



**Хахулин Г.Ф., Титов Ю.П.**

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИХ ПОСЛЕПРОДАЖНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

*Обсуждается актуальность разработки имитационной модели надежности структуры летательного аппарата для анализа процессов послепродажного обслуживания летательных аппаратов военного назначения. Приводится описание созданной имитационной модели и результаты имитационного эксперимента.*

**Ключевые слова:** летательные аппараты, послепродажное обслуживание, имитационная модель.

### **Введение**

В настоящее время в соответствии с решениями правительства РФ, соответствующими приказами и нормативными актами Министерства обороны осуществляется перестроение процесса послепродажного обслуживания объектов военного назначения, в том числе, и авиационной техники. В отличие от стратегии самостоятельного обслуживания такой техники подразделениями Министерства обороны осуществляется переориентация на обслуживание ее предприятиями-производителями. Для решения этих задач на предприятиях-производителях и связанных с ними предприятиях смежников создаются специальные структуры, обеспечивающие этот процесс: планирование производства, хранение и своевременную поставку запасных частей, регламентное техническое обслуживание и ремонт техники, вышедшей из строя. Эти структуры и подразделения должны тесно взаимодействовать с подразделениями Российской армии, осуществляющими боевую эксплуатацию закупленной боевой техники. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является исследование процессов послепродажного обслуживания для создания эффективной системы управления этим процессом. Этим вопросам, в частности, посвящена монография [1], в которой произведен анализ структуры процесса послепродажного обслуживания сложных технических объектов, предлагается математический аппарат для его исследования. При этом в книге сделан акцент на использование вероятностно-аналитических методов. Известны ограничения возможностей таких методов по адекватному отображению процессов, происходящих в

сложных организационно-технических системах, к которым относится система послепродажного обслуживания. Там же говорится об актуальности применения для этих целей имитационного моделирования, не имеющего принципиальных ограничений по адекватности отображения процессов любой сложности. В данной работе делается попытка создания одной из наиболее важных частей общей имитационной модели (ИМ) послепродажного обслуживания – ИМ надежности структуры сложного технического объекта, а именно, летательного аппарата (ЛА), послепродажное обслуживание которого осуществляется. Под надежностной структурой ЛА (НСЛА) понимается совокупность его компонентов (элементов, блоков, подсистем и всего ЛА в целом), процесс функционирования которых рассматривается с точки зрения обеспечения требований к надежности ЛА (безотказная работа, регламентное техническое обслуживание, появление отказов, выполнение ремонтных работ, использование для этого имеющихся запасных частей, ремонтных ресурсов и т.п.), определяемых набором характеризующих эту надежность показателей (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и др.).

Цели и задачи указанной имитационной модели определяются потребностями имитационной модели верхнего уровня, отображающей процесс функционирования всей системы послепродажного обслуживания. С этой точки зрения ИМ НСЛА должна, с одной стороны, давать возможность оценки показателей надежности ЛА при заданной стратегии обеспечения процесса его функционирования запасными частями и ремонтными ресурсами, а с другой стороны, – обеспечить процессы выработки стратегии накопления и использования запасных частей, создания и поддержания необходимых ремонтных ресурсов статистической информацией о временах безотказной работы различных частей НСЛА, количественной оценкой потребности в запасных частях и ремонтных ресурсах на основе информации о реализации процессов отказа и восстановления частей НСЛА.

Ниже приводится информация, отражающая процесс имитационного моделирования НСЛА: постановка задачи, этапы формализации, разработки имитационной программы, проведения имитационных экспериментов.

### **Постановка задачи**

Ставится задача разработки ИМ НСЛА для целей использования ее в составе ИМ процесса послепродажного обслуживания ЛА.

Назначение ИМ:

- оценка показателей надежности ЛА при заданной стратегии обеспечения процесса его функционирования запасными частями и ремонтными ресурсами;
- обеспечение процессов выработки стратегии и принятия решений по накоплению и использованию запасных частей, созданию и поддержанию необходимых ремонтных ресурсов статистической информацией о временах безотказной работы различных частей НСЛА, количественной оценкой потребности в запасных частях (ЗЧ) и ремонтных ресурсах на основе информации о реализации процессов технического обслуживания (ТО), отказа и восстановления частей НСЛА.

Используемые допущения.

На начальном этапе разработки ИМ НСЛА будем предполагать наличие неограниченных объемов запасных частей и величин ремонтных ресурсов.

### **Концептуальное описание НС ЛА и ее процесса функционирования**

НСЛА представляется в виде многоуровневой древовидной структуры, в которой на верхнем уровне располагается компонента, соответствующая всей НСЛА. На следующем, более низком уровне, НСЛА система разделяется на части, соответствующие подсистемам ЛА, выполняющие

отдельные жизненно важные и целевые функции (планер, двигатель, система управления полетом, система управления оружием и др.). Подсистемы в свою очередь делятся на более мелкие функциональные подсистемы и далее на блоки. Блоки же состоят из других блоков и элементов. На самом низком уровне любой древовидной ветви НС находятся элементы.

