



ческие узлы и блоки, вычислительные устройства, группы элементов с резервированием и др.) значительно отличаются от экспоненциального закона распределения. Объединение разнородных потоков отказов различных групп элементов существенно искажает характеристики реального потока заявок на запчасти в целом. Кроме того, применение существующего метода затруднено для СТС, имеющих в своем составе резервируемые устройства.

В этом случае целесообразно использовать метод имитационного моделирования процессов функционирования системы вида «СТС– $S_{ЗИП}$ ». При имитационном моделировании имеется возможность воссоздать логическую структуру исследуемой системы, последовательность протекания во времени процессов ее функционирования, характер и состав информации о состояниях системы [1]. При этом имитационное моделирование позволяет получить значительно больший объем статистических данных, пусть и отличающийся от реальных данных эксплуатации, но достаточный для статистической обработки. Это особенно актуально для оценки необходимости содержания в комплектах ЗИП высоконадежных или высокоответственных и ресурсоемких элементов СТС.

Достаточное количество публикаций [2, 3] посвящено разработкам имитационных моделей системы ЗИП, в том числе для сложных, территориально распределенных систем (например [4–6]). Предлагаемый к рассмотрению подход является дальнейшим развитием и конкретизацией указанных исследований относительно создания многоуровневой модели системы обеспечения ЗИП для СТС.

Рассмотрим начальные условия. Пусть СТС представляет собой совокупность разнотипных образцов техники, каждому из которых положен комплект ЗИП-О (одиночный). Эти образцы распределены территориально и взаимодействуют между собой для решения общей задачи. На всю совокупность образцов СТС имеется комплект ЗИП-Г (групповой), на котором замыкаются комплекты ЗИП-О. Пополнение комплектов ЗИП-О возможно как из комплекта ЗИП-Г, так и из неисчерпаемого источника. Пополнение комплекта ЗИП-Г возможно только из неисчерпаемого источника.

Модель вида «СТС– $S_{ЗИП}$ » представляет собой комбинацию моделей образцов из состава СТС и моделей комплектов ЗИП-О, ЗИП-Г и неисчерпаемого источника.

При этом модель образца техники реализуется в виде совокупности генераторов случайного момента времени возникновения отказа, которые имитируют работу его устройств и элементов. Функции распределения времени возникновения отказа  $F(t)$  каждого элемента, их вид и параметры формируются в соответствии с данными реальной эксплуатации. В этом случае генераторы отказов

относительно  $S_{ЗИП}$  представляют собой источники заявок на запчасти.

Модели каждого комплекта ЗИП и неисчерпаемого источника можно представить в виде совокупности следующих устройств:

- счетчика заявок с функцией регистрации возникших отказов по элементам конкретной номенклатуры и поданных при этом заявок;
- блока обработки заявки с функцией имитации административных временных затрат на обработку заявки и формирования времени задержки в обработке заявки;
- сервера (накопителя) запчастей с функцией выдачи запчастей для восстановления работоспособности технического образца и приема запчастей из вышестоящего комплекта ЗИП;
- генератора времени доставки запчастей, запускающегося при условии наличия запчастей на сервере;
- блока управления доставкой, представляющего собой коммутлирующее устройство для перенаправления исполненной заявки либо в нижестоящий комплект ЗИП, либо в регистратор;
- блока регистрации пополнения запчастей, позволяющего фиксировать моменты пополнения комплекта ЗИП и переводящего сервер запчастей в режим накопления;
- генератора вторичных заявок в вышестоящий комплект, запускающегося при условии отсутствия запчастей на сервере и поступлении заявки на счетчик заявок.

Возможность подобного построения модели комплекта ЗИП представлена в [7] и реализуется в среде моделирования Simulink математического пакета MATLAB [8].

Кроме этого, общим элементом модели  $S_{ЗИП}$  является регистратор, который фиксирует время от момента поступления заявки на запчасти до момента поступления сигнала от генератора времени доставки запчастей, сигнализирующего об окончании времени удовлетворения заявки.

В этой связи представим структуру имитационной модели  $S_{ЗИП}$  в виде схемы, изображенной на рисунке 1.

Исходные данные для работы модели:  $J_i$  – количество образцов техники  $i$ -го типа в составе СТС,  $i \in \overline{1, I}$ ;  $N_{\phi_i}$  – количество элементов  $\phi$ -й номенклатуры, используемых в образце техники  $i$ -го типа,  $\phi \in \overline{1, \Phi}$ ;  $F_{\phi}(t)$  – вид закона распределения времени возникновения отказов элементов  $\phi$ -й номенклатуры и его параметры, позволяющие оценить среднюю наработку до отказа (на отказ);  $T_{\phi}^{\text{пред}}$  – значение предельно допустимого времени восстановления отказов элементов  $\phi$ -й номенклатуры.

