $z$  отношения вероятностей отказа исходной системы общего резервирования к вероятности отказа системы, разделенной на  $z$  частей и рассчитанной по традиционной методике при  $n = 16$ ,  $m = 2$  и  $\omega = 1 \cdot 10^{-2}$

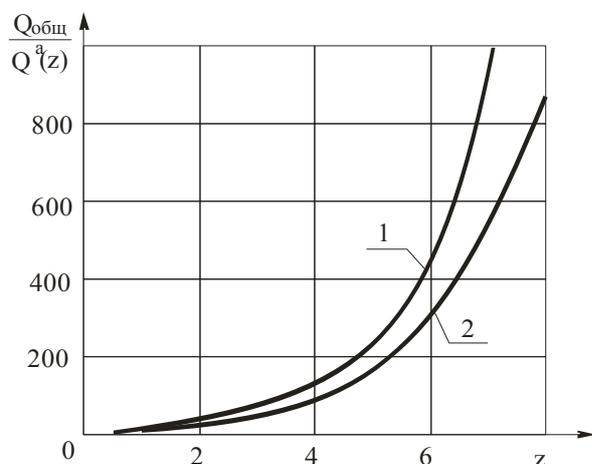


Рис. 6. Зависимость от  $z$  отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы, разделенной на  $z$  частей и рассчитанной по альтернативной методике при  $n = 16$ ,  $m = 2$ ,  $\omega = 1 \cdot 10^{-5}$  (1),  $\omega = 10^{-2}$  (2)

Расчеты, выполненные на основе традиционной методики, показывают увеличение надежности системы общего резервирования при разделении ее на  $z$  частей и переводе ее в систему, содержащую  $z$  блоков с индивидуальным резервированием (см. рис. 5). Но это увеличение надежности не существенное: так, при  $z = 2$  оно составляет 1,8 раза, а при  $z = 4 - 3,5$  раза.

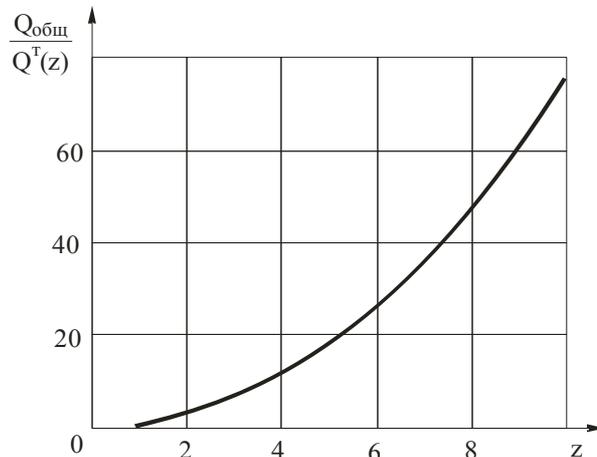


Рис. 7. Зависимость от  $z$  отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы, разделенной на  $z$  частей и рассчитанной по традиционной методике при  $n = 20$ ,  $m = 3$  и  $\omega = 1 \cdot 10^{-2}$

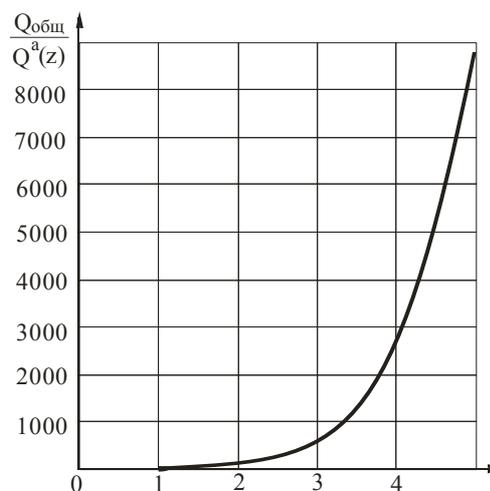


Рис. 8. Зависимость от  $z$  отношения вероятностей отказа исходной системы к вероятности отказа системы, разделенной на  $z$  частей и рассчитанной по альтернативной методике при  $n = 20$ ,  $m = 3$  и  $\omega = 1 \cdot 10^{-2}$

Перевод системы с общим резервированием к системе с  $z$  блоками индивидуального резервирования по традиционной методике сопряжен с определенными трудностями, на которых мы остановимся далее, а несущественное увеличение надежности не стимулирует разработчиков систем к их преодолению.

