

Расчет комплекта ЗИП с использованием комплекса имитационных программ «Диалог»

(Часть 1. Общие положения для расчета комплекта ЗИП)

Борис А. Долгополов^{1*}, Юрий Г. Зайко¹, Виктор А. Михайлов¹, Александр В. Трахтомиров²

¹ ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, НПП «АВТ», Украина, Харьков

* dolgopolov@module.ru



Борис А.
Долгополов



Юрий Г. Зайко



Виктор А.
Михайлов



Александр В.
Трахтомиров

Резюме. Описываются принципы построения комплекса имитационных программ (КИП) «ДИАЛОГ», предназначенного для расчета показателей надежности радиоэлектронных систем (РЭС) произвольной конфигурации, а также для решения вопросов, связанных с обеспечением надежности функционирования РЭС. В КИП «ДИАЛОГ» используется специально разработанная технология «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», позволяющая автоматически синтезировать событийные имитационные модели в виде программ на выбранном языке программирования. Исходными данными для синтеза в КИП «ДИАЛОГ» служат следующие сведения: состав системы в виде комбинации условных блоков; критерии возникновения событий отказов и ремонтов; параметры случайных величин (отказы элементов системы в различных режимах эксплуатации, запросы к ЗИП и т. д.); этапы работы системы и виды ремонтов; перечень рассчитываемых показателей. Для получения необходимых показателей имитационные модели проходят статистические испытания при измененных значениях случайных величин в каждом новом испытании. На основании накопленных результатов по всем прошедшим испытаниям выполняются расчеты необходимых показателей. КИП «ДИАЛОГ» состоит из четырех составных частей: «ДИАЛОГ-НРС» предназначена для расчета показателей надежности неремонтопригодных резервированных систем; «ДИАЛОГ-РРС» предназначена для расчета показателей надежности ремонтпригодных резервированных систем, а также количества и стоимости гарантийных ремонтов; «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» предназначена для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем; «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» предназначена для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами. Расчет комплектов ЗИП производится обычно по типовым методикам, описанным в нормативных документах. При решении прямой задачи расчета оптимального комплекта ЗИП в качестве исходных данных используют требуемое значение одного из двух показателей достаточности (ПД) ЗИП и вид затрат, которые требуется оптимизировать (минимизировать) при достижении заданных значений ПД. При решении обратной задачи расчета оптимального комплекта ЗИП требуется обеспечить заданные затраты на начальные запасы в ЗИП. В качестве ПД запасов в комплекте ЗИП используют среднее время задержки в удовлетворении заявок на запасные части (ЗЧ) комплектом ЗИП $t_{з.зип}$ и коэффициент готовности ЗИП $K_{г.зип}$. Оптимизация комплекта ЗИП с помощью КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» позволяет увеличить возможности пользователя за счет следующих дополнительных характеристик: учет отказов ЗЧ, входящих в состав комплекта ЗИП; оптимизация количества ЗЧ и учет конкретных особенностей при экстренной доставке (ЭД) ЗЧ; возможность использования изделий с любыми видами резервирования; при работе с групповым комплектом ЗИП-Г возможность включения в состав РЭС изделий с разными структурами. Приведена структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» между собой, которая предусматривает три режима работы имитационной модели: расчет ПД для конкретного состава ЗИП; расчет предварительных запасов комплекта ЗИП перед началом процесса оптимизации; расчет оптимального комплекта ЗИП. Рассмотрены вопросы выбора необходимого числа и продолжительности испытаний имитационной модели.

Ключевые слова: имитационное моделирование, комплект ЗИП, показатели достаточности ЗИП, методики для расчета и оценки показателей ЗИП.

Для цитирования: Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А., Трахтомиров А.В. Расчет комплекта ЗИП с использованием комплекса имитационных программ «Диалог» (Часть 1. Общие положения для расчета комплекта ЗИП) // Надежность. 2020. №1. С. 32-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-32-38>

Поступила 06.12.2019 г. / После доработки 17.02.2020 г. / К печати 20.03.2020 г.

Комплекс имитационных программ (КИП) «ДИАЛОГ»

Имитационное моделирование имеет в последнее время широкое распространение для решения задач исследования поведения и определения различных характеристик РЭС [1], [2].