Выходные показатели работы модели:  $T_{\text{дост}}$  – значение среднего времени задержки в исполнении заявки, связанное с доставкой запчастей (среднее

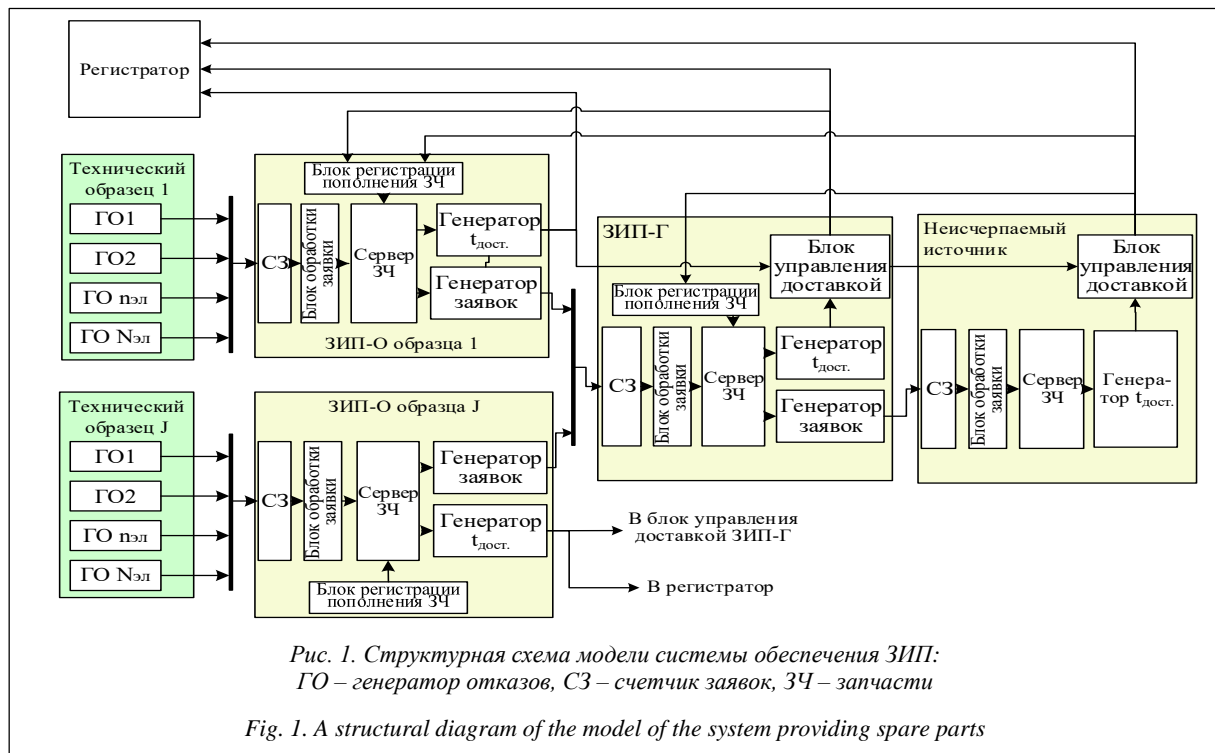


Рис. 1. Структурная схема модели системы обеспечения ЗИП: ГО – генератор отказов, СЗ – счетчик заявок, ЗЧ – запчасти

Fig. 1. A structural diagram of the model of the system providing spare parts

время доставки запчастей), при восстановлении технического образца;  $L_{\phi}^{O(r)}$  – количество запчастей  $\phi$ -й номенклатуры в составе комплекта ЗИП-О (ЗИП-Г).

Принцип работы модели заключается в следующем.

На первом этапе выбирается вид стратегии пополнения комплектов ЗИП. Исследуются следующие виды стратегии пополнения комплектов ЗИП:  $\gamma = 1$  – периодическое пополнение,  $\gamma = 2$  – периодическое пополнение с экстренными доставками,  $\gamma = 3$  – непрерывное пополнение.

На втором этапе устанавливается начальное значение уровня запасов серверов запчастей для каждого комплекта ЗИП по каждой номенклатуре  $L_{\phi \text{ нач}}^{O(r)}$ . При этом принимаем, что уровень запасов сервера запчастей неисчерпаемого источника соответствует  $L_{\phi}^{\text{НИ}} = \infty$ .

На третьем этапе осуществляется генерирование случайной величины времени возникновения отказа каждого элемента из состава образца техники в соответствии с одним из видов законов распределения. В результате этого на временной оси формируется массив моментов отказов элементов образцов техники  $F[Mt]$  по каждой номенклатуре.

На четвертом этапе осуществляется работа модели  $S_{\text{ЗИП}}$  в соответствии с выбранной стратегией пополнения ЗИП.

Рассмотрим работу модели для стратегии периодического пополнения.