Элемент с точки зрения процесса функционирования НС считается неделимым. Для элементов НС задаются законы распределения времени безотказной работы (ВБР). Отказы элементов по своей природе могут быть постепенными (износowymi) и внезапными. [2,3] Те и другие отказы могут реализоваться параллельно. Для формализованного вероятностного описания ВБР используются различные виды законов распределения (ЗР). Наиболее распространенными из них являются: экспоненциальный, нормальный, логнормальный, Вейбула-Гнеденко и др [4].

Отказ элемента НС может приводить к определенным последствиям (отказу, неисправности или снижению эффективности функционирования) для состояний частей той ветви НСЛА (по цепочке вверх), в которую указанный элемент входит (в том числе, и составляющей НС самого высокого уровня, т.е. всей НСЛА).

Для увеличения показателей надежности для отдельных частей НСЛА на различных ее уровнях могут применяться определенные виды резервирования: нагруженный (горячий), полунангруженный, ненагруженный (холодный), скользящий и др. Вследствие этого отказ определенной части НСЛА не обязательно приводит к отказу частей более высокого уровня.

Если отказ элемента не приводит к отказу включающей непосредственно его части НС, то состояние этой части определяется как неисправное [5]: т.е. она полностью выполняет все свои функциональные задачи (возможно, с меньшей эффективностью), но при этом содержит отказавшие элементы. В противном случае часть НС переходит в состояние отказа.

В процессе эксплуатации на ВБР каждого элемента влияют нагрузки, воздействующие на ЛА. Нагрузки зависят от режима функционирования: боевой вылет, патрулирование, тренировочный вылет, хранение ЛА на открытой площадке, хранение ЛА под навесом, хранение ЛА в отапливаемом ангаре и тд. Режим эксплуатации есть перечень условий, в которых эксплуатируется ЛА. Смена режимов эксплуатации ЛА, как правило, осуществляется в плановом порядке (боевая готовность, боевой вылет, ТО и т.п.), но может быть и случайной (например, при непредвиденном изменении состояния НС). Для каждого режима в общем случае может определяться свой состав тех частей НСЛА, который обеспечивает его реализацию, а для элементов НСЛА этих частей могут задаваться свои ЗР ВБР.

Для каждого отдельного элемента НС могут реализовываться следующие состояния:

1. Включен. Элемент выполняет все возложенные на него функции. Для перехода в данное состояние элемент должен быть работоспособным (отсутствие отказа) и установленным на ЛА.
2. Отключен. Элемент выключен, и никакие функции не выполняет, при этом считается, что элемент ожидает своего включения в определенных условиях. Отключенный элемент считается работоспособным и установленным на ЛА.
3. Отказал. Элемент в состоянии отказ. Не выполняет никаких функций и требует срочного восстановления. После восстановления переходит в выключенное состояние.
4. Выведен из состава НСЛА (снят с борта ЛА). Элемент демонтирован для проведения ТО или ремонтных работ. При этом элемент может быть как в состоянии отказа, так и в состоянии работоспособности.

Аналогичные состояния могут быть определены и для других частей НСЛА (не обязательно являющихся элементами).

Помимо режимов работы ЗР ВБР элемента, в общем случае, зависит от предыстории его функционирования: величин временных интервалов, в течение которых элемент работал в других режимах. Кроме того, в некоторых частях НС могут происходить зависимые отказы: отказы одних элементов, вызванные отказами других в результате изменения условий эксплуатации.

С точки зрения анализа надежности НСЛА – это восстанавливаемая система, т.е. после события отказа определенной части НСЛА, если это не приводит к катастрофическим последствиям, производятся восстановительные работы (ремонт или замена). Возникновение катастрофической ситуации – это явление, реализуемое с очень малой вероятностью. Поэтому разработка рассматриваемой здесь ИМ не ориентирована на моделирование таких ситуаций.

Процесс восстановления части НСЛА состоит из двух процедур: процедуры обнаружения отказа и процедуры восстановительных работ (ремонта или замены отказавшей части НСЛА).

События отказов некоторой части НСЛА, в общем случае, могут проявляться не сразу, а если и устанавливаются, то, как правило, не сразу могут быть устранены. Т.е. отказы различных частей НСЛА могут накапливаться, и это накопление может в определенных сочетаниях приводить к более серьезным последствиям, чем каждый из отказов определенной части НСЛА в отдельности.

Обнаружение отказа частей НС может произойти следующим образом:

1. С помощью специальных индикаторов, в процессе эксплуатации ЛА. Такие отказы назовем «явными».

2. При техническом обслуживании. Такие отказы назовем «скрытыми». Они обнаруживаются с помощью применения специальных измерительных устройств и средств наблюдения.

Обнаружение отказа некоторой части НСЛА, как следствие, запускает процесс ее ремонта (если это предусмотрено техническим регламентом) или замены (при наличии ЗЧ и необходимых ремонтных ресурсов). В общем случае процесс восстановления является случайным: случайным может быть событие обнаружения «скрытых» отказов, случайным может быть время обслуживания, операции ремонта или замены отказавших частей. Однако, при отсутствии надежной исходной статистической информации времени проведения восстановительных работ, можно использовать данные по нормативам из соответствующего технического описания [6,7].

Еще раз указываем на используемое при разработке рассматриваемой здесь ИМ предположение о неограниченном наличии необходимых ЗЧ и ремонтных ресурсов, позволяющее на данном этапе упростить процесс формализации. При дальнейшем развитии разрабатываемой ИМ эти предположения будут сняты.