КИП «ДИАЛОГ» предназначен для расчета показателей надежности радиоэлектронных систем (РЭС) любой конфигурации, а также для решения вопросов, связанных с обеспечением надежности функционирования РЭС. Расчеты показателей выполняются с использованием имитационных моделей.

Разработка таких моделей имеет следующую особенность: в модели должны быть достаточно точно представлены детали поведения системы при отказах, ремонтах, управляющих воздействиях и т. д. Это может быть достигнуто путем использования универсальных языков высокого уровня [4] и создания моделей типа «ориентированные на события» [3]. Однако это требует значительных затрат и времени на создание таких моделей.

Для решения этой проблемы в КИП «ДИАЛОГ» используется специально разработанная технология «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», позволяющая на основе описания моделируемой системы автоматически синтезировать событийные имитационные модели в виде исходных текстов программ на выбранном языке программирования.

Создание имитационных моделей с использованием этой технологии основано на следующих свойствах рассматриваемых систем:

- если поведение системы при отказах ее компонентов обуславливается только ее составом, связями между компонентами и критериями появления событий отказа, то структуры событийных моделей и их фрагменты для систем с любыми конфигурациями возможно сделать одинаковыми;
- функциональную схему надежности такой системы можно представить как комбинацию условных блоков, число типов которых ограничено и достаточно для описания систем.

Это позволяет создать основу модели, общую для всех моделей выбранного типа, а исходные данные, которые определяют конфигурацию и специфику поведения конкретной системы, могут быть представлены в виде изменений или добавлений в основу модели.

В качестве инструментов, используемых в технологии «ДИАЛОГ-СИНТЕЗ», выступают:

- шаблон, который представляет собой набор фрагментов модели на выбранном языке программирования;
- программы подготовки исходных данных, сохраняемых в виде текстовых файлов;
- программа для синтеза имитационной модели, которая преобразует текстовые файлы, описывающие систему, во фрагменты модели и объединяет их с шаблоном. Результатом является имитационная модель событийного типа на исходном языке программирования. В комплексе «ДИАЛОГ» для этого используется язык

Фортран и библиотека специальных подпрограмм.

Событийный тип синтезируемых моделей в сочетании с использованием универсального языка программирования позволяет с любой точностью воспроизвести поведение системы, а автоматический синтез, полностью исключая этап программирования, во много раз ускоряет и упрощает создание моделей. Время создания моделей, в основном, определяется временем подготовки исходных данных.

Исходными данными для синтеза в КИП «ДИАЛОГ» служат следующие сведения:

- состав системы в виде комбинации условных блоков;
- критерии возникновения событий отказов и ремонтов;
- параметры случайных величин: отказы элементов системы в различных режимах, запросы к ЗИП и т. д.;
- этапы работы системы и виды ремонтов;
- перечень рассчитываемых показателей.

Для получения необходимых показателей имитационные модели проходят статистические испытания при измененных значениях случайных величин в каждом новом испытании. На основании накопленных результатов за все число испытаний выполняются расчеты необходимых показателей.

КИП «ДИАЛОГ» состоит из четырех составных частей:

- Часть 1 «ДИАЛОГ-НРС» предназначена для расчета показателей надежности неремонтопригодных резервированных систем;
- Часть 2 «ДИАЛОГ-РРС» предназначена для расчета показателей надежности ремонтпригодных резервированных систем, а также количества и стоимости гарантийных ремонтов;
- Часть 3 «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» предназначена для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем;
- Часть 4 «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» предназначена для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами.

КИП «ДИАЛОГ-НРС» позволяет определять следующие показатели надежности:

- а) вероятность безотказной работы (ВБР) за заданное время $t - R(t)$;
- б) средняя наработка до отказа – T_0 ;
- в) гамма-процентная наработка до отказа с заданной вероятностью $\gamma - T_\gamma$;
- г) интенсивность отказов РЭС в конце заданного интервала времени $t - \lambda(t)$;
- д) частота отказов в конце заданного интервала времени $t - a(t)$;
- е) данные для построения графика зависимости ВБР от времени;
- ж) данные для построения графика зависимости интенсивности отказов от времени;
- з) данные для построения графика зависимости частоты отказов от времени.

Определения перечисленных показателей надежности приведены в монографии [5].

Структура и результаты работы КИП «ДИАЛОГ-НРС» описаны в статье [2].