При периодическом пополнении запас элементов  $\phi$ -й номенклатуры периодически через заранее

заданные фиксированные интервалы времени (периоды пополнения  $T_{\Pi}$ ) для комплектов ЗИП восстанавливается до начального уровня [1, 9]. При этом период пополнения комплекта ЗИП-Г  $T_{\Pi}^{\Gamma}$  кратен периоду пополнения комплекта ЗИП-О  $T_{\Pi}^{\text{O}}$  ( $T_{\Pi}^{\Gamma} = qT_{\Pi}^{\text{O}}$ ).

Разделим временную ось  $t$  на промежутки, соответствующие периодам пополнения комплектов ЗИП от  $1T_{\Pi}^{\text{O}}$  до  $qT_{\Pi}^{\text{O}}$  таким образом, чтобы каждый период был классифицирован с конкретным комплектом.

Процедура моделирования  $S_{\text{ЗИП}}$  заключается в следующем.

**Шаг 1.** Ввод исходных условий. На момент начала моделирования номер текущего периода пополнения равен 1 ( $q = 1$ ), счетчик заявок на запчасти каждого комплекта имеет нулевое значение ( $M_{\phi}^{O(\Gamma, \text{НИ})} = 0$ ), а текущий уровень запаса в комплектах ЗИП равен начальному:

$$L_{\phi \text{ тек.}}^{O(\Gamma)} = L_{\phi \text{ нач.}}^{O(\Gamma)}. \tag{1}$$

**Шаг 2.** Моделирование функционирования образцов техники как источников заявок на запчасти. После запуска генераторов отказов, имитирующих функционирование элементов образцов техники, на интервале времени  $[(q-1)T_{\Pi}^{\text{O}}, qT_{\Pi}^{\text{O}}]$  в массиве  $F[Mt]$  производится поиск ближайшего момента отказа и определяется индекс номенклатуры  $\phi$  отказавшего элемента. Далее для элементов этой номенклатуры проверяется условие принадлежности случайной величины наработки до отказа  $Mt_{\phi}$  ин-

тервалу времени  $[(q-1)T_{\Pi}^0, qT_{\Pi}^0]$ . В случае выполнения условия запускается моделирование работы комплектов ЗИП (шаг 3), в противном случае производится поиск на следующем интервале пополнения, а текущему уровню запаса в комплектах ЗИП присваивается значение в соответствии с выражением (1).

**Шаг 3.** Моделирование работы комплектов ЗИП. На вход счетчика заявок комплекта ЗИП-О поступает заявка на запчасти ф-й номенклатуры. Значение счетчика заявок по этой номенклатуре увеличивается на единицу:

$$Z_{\phi}^0 = Z_{\phi}^0 + 1. \quad (2)$$

При каждом увеличении своего значения счетчик заявок подает управляющий сигнал на сервер запчастей с задержкой на величину  $T_{\text{Адм}}$ , связанную с административными временными затратами на обработку заявки. Величина задержки формируется в блоке обработки заявки и является случайной величиной, которая подчиняется равномерному закону распределения:

$$f(T_{\text{Адм}}) = \frac{1}{T_2 - T_1} \text{ при } T_1 \leq T_{\text{Адм}} \leq T_2, \quad (3)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – минимальное и максимальное время обработки заявки соответственно.

При этом значение текущего уровня запаса в сервере уменьшается на единицу:

$$L_{\phi \text{ тек.}}^0 = L_{\phi \text{ тек.}}^0 - 1. \quad (4)$$

При имитации выдачи запчастей запускается генератор времени доставки, формирующий случайную величину времени доставки запчастей из комплекта ЗИП.

Для описания распределения случайного времени доставки  $t_{\text{дост.}}$  выбрано гамма-распределение с параметрами  $k, \lambda_{\text{д}}$ , которое хорошо согласуется с реальными данными эксплуатации:

$$f_k(t_{\text{дост.}}) = \frac{\lambda_{\text{д}}^k t_{\text{дост.}}^{k-1} e^{-\lambda_{\text{д}} t_{\text{дост.}}}}{\Gamma(k)}, \quad t_{\text{дост.}} > 0, \quad (5)$$

где  $k > 0, \lambda_{\text{д}} > 0$  – параметры распределения;  $\Gamma(k)$  – гамма-функция:

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} e^{-t_{\text{дост.}}} t_{\text{дост.}}^{k-1} dt_{\text{дост.}}. \quad (6)$$

Значение величины времени доставки комплектом ЗИП-О  $t_{\text{дост.}}^{\phi \text{ О}}$  поступает на вход регистратора, в котором производится статистическая обработка результатов моделирования.