## Выбор и обоснование класса ИМ

Процесс функционирования НСЛА с помощью ИМ можно отобразить, описывая такие событийные явления как: отказы элементов и связанные с этим отказы других частей НС, начало и окончание этапов проведения различного вида ТО, обнаружение отказов, начало и окончание проведения ремонтных работ и работ по замене отказавших частей НС и т.п. С учетом этого модель НСЛА можно

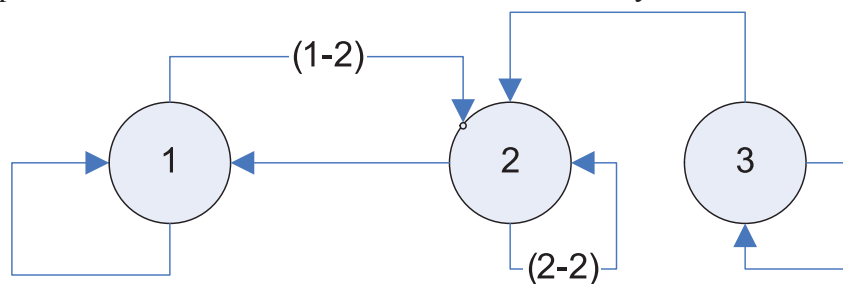


Рис. 1. Граф-схема взаимосвязи событий

представить как дискретную ИМ, функционирующую на основе метода модельных (временных) событий (ММС) [8]. Перечень основных модельных событий и схема взаимосвязи между ними, отражающая процесс планирования одних событий при обработке других, показан на рис 1.

**Название и кодирование основных временных событий:**

1. Отказ элемента;
2. Выполнение действия над частью НСЛА (включение, отключение в процессе применения ЛА; окончание монтажа, демонтажа или настройка в процессе ТО);
3. Смена режима функционирования.

**Условия планирования событий:**

- (1-2) Если у отказавшего элемента есть резервный работоспособный элемент;
- (2-2) Если выполнены не все действия из заданной последовательности для перевода НС ЛА в определенный режим эксплуатации.

**Показатели критерия оценки результатов моделирования:**

1. Реализация и статистические характеристики процессов потребления ЗЧ и ремонтных ресурсов при проведении ремонтно-восстановительных работ:
  - при обработке статистики по множеству прогонов – частоты отказов отдельных частей НСЛА в течение прогона ИМ;
  - при обработке по одному длинному прогону в предположении стационарности и эргодического характера процессов, происходящих в ИМ – оценки интенсивностей отказа отдельных частей НСЛА.
2. Коэффициент готовности НСЛА (отношение времени безотказной работы НСЛА ко времени прогона ИМ).

## **Параметры ИМ**

Дается укрупненное описание без детального обсуждения структур данных, используемых для задания и хранения.

- Параметры НСЛА, отражающие ее многоуровневую древовидную структуру, используемые в определенных ее частях виды резервирования, последствия отказа каждой отдельной части (определена зависимость отказов различных частей НС, возможность проведения восстановительных работ отдельных частей НСЛА путем замены отказавших частей или проведения ремонтных работ), виды и временные характеристики ТО, проводимых для отдельных частей и их периодичность, для «скрытых» отказов элементов определены виды ТО, при проведении которых они могут быть обнаружены, а для сложных скрытых отказов – вероятность обнаружения, перечень действий, выполняемых при проведении ремонтно-восстановительных работ и их временные характеристики.

- Перечень режимов функционирования НСЛА.
- Состав частей НС, функционирование которых должно осуществляться в каждом режиме.
- Сценарный план смены режимов функционирования НС.
- Виды и параметры ЗР ВБР элементов для каждого режима.

## **Состояние ИМ**

Важнейшими переменными состояниями ИМ НСЛА являются переменные, определяющие текущее состояние отдельных частей НС.

Эти переменные определяются в списковой структуре данных, однозначно связанной с НС ЛА. В соответствии с приведенным выше описанием перечень состояний частей НС ЛА следующий:

исправна или неисправна; включена в работу или не включена; находится в составе НСЛА или выведена из ее состава (демонтирована).

Для всей НСЛА в целом, а также для отдельных её частей, определяется вид режима, в котором они находятся в текущее модельное время. В соответствии с этим определяется включение в работу отдельных частей НС.

Для каждого элемента НС ЛА накапливается суммарное время наработки (с учетом коэффициентов нагрузки, зависящих от текущего режима работы). А для каждой части НСЛА накапливается суммарное время нахождения ее в безотказном (работоспособном) состоянии. При организации по множеству прогонов для каждой части НСЛА, в том числе, и для всей НС по интервалам модельного времени накапливаются частоты отказов.

Для указанных выше основных временных событий перечень информации, указанной в дополнительных атрибутах записи для этих событий имеет следующий вид:

**Событие «Отказ элемента» (1):**

- Указатель на отказавший элемент;
- Вид отказа.

**Событие «Выполнение действия над частью НСЛА» (2):**

- Указатель на часть НСЛА, над которой совершается действие;
- Название действия;
- Время, необходимое для выполнения действия;
- Коэффициент нагрузки на часть НСЛА при данном действии;
- Необходимое для выполнения данного действия состояние НСЛА.