КИП «ДИАЛОГ-РРС» позволяет определять следующие показатели надежности ремонтпригодных РЭС и решать вопросы, связанные с надежностью функционирования РЭС:

- а) средняя наработка между отказами – $T_{\text{ср}}$;
- б) средняя частота отказов в конце заданного интервала времени $t - w(t)$;
- в) суммарная частота отказов в конце заданного интервала времени $t - w_c(t)$;
- г) данные для построения графика зависимости средней частоты отказов от времени;
- д) данные для построения графика зависимости суммарной частоты отказов от времени;
- е) количество гарантийных ремонтов на заданных этапах работы РЭС за заданное время t ;
- ж) стоимость гарантийных ремонтов за заданное время t , включающее один или несколько этапов работы РЭС.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» предназначен для расчета оптимального комплекта ЗИП и его характеристик, к которым в первую очередь относятся два показателя достаточности (ПД):

- коэффициент готовности ЗИП $K_{\text{г.зип}}$;
- среднее время задержки в удовлетворении заявок на запасные части (ЗЧ) комплектом ЗИП $\Delta t_{\text{зип}}$.

При решении прямой задачи оптимизации комплекта ЗИП в качестве исходных данных используют требуемое значение ПД ($K_{\text{г.зип}}^{\text{тр}}$ или $\Delta t_{\text{зип}}^{\text{тр}}$) и вид затрат, которые требуется оптимизировать (минимизировать) при достижении заданных ПД.

При решении обратной задачи в качестве исходных данных используют величину ограничений по затратам $C_{\text{зип}}^{\text{огр}}$ и заданный ПД ($K_{\text{г.зип}}^{\text{тр}}$ или $\Delta t_{\text{зип}}^{\text{тр}}$), который требуется оптимизировать при заданных ограничениях по суммарным затратам.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» позволяет рассчитать оптимальный комплект ЗИП и его характеристики для простых нерезервированных изделий. Для этого в КИП создается модель структуры ЗИП, а исходными данными для работы модели являются характеристики составных частей (СЧ), из которых состоит изделие.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» позволяет рассчитать оптимальный комплект ЗИП и его характеристики для любых резервированных изделий. Для этого в КИП используются две модели: модель ремонтпригодной системы, созданной с помощью программ, входящих в состав КИП «ДИАЛОГ-РРС», и модель ЗИП, созданная в КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС». Созданные в результате синтеза обе имитационные модели имеют тип «ориентированные на события» одинаковые элементы структуры и единый язык программирования – Фортран, что позволяет организовать их совместную работу со значительным сокращением времени выполнения программ в сравнении с другими языками.

Поток отказов изделия к ЗИП генерируется моделью системы, его вид может быть любым и определяется структурой резервированного изделия и видами ремон-

тов на различных этапах эксплуатации изделия. Поток отказов также может меняться во времени по мере деградации резервированного изделия.

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» может использоваться и для расчета комплектов ЗИП, работающих с нерезервированными системами. Однако если изделие представляет собой нерезервированную систему и обращение к ЗИП происходит сразу после отказа изделия, то в связи со значительно меньшей трудоемкостью подготовки исходных данных для расчета комплекта ЗИП используется КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС». В этом случае для генерации модели требуется только подготовка описания структуры ЗИП, а отказы изделия генерируются специальной программой, входящей в состав КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС».

КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» и КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» используются для расчета комплектов ЗИП с любыми структурами:

- одиночных комплектов ЗИП (ЗИП-О);
- групповых комплектов ЗИП (ЗИП-Г);
- двухуровневых систем ЗИП (СЗИП).

Общие положения для расчета комплекта ЗИП

Расчет комплектов ЗИП производится обычно по типовым методикам, описанным в нормативных документах [6–8].

В общем случае рассмотрим изделие, состоящее из N_0 типов СЧ (каждый i -ый тип СЧ может иметь k_i экземпляров) и работающее циклически, когда каждый повторяющийся цикл длительностью $T_{\text{ц}}$ состоит из M этапов, причем каждый j -ый этап ($j = 1, \dots, M$) имеет длительность T_j и интенсивность отказов СЧ i -го типа λ_{ij} .

Цикл эксплуатации изделия включает в себя этапы работы в различных условиях, этапы выключенного состояния, этапы технического обслуживания и т. д.