Если в сервере запчастей после отказа элемента ф-й номенклатуры запчасти данного типа в комплекте ЗИП-О отсутствуют ( $L_{\phi \text{ тек.}}^0 = 0$ ), произойдет отказ комплекта ЗИП-О. В этом случае генератор времени доставки комплекта ЗИП-О не включается, а запускается генератор заявок, который выдает на счетчик заявок комплекта ЗИП-Г управляющий сигнал. Комплект ЗИП-О будет находиться

в состоянии отказа по запчастям данной номенклатуры до окончания периода пополнения  $T_{\Pi}^0$ .

Работа ЗИП-Г осуществляется аналогичным образом. В случае отказа ЗИП-Г ( $L_{\phi \text{ тек.}}^{\Gamma} = 0$ ) запускается генератор заявок, который выдает на счетчик заявок неисчерпаемого источника управляющий сигнал. Комплект ЗИП-Г будет находиться в состоянии отказа по запчастям данной номенклатуры до окончания периода пополнения  $T_{\Pi}^{\Gamma}$ .

Работа неисчерпаемого источника при получении заявки осуществляется аналогичным образом, за исключением того, что  $L_{\phi \text{ тек.}}^{\text{НИ}} = \infty$ .

Регистратор представляет собой банк данных, в котором содержится накопленная информация о суммарном времени доставки от каждого комплекта ЗИП при отказе элементов каждой номенклатуры. Данные регистратора используются для оценки величины среднего времени доставки запчастей  $T_{\text{дост.}}$ .

Таким образом, на каждом временном интервале  $[(q-1)T_{\Pi}^0, qT_{\Pi}^0]$  последовательно находятся моменты отказов элементов образца техники и проверяется наличие соответствующих запчастей в комплекте ЗИП. В результате моделирования собираются все необходимые данные для расчета показателя  $T_{\text{дост.}}$  и оценки состава комплекта ЗИП  $L_{\phi}^{0(\Gamma)}$  по каждой номенклатуре.

Рассмотрим особенности моделирования  $S_{\text{ЗИП}}$  для стратегии периодического пополнения с экстренными доставками.

Процедура моделирования периодического пополнения с экстренными доставками в комплекте ЗИП аналогична процедуре моделирования периодического пополнения, за исключением некоторых характерных для данной стратегии особенностей. Ввиду того, что появляется возможность организовать экстренную доставку запасных частей в случае отказа комплекта ЗИП, при исчерпании запаса на периоде пополнения начальный уровень запаса экстренно восстанавливается и последующая его работа не приводит к переадресации заявок в вышестоящий комплект ЗИП. Особенности работы моделей комплектов ЗИП на третьем шаге моделирования заключаются в следующем.

Пусть на вход счетчика заявок комплекта ЗИП-О поступает заявка на запчасти ф-й номенклатуры. Значение счетчика увеличивается на единицу в соответствии с (2). Счетчик заявок подает управляющий сигнал на сервер запчастей. При этом значение текущего уровня запаса в сервере уменьшается на единицу в соответствии с (4). При имитации выдачи запчастей запускается генератор времени доставки, формирующий случайную величину времени доставки запчастей из комплекта ЗИП.

Если в сервере запчастей после отказа элемента ф-й номенклатуры значение текущего уровня за-

паса в сервере запчастей будет равно нулю ( $L_{\phi \text{ тек.}}^O = 0$ ), то совместно с генератором времени доставки комплекта ЗИП-О запускается генератор заявок, который выдает на счетчик заявок комплекта ЗИП-Г управляющий сигнал. Комплект ЗИП-О будет находиться в состоянии отказа по запчастям данной номенклатуры до момента экстренной доставки запчастей либо до окончания периода пополнения  $T_{\Pi}^O$ , если величина времени экстренной доставки  $t_{\text{дост. } \phi}^O$  превышает срок ожидания плановой поставки:

$$t_{\text{дост. } \phi}^O \geq T_{\Pi}^O - t_0^{\phi}, \quad (7)$$

где  $t_0^{\phi}$  – случайное время отказа элемента  $\phi$ -й номенклатуры.

При поступлении сигнала на счетчик заявок комплекта ЗИП-Г его значение увеличивается на величину

$$Z_{\phi}^{\Gamma} = Z_{\phi}^{\Gamma} + L_{\phi \text{ нач.}}^O. \quad (8)$$

При таком увеличении своего значения счетчик заявок подает управляющий сигнал на сервер запчастей. При этом значение текущего уровня запаса в сервере уменьшается на величину

$$L_{\phi \text{ тек.}}^{\Gamma} = L_{\phi \text{ тек.}}^{\Gamma} - L_{\phi \text{ нач.}}^O. \quad (9)$$

При имитации выдачи запчастей запускается генератор времени доставки, формирующий случайную величину времени доставки запчастей из комплекта ЗИП-Г в комплект ЗИП-О. Значение  $t_{\text{дост.}}^{\Gamma}$  поступает в блок управления доставкой, который осуществляет выдачу сигнала только в блок регистрации пополнения запчастей комплекта ЗИП-О. В блоке регистрации пополнения запчастей формируется команда в сервер запчастей на приведение текущего запаса элементов  $\phi$ -й номенклатуры к начальному значению ( $L_{\phi \text{ тек.}}^O = L_{\phi \text{ нач.}}^O$ ).