**Событие «Плановая смена режима функционирования» (3):**

- Номер режима из множества возможных режимов функционирования НСЛА.

### **Начальное состояние ИМ**

Состояние всех частей – исправное. Режим работы – первый из плана. Включены в работу все части НСЛА в соответствии с определенным режимом. Нарботка по каждой части НС – 10% от предельной. В СБС занесены записи по планируемым отказам всех видов всех элементов НСЛА. Переменные для сбора статистики в нулевом состоянии.

### **Моделирование случайных явлений**

Наиболее важным случайным явлением в рассматриваемой ИМ является случайная величина – **время безотказной работы (ВБР) элементов НСЛА**. Сложность моделирования этого случайного явления определяется следующими обстоятельствами:

- элементы НСЛА в процессе ее функционирования работают в разных режимах, которые меняются в соответствии с заданным планом;
- для каждого элемента в разных режимах определены свои параметры ЗР ВБР;
- отказы элементов могут быть двух типов: внезапные отказы (ВО) и износные отказы (ИО). Предполагается, что время свершения ВО зависит только от условий работы НСЛА (вида режима), а время свершения ИО зависит еще и от длительности времени функционирования в определенных режимах (так называемого времени наработки);
- существуют зависимые отказы, когда отказ некоторого элемента вызывает, как следствие, отказы других элементов, либо ускоряет их отказ, влияя соответствующим образом на параметры закона распределения их ВБР.

Предполагается использовать различное вероятностное описание ВБР для указанных типов отказов и, соответственно, разные алгоритмы определения моментов их свершения:

- для ВО используется экспоненциальный закон распределения (ЭЗР) ВБР, параметры которого будут определяться видом элемента и видом режима работы НСЛА. Теоретически известно, что ЭЗР «не имеет памяти», т.е. при каждой смене режима работы НСЛА параметры закона распределения ВБР для очередного режима не зависят от времени наработки в предыдущих режимах. Используя это свойство ЭЗР, **моделирование момента ВО** предлагается осуществлять следующим образом: при каждой смене режима получается очередная реализация ВБР, которая сравнивается с длительностью работы НСЛА в этом режиме на очередном этапе; момент отказа фиксируется, если реализация ВБР меньше длительности работы в рассматриваемом режиме;

- для ИО используется нормальный закон распределения (НЗР). При этом для каждого режима используется понятие «коэффициент нагрузки», который характеризуется соотношением интенсивностей износа элемента в том или ином режиме, по отношению к интенсивности его износа в некоторых условиях, для которых определены параметры НЗР. На основании этого **моделирование момента ИО** предлагается осуществлять следующим образом: в соответствии с НЗР получается реализация времени наработки до отказа; затем в процессе моделирования суммируются фактические наработки по реализовавшимся длительностям режимов, взвешенные (умноженные) на соответствующие коэффициенты нагрузки. Момент ИО определяется по равенству указанных величин.

Моделирование реализаций ВБР элементов помимо моментов смены режимов работы НСЛА осуществляется так же при замене отказавших частей НСЛА при моделировании проведения ремонтно-восстановительных работ, как следствие зависимых отказов.

Для **моделирования зависимых отказов** в соответствии со структурой взаимосвязи зависимых отказов, определенной в параметрах ИМ, при отказе какого либо элемента определяется множество других элементов, отказы которых зависят от него.

Если это ВО, то в соответствии с заданной вероятностью моделируются отказы этих зависимых элементов, либо переопределяются параметры ЗР ВБР в сторону увеличения вероятностей для меньших значений ВБР, и в соответствии с ним получается новая реализация ВБР.

Если это ИО, то изменяются в сторону увеличения коэффициенты нагрузки для реализующихся в последствии режимов, что опять же приводит к сокращению времени до реализации ИО.

Еще одно случайное явление, реализацию которого **необходимо моделировать – это событие обнаружения скрытых отказов**. Моделирование этих событий осуществляется при обработке модельных событий, связанных с проведением действий по техническому обслуживанию НСЛА в соответствии с заданными в параметрах ИМ вероятностями свершения событий обнаружения скрытых отказов.

### Алгоритмы обработки модельных событий

При обработке события «Отказ элемента» происходит последовательное выполнение следующих действий:

1. Фиксация времени, в течение которого часть, в которую входит отказавший элемент, находилась в предыдущем состоянии.
2. Установка части НСЛА в состояние отказа.
3. Удаление всех событий отказа данной части из СБС.
4. Поиск дублирующей части или выключенной резервной части. Включение выключенной работоспособной резервной части, если это возможно.

5. Изменение параметров ВБР элементов, отказы которых зависят от состояния отказавшего, моделирование реализации их ВБР и корректировка СБС.
6. Включение индикаторов отказа данной части, если таковые имеются.
7. Если не работают дублирующие части НС ЛА и отказ данной части должен приводить к отказу части более высокого уровня, то выполнить процедуру отказа новой части (Рекурсивное выполнение этого пункта по всей ветви НСЛА вверх).
8. Сохранить статистику по отказам данной части.