Тогда интенсивность замен СЧ i -го типа рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{\text{зи(СЧ)}} = k_i \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^M T_j \cdot \lambda_{ij} \right) / T_{\text{ц}} \right], \quad (1)$$

где $\sum_{j=1}^M T_j = T_{\text{ц}}$.

Исходные данные по составу СЧ изделия заносятся в колонки 1-2 табл. 1, а исходные данные, входящие в формулу (1), заносятся в колонки 3–6 табл. 1 (в колонках 4-6 вместо конкретных чисел проставлены символы «+»). Рассчитанное по формуле (1) значение $\Lambda_{\text{зи(СЧ)}}$ для каждого i -го типа СЧ заносится в колонку 7 табл. 1.

Обычно используются четыре основных типа стратегий пополнения запасов в комплектах ЗИП:

- периодическое пополнение (условный индекс $\alpha_i = 1$);
- периодическое пополнение с экстренными доставками (ЭД) ($\alpha_i = 2$);
- непрерывное пополнение ($\alpha_i = 3$);

Таблица 1. Расчет интенсивности замен $\Lambda_{zi(CЧ)}$ для СЧ изделия

Номер СЧ, i	Наименование СЧ	Номер этапа, j	Длительность этапа, T_j , ч	k_j , штук	$\lambda_{ij} \times 10^6$, 1/ч	$\Lambda_{zi(CЧ)} \times 10^6$, 1/ч
1	2	3	4	5	6	7
1		1	+	+	+	+
		...	...	...	...	...
		M	+	+	+	+
...	...	...	...	...	...	...
N_o		1	+	+	+	+
		...	...	...	...	...
		M	+	+	+	+

– пополнение по уровню неснижаемого запаса ($\alpha_i = 4$).

Кроме типа (индекс α_i) каждая стратегия пополнения характеризуется одним (T_i) или двумя (T_i и β_i) числовыми параметрами, имеющими значения:

- при $\alpha_i = 1$ $T_i = T_{ni}$ – период планового пополнения i -запаса, $\beta_i = 0$ – параметр не используется;
- при $\alpha_i = 2$ $T_i = T_{ni}$ – период планового пополнения i -запаса, $\beta_i = T_{zi}$ – время ЭД ЗЧ i -типа;
- при $\alpha_i = 3$ $T_i = T_{di}$ (T_{pi}) – время доставки (ремонта) ЗЧ i -типа, $\beta_i = 0$ – параметр не используется;
- при $\alpha_i = 4$ $T_i = T_{di}$ – время доставки ЗЧ i -типа, $\beta_i = m_i$ – уровень неснижаемого запаса i -типа.

Каждый отдельный запас в комплекте ЗИП может пополняться в общем случае по своей отдельной стратегии, отличающейся от других как типом (α_i), так и значениями числовых параметров (T_i и β_i).

При периодическом пополнении с ЭД должны быть дополнительно заданы следующие данные по ЭД:

- уровень пополнения запасов;
- номенклатура пополнения по запасам;
- время обращения за ЭД: при отказе запаса или при использовании последней ЗЧ (предотказ).

ПД комплекта ЗИП $K_{г.ЗИП}^{(тр)}$ или $\Delta t_{ЗИП}^{тр}$ определяются через соответствующие ПД каждого i -го запаса Δt_{zi} и K_{ri} ($i = 1 \dots N_o$) по следующим формулам [8]:

$$\Delta t_{3,ЗИП} = \frac{\sum_{i=1}^{N_o} \Lambda_{zi(CЧ)} \cdot \Delta t_{zi}}{\sum_{i=1}^{N_o} \Lambda_{zi(CЧ)}}; \quad (2)$$

$$K_{г.ЗИП} = \prod_{i=1}^{N_o} K_{ri}. \quad (3)$$

Теоретические формулы для расчета ПД Δt_{zi} и K_{ri} , полученные на основе математических моделей, предложенных в [9], приведены в табл. 2.

В таблице использованы следующие обозначения:

A_i – среднее число поступающих в комплект ЗИП заявок на ЗЧ i -го типа за время T_i

$$A_i = k_i \cdot \Lambda_{zi(CЧ)} \cdot T_i; \quad (4)$$

L_i – начальный уровень запаса i -го типа в ЗИП;

m_i – уровень неснижаемого запаса i -го типа при пополнении по уровню m_i .