Если в сервере запчастей комплекта ЗИП-Г текущий уровень запасов не позволяет экстренно восстановить начальный уровень запасов комплекта ЗИП-О ( $L_{\phi \text{ тек.}}^{\Gamma} < L_{\phi \text{ нач.}}^O$ ), то комплект ЗИП-Г переходит в состояние отказа и включается генератор заявок, который формирует в неисчерпаемом источнике фиксированную величину заявки, равную начальному уровню запасов комплекта ЗИП-О по  $\phi$ -й номенклатуре. Работа неисчерпаемого источника осуществляется аналогичным образом.

Отметим, что экстренные доставки организуются только для пополнения начального уровня запасов комплектов ЗИП-О, комплект ЗИП-Г пополняется периодически, за исключением случаев, когда содержание элементов какой-либо номенклатуры в комплекте ЗИП-О не предусмотрено.

При такой организации доставки запчастей на вход регистратора будет поступать только величина времени доставки запчастей от комплекта ЗИП-О  $t_{\text{дост.}}^O$ .

Рассмотрим особенности моделирования  $S_{\text{ЗИП}}$  для стратегии непрерывного пополнения.

Особенностью стратегии непрерывного пополнения является то, что при каждом срабатывании счетчика заявок сервер запчастей комплекта ЗИП одновременно запускает и генератор времени доставки, и генератор заявок. Значение величины  $t_{\text{дост.}}^O$  поступает на вход регистратора. Запустившийся при этом генератор заявок выдает на счетчик заявок комплекта ЗИП-Г управляющий сигнал. Работа комплекта ЗИП-Г и неисчерпаемого источника осуществляется так же, как в режиме экстренной доставки, за исключением того, что и генератор времени доставки, и генератор заявок запускаются одновременно. Таким образом, происходит ступенчатое восполнение каждой израсходованной запчасти.

Результатом моделирования на данном шаге выступает совокупность  $X$  реализаций случайных оценок времени доставки элементов из комплектов ЗИП по каждой номенклатуре в рамках выбранной стратегии пополнения.

*Шаг 4.* Осуществляются обработка экспериментальных данных и формирование матрицы значений среднего времени доставки запчастей каждой номенклатуры из комплектов ЗИП при различных стратегиях пополнения  $\|T_{\text{дост. } \gamma \phi}\|$  вида

$$T_{\text{дост.}} = \begin{pmatrix} T_{\text{дост. } \gamma=1}^{\phi=1}, T_{\text{дост. } \gamma=1}^{\phi=2} \dots T_{\text{дост. } \gamma=1}^{\phi=\Phi} \\ T_{\text{дост. } \gamma=2}^{\phi=1}, T_{\text{дост. } \gamma=2}^{\phi=2} \dots T_{\text{дост. } \gamma=2}^{\phi=\Phi} \\ T_{\text{дост. } \gamma=3}^{\phi=1}, T_{\text{дост. } \gamma=3}^{\phi=2} \dots T_{\text{дост. } \gamma=3}^{\phi=\Phi} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{где } T_{\text{дост. } \gamma}^{\phi} = \frac{\sum_{x=1}^X t_{\text{дост. } \gamma \phi}^{O(\Gamma, \text{НИ})}}{X}.$$

Таким образом, для каждой номенклатуры элементов получаем совокупность значений среднего времени удовлетворения заявки в запчастях, связанного с их доставкой из комплектов ЗИП. Это позволяет путем проверки условия

$$T_{\text{дост. } \phi}^{\phi} \leq T_{\text{дост. } \phi}^{\text{пред.}} \quad (11)$$

сформулировать требования к  $S_{\text{ЗИП}}$  по составу запчастей каждой номенклатуры и применению к ним различных стратегий пополнения.

*Шаг 5.* Формирование состава комплектов ЗИП. Известно [9], что комплекты ЗИП при числе типов элементов больше одного могут обеспечивать заданное значение времени задержки в исполнении заявки, связанное с доставкой запчастей  $T_{\text{дост.}}$ , при различном составе, поэтому существует возможность выбора структуры и характеристик  $S_{\text{ЗИП}}$  с минимальной стоимостью. Оптимизация запасов запчастей в комплектах ЗИП осуществляется на основании метода, аналогичного методу покоординатного спуска в направлении наискорейшего убывания целевой функции, представляющей собой отношение прироста среднего времени задержки в

исполнении заявки, которое обеспечивается включением запчастей в состав ЗИП, к стоимости данной запчасти [9, 10]. Суть оптимизации комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г заключается в следующем.