## Выполнение действия над частью НСЛА

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий:

1. Определение типа действия:
  - а. Для действия «Включение» происходит запуск процедуры включения части. Данная процедура переводит часть во включенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние.
  - б. Для действия «Выключение» происходит запуск процедуры выключения части. Данная процедура переводит часть в выключенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние. А после нее происходит выключение всего подграфа данного элемента, то есть всех компонентов данного блока.
  - с. Для действия «Демонтаж» происходит перевод части в состояние отсутствия в составе НСЛА.
  - д. Для действия «Монтаж» реализуется процедура, которая определяет часть в составе НСЛА. Обнуляет параметры наработки для данной части и переводит часть в выключенное состояние.
  - е. Для действия «Настройка» осуществляется перевод части в состояние работоспособности и восстановление всех частей, которые отказали из-за отказа данной части.
2. Вызов процедуры поиска «скрытых» отказов.
3. Расчет времени выполнения следующего действия из рассматриваемой последовательности действий.
4. Планирование события ( $K=2$ ).

## Событие «Смена режима функционирования»

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий:

- накапливается статистика по наработке включенных частей НСЛА с учетом завершившегося режима;
- корректируются законы распределения ВБР износных отказов элементов, производится корректировка СБС по этим отказам;
- моделируются реализации ВБР внезапных отказов элементов и корректируются СБС с учетом плановой длительности нового режима.

## Сбор статистики и расчет показателей КОРМ

Сбор статистики включает в себя следующие функции:

- Сбор статистики по временам безотказной работы НС и её частей.
- Фиксация реализаций использования ЗЧ различного вида.
- Фиксация реализации использования ремонтных ресурсов различных видов.

- Вычисление коэффициента готовности НС и её частей.
- Статистическая обработка результатов использования ЗЧ и ремонтных ресурсов и определение статистических характеристик этих процессов.

По результатам моделирования вычисляются необходимые статистические характеристики:

- Коэффициент готовности ЛА определяется отношением времени работоспособности ЛА к времени моделирования.
- Вычисляются статистические характеристики использования ЗЧ и ремонтных ресурсов. Для этого считается, что ко времени обнаружения отказа необходимо иметь ЗЧ, а на срок восстановления необходимо задействовать необходимые ремонтные ресурсы. В результате обработки данной информации определяется реализация процессов необходимых ЗЧ и ремонтных ресурсов по каждому виду ЗЧ и ресурсов для поддержания коэффициента готовности ЛА.

### Общие сведения об имитационной программе

Программная реализация ИМ разработана в среде программирования Borland Delphi 7.0. Результаты работы программы в виде текущего состояния модели и трассировки отображаются в основном окне, и для корректного отображения состояния модели рекомендуется количество частей НС брать не более 150, а уровней не более 10. При подсчете результатов моделирования по множеству прогонов трассировочная и графическая информация не отображается, поэтому ограничений по размерности нет, а выходная информация сохраняется в файлы.

### Результаты имитационных экспериментов

Для тестовой проверки работоспособности данной модели использован пример НС системы кондиционирования и регулирования давления самолета ТУ-154 (рис. 2) [7]. Данная система состоит из источника воздуха в виде трех двигателей и вспомогательной силовой установки (ВСУ), первичного узла охлаждения, двух магистралей, двух вторичных узлов охлаждения, системы вентиляции кабины, системы вентиляции двух салонов, а также различных датчиков и регуляторов на панели бортинженера и щитков для проведения технического обслуживания. В системе используется холодное резервирование крана отбора воздуха, клапанов в трубопроводе, горячее резервирование воздушных магистралей, вторичных узлов охлаждения. Возможны следующие зависящие отказы: подсистемы турбохолодильников при отказе подсистемы масляного охлаждения; вспомогательной силовой установки при отказе ее системы охлаждения.

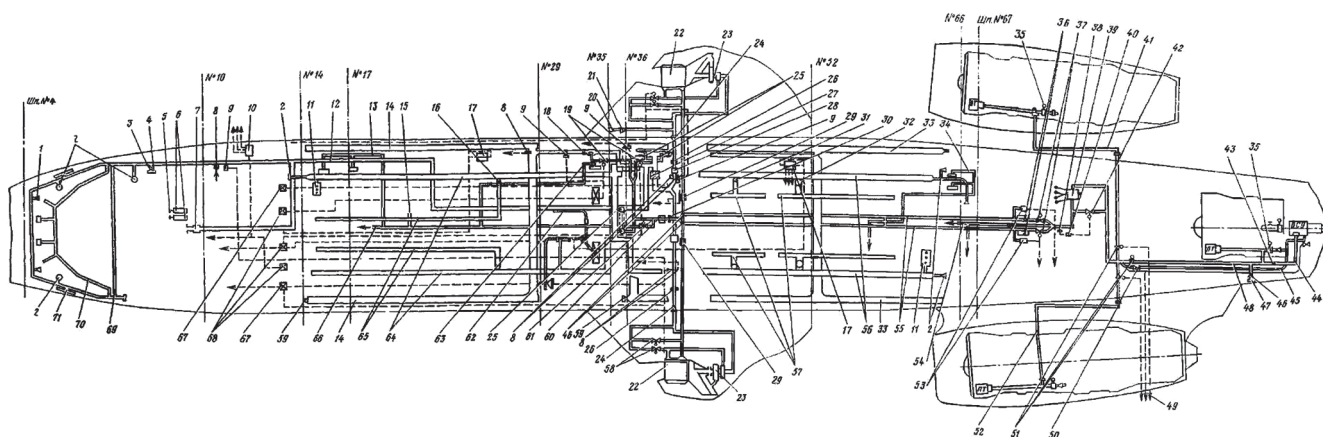


Рис. 2. Структура системы кондиционирования и регулирования давления самолета ТУ-154

Общее число частей НС – 116, число элементов – 87, число уровней НС – 6.