В ГОСТ 27.507-2015 [8, приложение А] приведены результаты оптимизации комплекта ЗИП-О по требуемому ПД $K_{г.ЗИП-О}^{(тр)} \geq 0,95$ для РЭС типа «Памир-1», состоящей из $N_o = 30$ СЧ. Оптимизация проведена по типовой методике с помощью пакетов программ «РОКЗЭРСИЗ» и «АСОНИКА-К-ЗИП».

Оптимизация комплекта ЗИП с помощью КИП «ДИАЛОГ-ЗИП» позволяет увеличить возможности пользователя по сравнению с указанными пакетами программ за счет следующих дополнительных характеристик:

- учет отказов ЗЧ, входящих в состав комплекта ЗИП;
- оптимизация количества ЗЧ и учет конкретных особенностей при ЭД в случае использования стратегии пополнения с $\alpha_i = 2$;
- возможность использования СЧ с любыми видами резервирования (например, любой способ резервирования из [2]);

Таблица 2. Формулы расчета ПД для запасов i -го типа в комплекте ЗИП-О

Стратегия пополнения	Показатели достаточности
Периодическое пополнение ($\alpha_i = 1$) $T_i = T_{ni}$	$\Delta t_{zi} = T_{ni} \left[\exp(-A_i) \cdot \sum_{\gamma=L_i+2}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-2}}{\gamma!} (\gamma - L_i - 1) \right]$, $K_{ri} = 1 - \exp(-A_i) \cdot \sum_{\gamma=L_i+2}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-1}}{\gamma!} (\gamma - L_i - 1)$
Периодическое пополнение с ЭД ($\alpha_i = 2$) $T_i = T_{ni}$	$\Delta t_{zi} = T_{ЭД} \left[\exp(-A_i) \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\gamma=v-(L_i+1)}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma-1}}{\gamma!} \right]$, $K_{ri} = 1 - \frac{T_{ЭД}}{T_{ni}} \left[\exp(A_i) \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \sum_{\gamma=v-(L_i+1)}^{\infty} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]$
Непрерывное пополнение ($\alpha_i = 3$) $T_i = T_{di}$	$\Delta t_{zi} = T_{di} \cdot A_i^{L_i} \left[(L_i + 1)! \sum_{\gamma=0}^{L_i+1} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]^{-1}$, $K_{ri} = 1 - A_i^{L_i+1} \left[(L_i + 1)! \sum_{\gamma=0}^{L_i+1} \frac{A_i^{\gamma}}{\gamma!} \right]^{-1}$
Пополнение по уровню m_i ($\alpha_i = 4$) $T_i = T_{di}$	$\Delta t_{zi} = T_{di} \cdot A_i^{m_i+1} \left[A_i^{m_i+1} + (L_i - m_i)(1 + A_i)^{m_i+1} \right]^{-1}$, $K_{ri} = 1 - A_i^{m_i+2} \left[A_i^{m_i+2} + (L_i - m_i)(1 + A_i)^{m_i+1} \right]^{-1}$

Таблица 3. Перечень методик при расчете и оценке показателей ЗИП

№	Наименование методики	Обозначение и назначение методики для разных видов ЗИП		
		а) ЗИП-О	б) ЗИП-Г	в) СЗИП
1	Оценка запасов по критерию $K_{г.ЗИП}$	1а. Оценка величины $K_{г.ЗИП-О}$	—	1в. Оценка величины $K_{г.СЗИП}$
2	Оценка запасов по критерию $\Delta t_{г.ЗИП}$	2а. Оценка величины $\Delta t_{г.ЗИП-О}$	2б. Оценка величины $\Delta t_{г.ЗИП-Г}$	2в. Оценка величины $\Delta t_{г.СЗИП}$
3	Оценка запасов по критерию затрат на ЗИП	3а. Оценка величины $C_{ЗИП-О}$	3б. Оценка величины $C_{ЗИП-Г}$	3в. Оценка величины $C_{СЗИП}$
4	Расчет оптимальных запасов по критерию $K_{г.ЗИП}$	4а. Минимизация затрат на ЗИП-О при выполнении требований к $K_{г.ЗИП-О}$	—	4в. Минимизация затрат на СЗИП при выполнении требований к $K_{г.СЗИП}$
5	Расчет оптимальных запасов по критерию $\Delta t_{г.ЗИП}$	5а. Минимизация затрат на ЗИП-О при выполнении требований к $\Delta t_{г.ЗИП-О}$	5б. Минимизация затрат на ЗИП-Г при выполнении требований к $\Delta t_{г.ЗИП-Г}$	5в. Минимизация затрат на СЗИП при выполнении требований к $\Delta t_{г.СЗИП}$
6	Расчет оптимальных запасов по критерию заданных затрат $C_{ЗИП}$	6а. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в ЗИП-О	6б. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в ЗИП-Г	6в. Оптимизация ПД при заданных затратах на начальные запасы в СЗИП