1. задается вектор стоимостей элементов каждой номенклатуры с учетом наличия в стоимости каждого элемента составляющих, характеризующих различные стратегии пополнения:

$$\bar{C}_{\phi\Sigma} = (C_{1\Sigma}, \dots, C_{\phi\Sigma}, \dots, C_{\Phi\Sigma}), \quad (12)$$

$$C_{\phi\Sigma} = C_{\phi} + \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Pi}^{O(\Gamma)}} C_{д\phi}^{O(\Gamma, НИ)} + C_{д\text{раз.}\phi}^{\Gamma(НИ)} + C_{д\text{НП}\phi}^{O(\Gamma, НИ)} C_{\Sigma} + C_{\text{сод.}\phi}, \quad (13)$$

где  $C_{\phi}$ ,  $C_{д\phi}^{O(\Gamma, НИ)}$ ,  $C_{д\text{раз.}\phi}^{\Gamma(НИ)}$ ,  $C_{д\text{НП}\phi}^{O(\Gamma, НИ)}$ ,  $C_{\text{сод.}\phi}$  – стоимость производства, плановой и разовой доставки, доставки при непрерывном пополнении и содержания элементов  $\phi$ -й номенклатуры соответственно,  $T_{\Sigma}$  – период эксплуатации СТС.

2. Перебирая номенклатуру элементов, определяется показатель эффективности  $S_{ЗИП}$  при единичном запасе запчастей в каждом комплекте, начиная с ЗИП-Г. Если единичный запас позволяет обеспечить требуемое время восстановления, принимается решение об оптимальности комплекта ЗИП. В противном случае комплект ЗИП необходимо оптимизировать по данной номенклатуре. Для этого рассчитывается промежуточный показатель  $R_{\phi}^{O(\Gamma)}$ , характеризующий прирост значения показателя эффективности на единицу затрат:

$$R_{\phi}^{O(\Gamma)} = \frac{T_{\text{дост.}\phi} (I_{\phi\text{нач.}}^{O(\Gamma)} + 1) - T_{\text{дост.}\phi} (I_{\phi\text{нач.}}^{O(\Gamma)})}{C_{\phi\Sigma}}. \quad (14)$$

3. Среди значений  $R_{\phi}^O$  и  $R_{\phi}^{\Gamma}$  производится поиск номенклатуры, для которой выполняется условие

$$\phi^* = \max_{\phi} R_{\phi}^{O(\Gamma)}, \quad \phi \in \bar{1, \Phi}. \quad (15)$$

Для этой номенклатуры величина текущего запаса увеличивается на единицу, и производится моделирование работы  $S_{ЗИП}$  в соответствии с процедурой, указанной в шаге 3.

4. Проверяется условие (11). Если оно выполняется, комплект ЗИП по данной номенклатуре считается оптимальным, а значения полученного уровня запасов закрепляются для соответствующих комплектов ЗИП. В противном случае осуществляется пересчет значений  $T_{\text{дост.}\phi} (I_{\phi\text{нач.}}^{O(\Gamma)})$ ,  $T_{\text{дост.}\phi} (I_{\phi\text{нач.}}^{O(\Gamma)} + 1)$ ,  $R_{\phi}^{O(\Gamma)}$  и процедура проверки условия (15) повторяется. Итерации продолжаются до тех пор, пока не будет выполнено условие (11) для каждой номенклатуры. Если на каком-либо шаге показатель (11) примет нулевое значение, для элементов данной номенклатуры необходимо применить дополнительные меры по повышению безотказности.

5. После определения оптимального состава номенклатуры комплектов ЗИП-О и ЗИП-Г вычисляется суммарная стоимость  $S_{ЗИП}$ .

В настоящее время создан прототип модели рассмотренной системы в среде имитационного моделирования пакета MATLAB. При разработке были использованы три модуля среды MATLAB:

- для моделирования непрерывных случайных величин использовались блоки компонента Simulinc из состава пакета MATLAB;
- для моделирования дискретных процессов использовался пакет SimEvents;
- для отслеживания состояний системы использовался пакет событийного моделирования Stateflow.

На рисунке 2 представлен графический интерфейс программной реализации модели.

Разработанная программа позволяет рассчитать номенклатурный и количественный составы комплектов ЗИП СТС в соответствии с указанным выше механизмом расчетов.