План режимов функционирования НС включает два режима: работа на земле, работа в полете. В режиме «работа на земле» работает только основной воздушный радиатор, а в режиме «Полет» – еще и вторичные радиаторы, что определяет различные нагрузки на элементы НС.

При проведении ТО НС в ИМ имитируется следующая последовательность действий: снятие люков гондол двигателей, осмотр трубопроводов, кранов отбора воздуха и клапанов; снимаются люки левого и правого полукрыла для осмотра воздухозаборников, турбохолодильников с масляной системой и заслонок левого и правого узлов вторичного охлаждения. Также снимаются три люка в багажных отделениях для осмотра остальных частей системы.

На панели бортинженера установлены датчики отказа подсистемы отбора воздуха по каждому из двигателей (включаются в случае отказа клапанов или кранов отбора воздуха), датчик повышения температуры хвостового отсека (включается в случае отказа предварительного узла охлаждения), датчики температуры по каждой магистрали, датчики температуры для каждого вторичного узла охлаждения, датчик перегрева воздуха в салонах и кабине и указатель расхода воздуха, по которому судят о неисправности воздухозаборника. К тому же имеется щит наземной проверки с соответствующими датчиками. Он применяется при ТО НС.

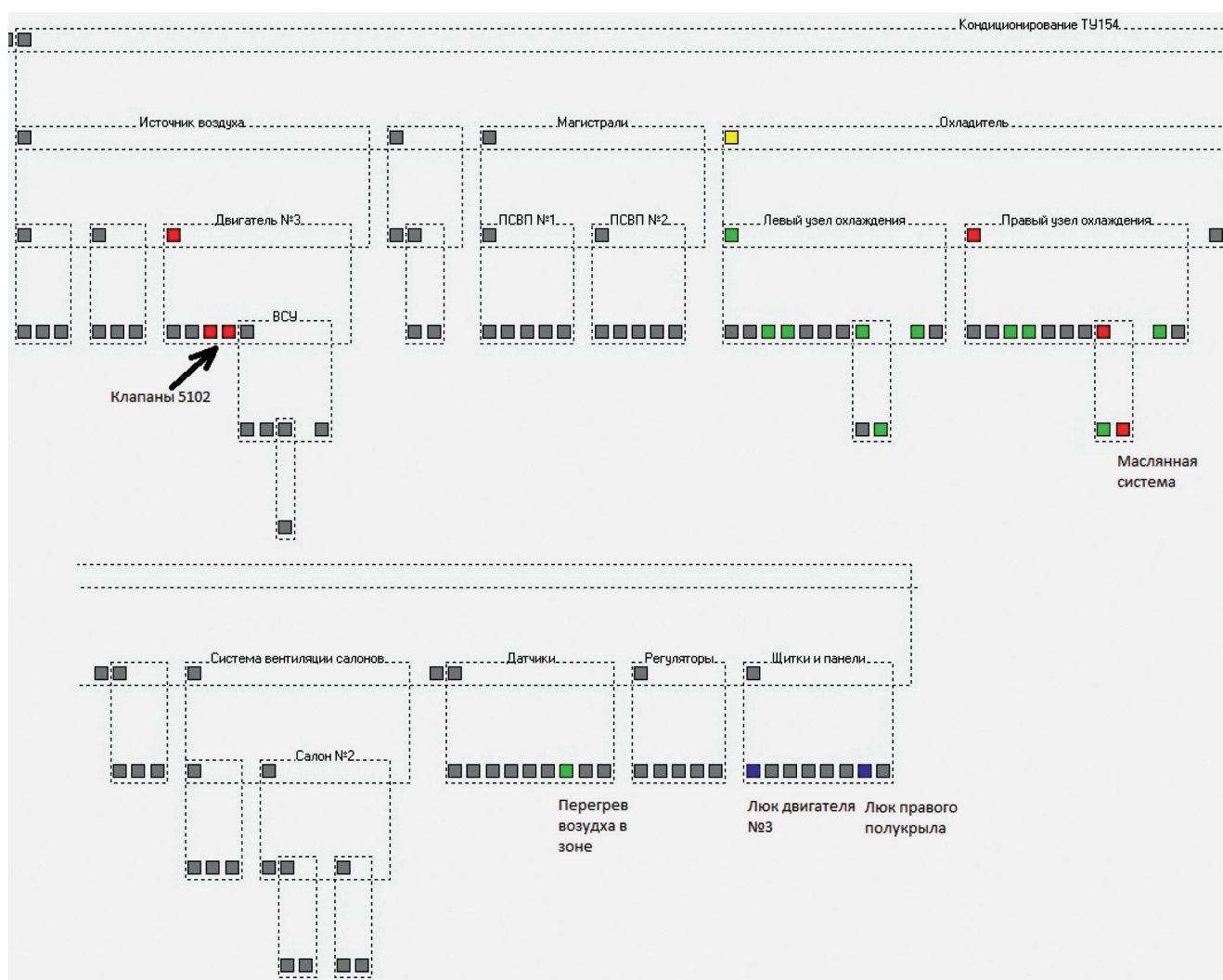


Рис. 3. Графическое отображение функционирования ИМ при отказе клапанов 5102

В ИМ НСЛА возможны «скрытые» отказы. При отказе заслонки вторичного узла охлаждения в работу вступит дублирующая заслонка и перегрева воздуха не произойдет. Аналогично существуют дублирование смесителей и распределителей системы вентиляции кабины и салонов. Данные отказы могут быть обнаружены только в результате проведения ТО с заданной вероятностью.

Для большинства частей НС определено состояние включения. У каждого элемента, в состоянии включен, имеются отказы двух типов: по наработке (нормальный закон распределения) и внезапные отказы (экспоненциальный закон распределения). Для выключенных элементов возможны износные отказы в результате хранения.