– возможность включения в состав РЭС изделий с разными структурами при работе с групповым комплектом ЗИП-Г.

Перечень основных методик, используемых при оценке показателей и расчете основных видов ЗИП, приведен в табл. 3.

Структура КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС»

В состав КИП «ДИАЛОГ» входят следующие части, предназначенные для расчета комплектов ЗИП:

- часть 3 «ДИАЛОГ-ЗИП-НС» для расчета комплектов ЗИП для простых нерезервированных систем;
- часть 4 «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» для расчета комплектов ЗИП, работающих с любыми резервированными системами.

В настоящей статье описана более подробно методика расчета комплекта ЗИП-О с помощью КИП «ДИАЛОГ».

Методика расчета основана на замене натурных испытаний системы «изделие-комплект ЗИП» их имитацией с помощью событийных моделей. Модели подвергаются статистическим испытаниям, для каждого испытания подсчитывается число успешных и неуспешных запросов к комплекту ЗИП, величины задержек доставки ЗЧ и другие показатели. Далее выполняются следующие действия:

- суммируются все запросы к каждому запасу за заданное число испытаний;
- суммируются все успешные запросы к запасу за заданное число испытаний;
- суммируются задержки доставки ЗЧ;
- определяются средние числа обращений к запасу, успешных обращений, задержек доставки и др.;
- на основе этих результатов вычисляются необходимые показатели.

При использовании «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» создается модель, имитирующая работу изделия, работу ЗИП и их взаимодействие.

Такая модель может использоваться как для нерезервированных изделий, так и резервированных с любыми видами резервирования, при использовании любых видов ремонтов на разных этапах эксплуатации системы.

КИП позволяет спроектировать оптимальный состав ЗИП, а также получить следующие показатели для ЗИП с любой структурой для резервированных и нерезервированных изделий при использовании любых видов ремонтов:

- коэффициент готовности и другие показатели с учетом собственных отказов ЗЧ, входящих в ЗИП;
- оптимальный состав ЗИП по критерию минимума затрат при заданных ПД;
- оптимальный состав ЗИП при ограничении по заданным затратам.

В случае использования запросов к ЗИП, полученных путем генерации простейшего потока отказов, эти показатели могут быть получены только для нерезервированного изделия и при использовании срочного полного ремонта.

Структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» показана на рис. 1.

По функциональному признаку программы КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» разбиты на 3 раздела.

Раздел А. Исходные данные.

Программа 3.1 «Имитация запросов изделия к ЗИП».

Эта программа предназначена для генерации запросов от изделия к комплекту ЗИП в случае использования нерезервированных изделий. В случае резервированных изделий используется информация от КИП «ДИАЛОГ-РРС».

В результате работы программы создаются случайные последовательности запросов к каждому запасу для промежутка времени, равного запланированному времени