Таким образом, представленная модель системы обеспечения СТС запчастями позволяет учесть в структуре СТС наличие элементов, имеющих различные законы надежности, что более адекватно отражает условия ее эксплуатации и влияет на формирование количественного состава комплектов ЗИП, а также разделить потоки заявок

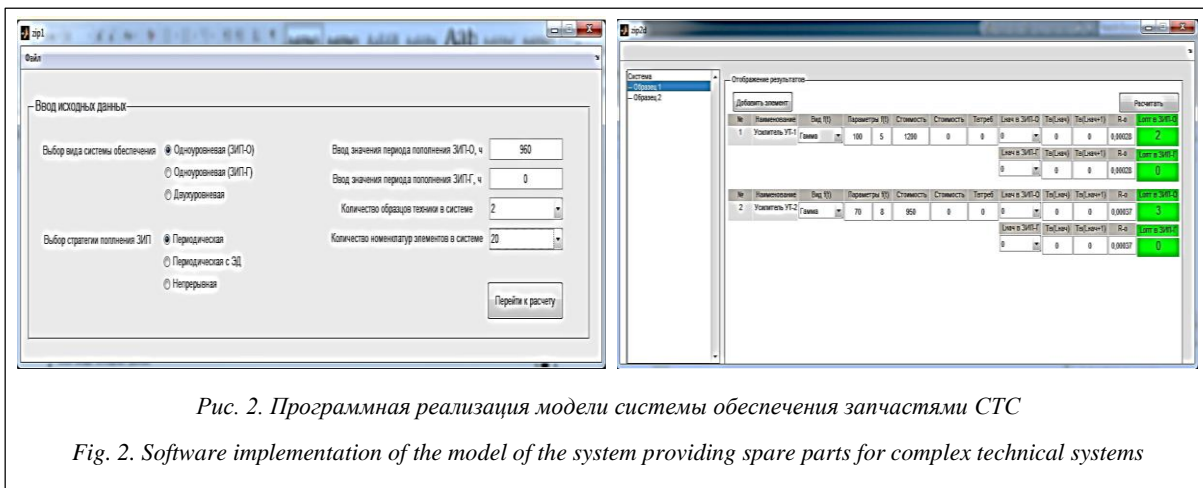


Рис. 2. Программная реализация модели системы обеспечения запчастями СТС

Fig. 2. Software implementation of the model of the system providing spare parts for complex technical systems

между комплектами ЗИП-О и ЗИП-Г не по априорным данным, как фактически реализовано в действующих нормативных документах [1], а соответственно условиям эксплуатации, которые закладываются в модель через реализованный уровень надежности как самой СТС, так и комплектов ЗИП. Данная модель является масштабируемой и закладывает возможность реализации системы обеспечения ЗИП любой структуры: одноуровневой или многоуровневой в зависимости от условий применения или принципов построения СТС.

#### Литература

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 420 с.
2. Григорьевская Т.Ю., Михайлова Е.М., Филиппов Р.Н., Фомин М.С. Дискретно-событийная модель системы обеспечения изделий запасными элементами в программном комплексе ZIP Progress // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: сб. стат. XIV Междунар. науч.-технич. конф. 2014. С. 87–91.
3. Чуркин В.В. Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. Вып. 2–3. С. 79–92.

4. Домира Р.В., Лысюк А.П., Цыбенко Д.В., Щербинко А.В. Методика расчета системы обеспечения запасными частями территориально распределенной техники // Программные продукты и системы. 2009. № 1. С. 128–130.

5. Абу-Абед Ф.Н. Использование результатов распознавания предаварийных ситуаций для организации снабжения буровых запчастями // Междисциплинарные исследования в науке и образовании. 2012. № 1 Sp. URL: <http://mino.esrae.ru/157-683> (дата обращения: 10.12.2018).

6. Глазунов Ю.М., Горяинов В.И. Постановка задачи обоснования рациональных комплектов ЗИП и запасов спецтехники для системы спецтехники с использованием федеральной системы каталогизации продукции // Вооружение и экономика. 2008. № 3 (3). С. 17–21.

7. Хроменко А.А. Оптимизация управления многономенклатурными распределенными запасами ремонтируемых узлов сложной техники методом имитационного моделирования: дисс. ... канд. технич. наук. М.: Изд-во РУДН, 2011. 130 с.

8. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений; [под общ. ред. В.Г. Потемкина]. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

9. Головин И.Н., Чуварыгин Б.В., Шура-Бура А.Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем // Библиотека инженера по надежности. М.: Радио и связь, 1984. 175 с.

10. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др. Надежность технических систем; [под ред. И.А. Ушакова]. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

Software & Systems  
DOI: 10.15827/0236-235X.122.374-381

Received 12.12.17  
2018, vol. 31, no. 2, pp. 374–381

### A METHODOICAL APPROACH TO MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEM SUPPORT WITH SPARE PARTS

*D.Yu. Brezhnev*<sup>1</sup>, Ph.D. (Engineering), Doctoral Student, [dimanbreg@mail.ru](mailto:dimanbreg@mail.ru)  
*R.V. Dopira*<sup>2</sup>, Dr.Sc. (Engineering), Leading Researcher, [rvdopira@yandex.ru](mailto:rvdopira@yandex.ru)  
*A.A. Sudarikov*<sup>1</sup>, Lecturer, [Andrei.2945@yandex.ru](mailto:Andrei.2945@yandex.ru)

<sup>1</sup> Military Academy of the Aerospace Defence, Zhigarev St. 50, Tver, 170022, Russian Federation

<sup>2</sup> NPO RusBITex, Kalinina Ave. 17, Tver, 170001, Russian Federation

**Abstract.** The article considers a methodical approach to constructing a model of a multilevel system for providing spare parts for complex technical systems. The model is designed to justify a quantitative and nomenclature composition of spare parts kits considering the requirements for efficiency of performance restoration of the equipment samples in the system.

The key idea is to put the simulated flow of requests to the model input and to investigate the response of a spare parts system by modeling the time for fulfillment of requests from sets of spare parts, tools of various levels, gradually increasing their nomenclature and quantity composition. At the same time, the simulated stream of requests can be different from the simplest one. It allows reasonable distributing applications for spare parts between sets of various levels.

The model provides for the possibility of using one of three strategies for replenishment of spare parts kits both in the maintenance system of spare parts and in the specific nomenclature of spare parts in particular. The principle of modular representation of spare parts sets allows modeling a system of providing spare parts in different versions of a single-level or multi-level structure depending on application conditions or the principles of constructing complex technical systems. Modeling takes into account the contribution of each spare part cost to the total cost of the spare parts maintenance system with restriction for the required delay time related spare parts delivery. As a result, it is possible to justify the composition of spare parts kits of a complex technical system in an optimal way.

**Keywords:** spare parts supply, spare parts system, simulation model, complex technical system.

#### References

1. Shannon R. *Imitacionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Systems Simulation – Art and Science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 420 p.

2. Grigorevskaya T.Yu., Mikhaylova E.M., Filippov R.N., Fomin M.S. Discrete-event model of the system of providing spare parts in the ZIP Progress software package. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: sb. stat. XIV Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* [Problems of Informatics in Education, Management, Economics and Technology: Proc. 14th Int. Sci. and Tech. Conf.]. Penza, PDZ, 2014, pp. 87–91 (in Russ.).
3. Churkin V.V. Estimation and optimization of a spare parts kit using the method of statistical modeling. *Nauch.-tekhnich. vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg Polytechnic Univ. J. of Engineering Science and Technology]. 2015, i. 2-3, pp. 79–92 (in Russ.).
4. Dopira R.V., Lysyuk A.P., Tsybenko D.V., Shcherbinko A.V. Method of calculating the system for providing spare parts for geographically distributed equipment. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2009, no. 1, pp. 128–130 (in Russ.).
5. Abu-Abad F.N. Using results of recognition of pre-emergency situations for an organization of drilling spare parts supply. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya v nauke i obrazovanii* [Interdisciplinary Research in Science and Education]. 2012, no. 1 Sp. Available at: <http://mino.esrae.ru/157-683> (accessed December 10, 2018) (in Russ.).
6. Glazunov Yu.M., Goryainov V.I. Statement of the task of justifying rational sets of spare parts and spare parts for special equipment using a federal product cataloging system. *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economics]. 2008, no. 3 (3), pp. 17–21 (in Russ.).
7. Khromenko A.A. *Optimizatsiya upravleniya mnogonomenklaturnymi raspredelennymi zapasami remontiruemyykh uzlov slozhnoy tekhniki metodom imitatsionnogo modelirovaniya* [Optimization of Control of Multi-Nomenclature Distributed Reserves of Complex Equipment Repaired Knots Using Imitating Modeling]. PhD Thesis. Moscow, 2011, 130 p.
8. Chernykh I.V. *Simulink: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [Simulink: the Environment for Creating Engineering Applications]. V.G. Potemkin (Ed.). Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003, 496 p.
9. Golovin I.N., Chuvarugin B.V., Shura-Bura A.E. *Raschet i optimizatsiya komplektov zapasnykh elementov radioelektronnykh sistem* [Calculation and Optimization of Sets of Spare Components for Electronic Systems]. Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1984, 175 p.
10. Belyaev Yu.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem* [Reliability of Technical Systems]. I.A. Ushakov (Ed.). Moscow, Radio i Svyaz Publ., 1985, 608 p.

## Примеры библиографического описания статьи

1. Брежнев Д.Ю., Допира Р.В., Судариков А.А. Методический подход к моделированию обеспечения сложных технических систем запасными частями // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31. № 2. С. 374–381. DOI: 10.15827/0236-235X.122.374-381.
2. Brezhnev D.Yu., Dopira R.V., Sudarikov A.A. A methodical approach to modeling of complex technical system support with spare parts. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2018, vol. 31, no. 2, pp. 374–381 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.122.374-381.