Замена элементов производится путем снятия соответствующего щитка, далее последовательно выполняются процедуры демонтажа отказавшего элемента, монтаж нового элемента с последующей настройкой его. Замена некоторых отказавших элементов производится путем замены блока, например, при отказе масляной системы турбохолодильника заменяется данный блок целиком.

Имитационные эксперименты могут проводиться как по множеству независимых прогонов, так и по одному длинному прогону в предположении выхода на стационарный эргодический режим функционирования ИМ.

В отладочном режиме ИМ позволяет осуществить наглядный (в графическом виде) вывод информации об изменении состояния любой группы частей моделируемой НС. В частности, на рис. 3 представлен процесс технического обслуживания, вызванный отказом клапанов 5102 у третьего двигателя.

На рисунке используется следующее цветовое отображение состояний частей НС: серый цвет – выключено, зеленый цвет – включено, неисправность – желтый, отказ – красный, выведен из состава НС – синий.

Такой вывод позволяет провести логический анализ процесса функционирования ИМ и убедиться в его адекватности описания процесса функционирования НС.

Ниже приводятся в графическом виде статистические результаты, полученные по множеству прогонов процесса функционирования НС с заданного начального состояния в виде ряда частот отказа всей НС во времени.

Общая характеристика плана имитационных экспериментов следующая.

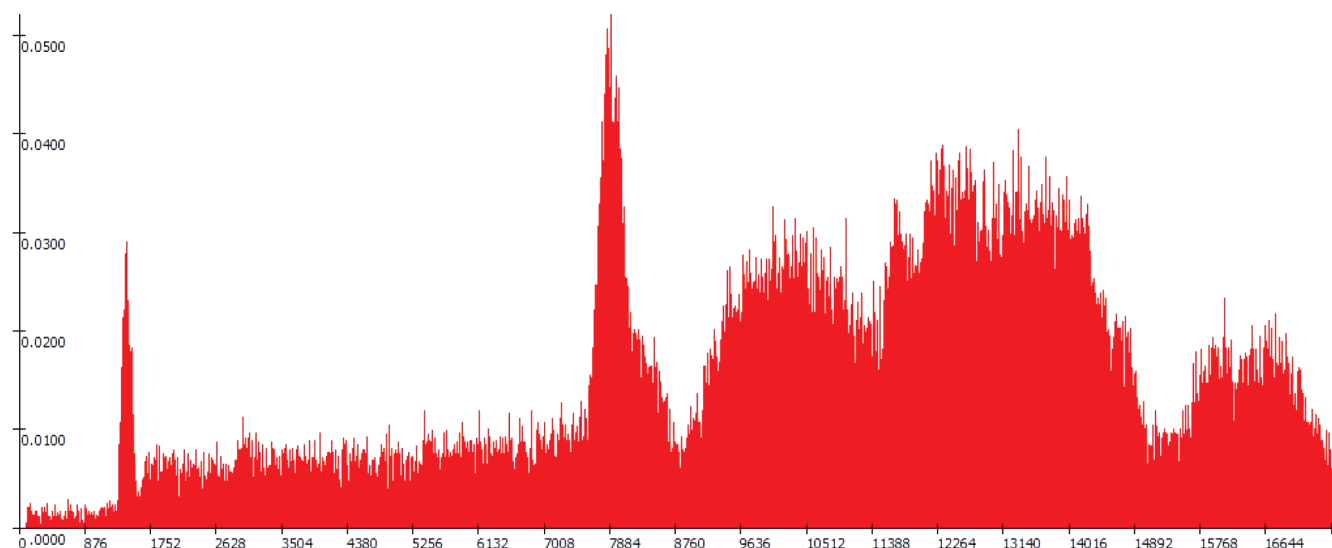


Рис. 4. График частотного ряда отказов всей НС системы кондиционирования во времени

Время прогона – 2 года. В течение этого времени проводится 500 полетов и 10-15 полных ТО. Длительность каждого полета 10 ч. Все элементы в начальном состоянии имеют наработку, не превышающую 10% ресурса. Объем выборки – 5000 прогонов.