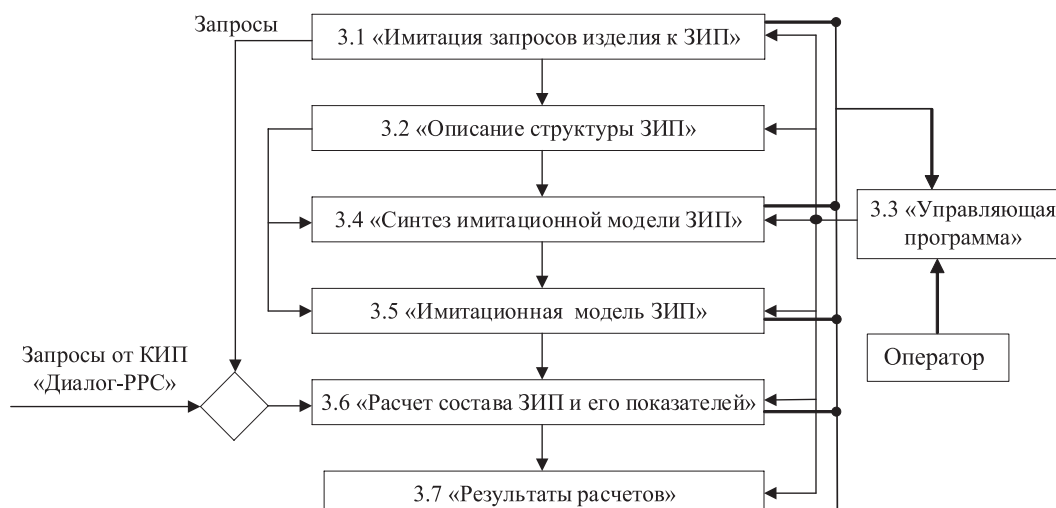


Рисунок 1. Структурная схема взаимодействия программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС»

моделирования. Время между запросами к запасу – это дискретная случайная величина с экспоненциальным законом распределения и средним значением, равным среднему времени между отказами СЧ.

Для генерации времени запросов применяется подпрограмма, использующая логарифмический способ получения случайных дискретных последовательностей с экспоненциальным законом распределения [10].

Пример программы, использующей этот способ, показан в [3].

Программа 3.2 «Описание структуры ЗИП».

Программа служит для описания комплекта ЗИП с любой структурой.

Полученные данные используются при автоматическом синтезе имитационной модели ЗИП.

Программа также служит для формирования исходных данных для расчета показателей достаточности и выполнения оптимизации комплекта ЗИП. Данные представляются в виде таблицы и сохраняются как текстовый файл.

В дальнейшем эти данные используются в программе 3.4 «Синтез имитационной модели ЗИП» и в программе 3.5 «Имитационная модель ЗИП» при проведении расчетов и оптимизации.

Раздел Б. Расчет показателей и оптимизация.

Программа 3.3 «Управляющая программа».

Эта программа служит для запуска КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС» и управления выполнением программ. Управляющая программа получает информацию о результатах работы программ, выполняет запуск очередной программы, устанавливает режимы работы имитационной модели, режимы вывода и сохранения информации в программе 3.7 «Результаты расчетов».

Выполнение программ комплекса может выполняться в автоматическом режиме либо с участием оператора: по его команде работа комплекса может быть приостановлена и возобновлена через промежуток времени, режимы работы программ при запуске могут быть изменены, отдельные программы могут выполняться повторно.

Программа 3.4 «Синтез имитационной модели
ЗИП».

На основе данных, полученных от программы 3.2 «Описание структуры ЗИП» и служебных файлов, синтезируется имитационная событийная модель ЗИП на языке Фортран с параметрами, указанными в описании структуры ЗИП. После трансляции формируется исполняемый файл модели.

Программа 3.5 «Имитационная модель ЗИП».

Синтезированная модель относится к типу «Ориентированная на события» и формируется в виде исходного текста и исполняемого файла. Модель может иметь самостоятельное применение вне КИП «ДИАЛОГ-ЗИП».

Принцип работы модели основан на имитации следования в течение времени моделирования следующих видов событий, происходящих в ЗИП:

- запросов от изделия на замену отказавших СЧ;
- пополнения ЗИП;
- запросов на доставку ЗЧ;
- отказов ЗЧ, находящихся в ЗИП.

При появлении события выполняются действия, которые относятся к типу события: изменяются составы запасов и, при наступлении соответствующих условий, планируются времена поступления пополнений ЗИП.

Для выполнения действий, связанных с событием, используются специальные подпрограммы, где в качестве параметра указан запас, для которого предназначены действия.

Предусмотрено 3 режима работы имитационной модели, которые устанавливаются управляющей программой:

1. Расчет показателей. В этом режиме рассчитываются ПД для существующего состава ЗИП.
2. Расчет нулевого запаса. Рассчитываются начальные уровни запасов перед оптимизацией.
3. Расчет оптимального состава ЗИП.

После установки режима выполняются испытания имитационной модели.