Кратко охарактеризуем эти трудности. В гидравлической системе, состоящей из двух одинаковых подсистем, разрыв трубопровода либо корпуса одного из агрегатов приводит к потере всей гидрожидкости в подсистеме. Вторая подсистема останется работоспособной и обеспечит выполнение всех функций гидросистемы. Изменение схемы системы, разделяющее ее на  $z$  блоков индивидуаль-

ного резервирования, лишит ее такой защиты. Подсистемы оказываются объединенными в одну, и потеря жидкости в одной ветви  $z$ -й части системы приведет к потере жидкости во всей системе, а это недопустимо. Здесь возможно использование ряда блокирующих мер, например в каждой ветви  $z$ -й части системы может устанавливаться расходомер, в ее начале – запорный кран, а в конце – обратный клапан. На определенных участках полета расхода жидкости через систему быть не должно. Если расход жидкости на этих участках появляется, то это говорит о разгерметизации. В этом случае от расходомера поступает сигнал, перекрывной кран закрывается и утечка жидкости с учетом обратного клапана устраняется. При включении штатных потребителей, требующих определенного расхода жидкости для их работы, перекрывной клапан блокируется.

Для систем электропитания система обеспечения сохранения работоспособности станет намного проще. При обрыве цепи одной из ветвей  $z$ -й части эту ветвь блокировать не следует, так как она перестает работать и всю нагрузку принимает параллельная ветвь этой  $z$ -й части. Для блокирования распространения влияния короткого замыкания в одной ветви  $z$ -й части на предыдущие части системы в начале каждой ветви каждой  $z$ -й части необхо-

димо установить автомат защиты сети АЗС (предохранитель).

При альтернативной методике расчета увеличение надежности с разбиением системы на  $z$  частей существенно больше (см. рис. 6). Так, при  $z = 4$  оно достигает 100 раз, а при  $z = 6 - 340...400$  раз.

Для системы с общим резервированием при трех параллельно работающих подсистемах эффект будет еще выше. При традиционном подходе к расчету надежности при  $z = 4$  он дает 12-кратное увеличение надежности (см. рис. 7), а при альтернативном подходе (см. рис. 8) надежность возрастает в 2 800 раз при  $z = 4$  и в 9 000 раз при  $z = 5$ .

Это не может не стимулировать разработчиков к преодолению упомянутых выше трудностей, связанных с переходом от систем с общим резервированием к системам, имеющим  $z$  блоков индивидуального резервирования.

#### Библиографические ссылки

1. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Надежность и эффективность авиационного оборудования. М.: Транспорт, 1995.
2. Сугак Е. В., Василенко Н. В., Назаров Г. Г. Надежность технических систем. Красноярск: РАСКО, 2001.

E. A. Furmanova, O. G. Boiko, L. G. Shaimardanov

### THE CIVIL AVIATION AIRPLANES FUNCTIONAL SYSTEM STRUCTURE OPTIMIZATION ABILITIES

*The analysis of legitimacy of application of the traditional approach to calculation of reliability of systems with individual reservation is given. The alternative method of calculation of systems with individual reservation is developed and possibility of its use at the decision of problems of optimization of structure of functional systems is shown.*

*Keywords: reliability analysis, structure optimization, functional systems.*

© Фурманова Е. А., Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г., 2010

УДК 621.373.14

А. М. Михеенко, С. С. Абрамов, И. И. Павлов

### К АНАЛИЗУ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*Приведены результаты исследования широтно-импульсной системы (ШИС), охваченной цепью отрицательной обратной связи. На основе асимптотического метода снижения порядка линейной части системы предложена методика сведения ШИС к эквивалентной нелинейной амплитудно-импульсной системе, для которой применимы известные методы исследования.*

*Ключевые слова: устойчивость, широтно-импульсные системы, сложные линейные цепи, нелинейные искажения.*

Широтно-импульсные системы (ШИС) находят применение в устройствах автоматического регулирования (управления), а также в усилителях мощности класса D с промежуточной широтно-импульсной модуляцией, охваченных отрицательной обратной связью для уменьшения нелинейных искажений. Наличие обратной связи в ШИС неизбежно

связано с проблемой обеспечения устойчивости. Решение этой проблемы в виде, приемлемом для практического применения, для ШИС в общем случае не существует. Возможности частных решений были рассмотрены в [1; 2].

Необходимо провести поиск новых методов анализа устойчивости ШИС, применимых в практических приложениях.