Результаты имитационных экспериментов по частотному ряду отказов всей НС системы кондиционирования представлены на рис. 4. Для реализации ИМ данной НСЛА потребовалось 6,5 МБ оперативной памяти. По времени моделирования заняло 8 минут и 46 секунд.

На графике рис. 4 можно отметить два периода пикового отказа НС и два промежутка повышенной интенсивности отказов. Детальный анализ состояния НС на указанных временных интервалах показал, что первый пик вызван отказами масла системы охлаждения (по результатам моделирования за время прогона масло отказывает в среднем 5,44 раза и до 12 раз максимально). Второй пик вызван отказами клапанов 5102, обеспечивающих подачу воздуха от двигателей и ВСУ. Дальнейшие промежутки повышенной интенсивности отказов вызваны отказами систем охлаждения: заслонками, системами турбоохладителя, влагоотделителя и систем вентиляции салона и кабины: смесителей, распределителей и устройств управления.

С учетом результатов проведенного анализа произведены изменения в планах проведения ТО: увеличено до пяти раз плановых замен масла; определены планы замены на новые некоторых агрегатов еще в состоянии их работоспособности, не доводя их до состояния отказа. В результате этих изменений удалось существенно снизить частоту отказов НС системы кондиционирования. Результаты имитационных экспериментов после указанных изменений по аналогичному, описанному выше плану их проведения показаны на рис. 5.

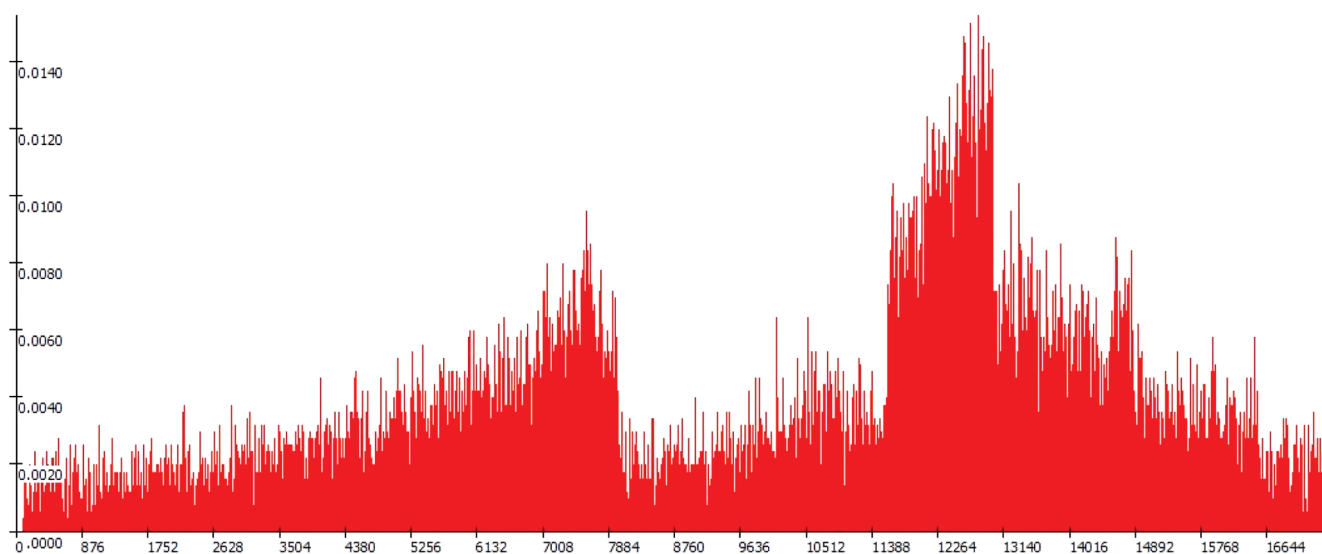


Рис. 5. График частотного ряда отказов всей НС системы кондиционирования во времени после проведенных изменений плана проведения ТО

Сравнение графиков на рис. 4 и 5 показывает, проведенные изменения позволили существенно снизить частоты отказов НС.

С другой стороны, можно сделать очень важный вывод о хорошем качестве разработанной ИМ, ее чувствительности к вариациям параметров, и, следовательно, о возможности ее использования в модели более высокого уровня для анализа процессов послепродажного обслуживания ЛА.

## Литература

1. **Синицын И.Н., Шаламов А.С.** Лекции по теории систем интегрированной логистической поддержки. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012.
2. **Анцелович Л.Л.** Надежность, безопасность и живучесть самолета: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Самолетостроение». – М.: Машиностроение, 1985.
3. **Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.** Вопросы эксплуатационной живучести авиако-  
струкций. – М.: Воздушный транспорт, 2002.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Том 8. – М.: Машинострое-  
ние, 1990.
5. ГОСТ 27 002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
6. **Бирюзова Е.И.** Единый регламент технического обслуживания планеров. – М.: Изд-во ДА-  
СAAF, 1959.
7. **Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н.** – Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание.  
(Книга 2) – 1975.
8. **Хахулин Г.Ф.** Основы конструирования имитационных моделей. М.: Издательство НПК «По-  
ток». 2002 г. 224 с.