При этом используются параметры, полученные от программы 3.2 «Описание структуры ЗИП», а входными данными при испытаниях являются запросы, полученные от программы 3.1 «Имитация запросов изделия к ЗИП».

Программа 3.6 «Расчет состава ЗИП и его показателей».

В результате обработки результатов испытаний этой программой рассчитываются ПД или, если задан режим оптимизации, кроме показателей обрабатываются и выводятся данные об оптимальном составе ЗИП.

Раздел В Результаты расчетов.

Программа 3.7 «Результаты расчетов».

Программа служит для сохранения результатов расчетов для каждого этапа и всего времени работы системы, а также потоков запросов и описаний структур ЗИП.

Для функционирования имитационной модели должны быть определены следующие характеристики:

- продолжительность одного испытания (время моделирования);
- число испытаний имитационной модели.

Продолжительность одного испытания в единицах модельного времени равна длительности выбранного промежутка времени работы системы «изделие – комплект ЗИП», для которого рассчитываются показатели ЗИП. Длительность этого промежутка равна времени моделирования, которое задается в описании структуры ЗИП и может быть изменено при запуске модели.

Рекомендованное минимальное число испытаний модели $n_{\text{исп}}^{(\min)}$ вычисляется при формировании описания комплекта ЗИП. Расчет выполняется исходя из условия, что для получения приемлемой точности вычислений для СЧ с минимальной интенсивностью отказов число произошедших отказов за все время испытаний должно быть не менее 1000.

Библиографический список

1. Дыкина Т.К. Принципы построения диалоговой имитационной системы моделирования для исследования надежности ВК [Текст] / Т.К. Дыкина, Ю.Г. Зайко, В.Н. Иванов и др. // Проблемы управления движением и навигации. – 1989. – № 24. – С. 29-36.
2. Зайко, Ю.Г. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем [Текст] / Ю.Г. Зайко, Л.Н. Искандарова, А.В. Трахтомиров // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 8-17.
3. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки моделирования и базы данных [Текст] / Под ред. М. Брейера. – М.: Мир, 1979. – 463 с.
4. Schmidt, Bernd. GPSS-Fortran. Version II. Einführung in die Simulation diskreter Systeme mit Hilfe eines FORTRAN-Programmpaketes [Text] / B. Schmidt. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1978. – 535 p.
5. Половко, А.М. Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964. – 446 с.
6. РД В 319.01.19-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП. – Введ. 1999-06-15. – М.: Изд. Технический комитет по военной стандартизации № 319, 1998.
7. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП. – Введ. 2006-01-01. – М., Стандартинформ, 2005. – IV, 38 с.
8. ГОСТ 27.507-2015. Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – М., Стандартинформ, 2016. – III, 48 с.
9. Головин, И.Н. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем [Текст] / И.Н. Головин, Б.В. Чуварыгин, А.Э. Шура-Бура. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
10. Кнут, Д.Э. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2. Получисленные методы [Текст] / Д.Э. Кнут. – М.: Мир, 1977. – 728 с.

Сведения об авторах

Борис А. Долгополов – ведущий инженер ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: dolgoplov@module.ru

Юрий Г. Зайко – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник отдела ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: y.zayko@module.ru

Виктор А. Михайлов – доктор технических наук, заместитель Генерального директора по бортовым разработкам ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: vmikh@module.ru

Александр В. Трахтомиров – директор НПП «АВТ», Украина, Харьков, e-mail: vehxbr39@ukr.net

Вклад авторов в статью

Долгополов Б.А. Анализ различных вопросов построения оптимальной системы изделие – комплект ЗИП, оформление результатов исследований.

Зайко Ю.Г. Общее описание КИП «ДИАЛОГ». Анализ и определение требований к построению оптимальной системы ЗИП, вывод основных формул, описание различных вариантов построения ЗИП и рекомендации по их использованию.

Михайлов В.А. Общее руководство постановкой задачи построения оптимальной системы обслуживания РЭС комплектом ЗИП и выбора требований к построению оптимальной системы ЗИП.

Трахтомиров А.В. Разработка программных средств для проведения имитационного моделирования, его реализация и обработка результатов, позволяющих получить оценку работы системы изделие – комплект ЗИП. Описание функционирования программ КИП «ДИАЛОГ-ЗИП-РС».