

ОБОБЩЕННАЯ КОНЦЕПТУАЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Д.В. Шаповалов, А.В. Пачин, Е.Н. Есипов (Санкт-Петербург)

Введение

Важнейшими свойствами современной техники являются мобильность и автономность.

Первое определяет возможность перемещения сложных технических комплексов (СТК) между различными районами действий своим ходом. При этом возникает существенное противоречие между необходимостью обеспечить требуемые надежность характеристики комплекса и значительными ограничениями на габариты и массу его компонентов.

Второе свойство характеризует способность выполнять функциональные задачи в течение установленного периода на удалении от места постоянного размещения, имея при этом достаточные запасы необходимого для функционирования технического имущества, включая запасные части и другие материальные средства.

Наличие достаточного количества типовых элементов замены (ТЭЗ) для восстановления работоспособности аппаратуры после отказов является важнейшим условием поддержания готовности комплекса к применению по назначению. Невозможность восстановления одного из агрегатов может привести к снижению показателей техники, а превышение установленных норм времени восстановления из-за отсутствия ЗИП для критически важных компонентов СТК, может привести к срыву выполнения задачи.

Указанные обстоятельства подчеркивают значительную актуальность задачи формирования достаточных для поддержания готовности вооружения комплектов запасных частей (ЗЧ) для мобильных СТК.

При этом известные ограничения на габаритные показатели возимых комплектов ЗИП-О не позволяют иметь в них достаточное число ТЭЗ для обеспечения автономного функционирования комплекса в течение длительных периодов времени.

Наиболее эффективным направлением разрешения приведенного противоречия является создание много эшелонных систем поставки запасных частей (СПЗЧ) для СТК. СПЗЧ должна включать достаточное количество ТЭЗ, размещенных частично на подвижных объектах, и обеспечивающих своевременное восстановление работоспособности и восполнение расхода ЗИП в одиночных комплектах в соответствии установленными стратегиями.

Создание подобных СПЗЧ с применением моделей, приведенных в действующих нормативных документах [1] невозможно в силу ряда недостатков, описанных в [2-7]. Основным же препятствием является то, что приведенные модели не учитывают изменение топологии боевого порядка для различных экземпляров или вариантов построения СТК и необходимость СПЗЧ адаптироваться к этому условию.

Приведенные обстоятельства определяют необходимость создания новых моделей, позволяющих исследовать процессы функционирования СТК с приданными сложными СПЗЧ, имеющими в своем составе подвижные комплекты ЗИП.

Постановка задачи исследования

Представим комплекс в виде I агрегатов, состоящих из J последовательно соединенных (в смысле надежности) групп однотипных элементов, каждой из которых присвоен индекс ij ($i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$), и комплекта ЗИП-О к ним. Отказ любого ijk -го

элемента ($k = \overline{1, K_{ij}}$ – номер элемента в группе ij) приводит к отказу агрегата, в состав которого он входит, и, следовательно, должна быть произведена его замена из комплекта ЗИП-О. При отсутствии в комплекте ЗИП-О элементов, необходимых для устранения отказов оборудования или замены элементов, выработавших установленный для них ресурс, оборудование будет простаивать в неисправном состоянии, что приведет к уменьшению его коэффициента готовности.

Для восполнения ЗИП-О подвижный ЗИП-А передвигается между позициями x и y ($x = \overline{1, I}, y = \overline{1, I}$) в соответствии с очередью заявок от агрегатов. Удовлетворение заявки i -ого агрегата на пополнение ЗИП-О осуществляется только в случае нахождения ЗИП-А в позиции i . В начальный момент времени ЗИП-А находится в позиции Pos^* . В случае отсутствия в ЗИП-А запасной части требуемой номенклатуры, соответствующая заявка не удовлетворяется до момента восполнения ЗИП-А.

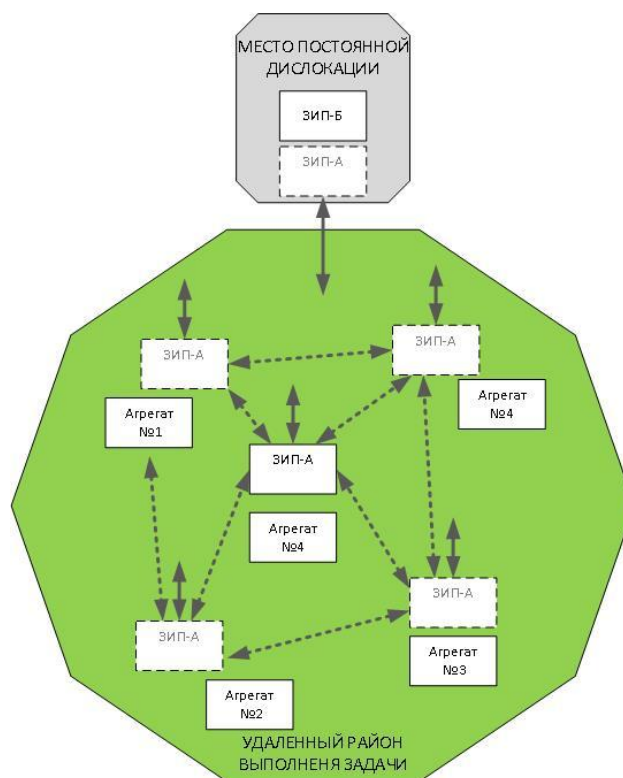


Рис. 1. Вариант построения СОЗЧ СТК

Для восполнения комплекта запасных частей из стационарного группового ЗИП-Б, подвижный ЗИП-А прибывает к месту его постоянной дислокации – позиции $(I+I)$ – с периодичностью s . Обработка заявок от агрегатов на восполнение ЗИП-О в течение времени пополнения ЗИП-А не производится (рис. 1).

Задача моделирования многоэшелонной подвижной СПЗЧ комплекса заключается в нахождении аналитико-имитационной зависимости суммарного времени простоя агрегатов комплекса t_{np} за период эксплуатации $t_э$ от количества запасных частей в комплекте ЗИП-О Z_i^o , подвижном ЗИП-А Z^A , стационарном ЗИП-Б Z^B и периодичности пополнения ЗИП-А s при известных надежностных характеристиках элементов l_j и длительностях перемещения ЗИП-А между позициями $T_{(I+1, I+1)}$.

Формально указанная задача может быть представлена в следующем виде.

Дано: $D, T^{<I+2' I+2>}, t_s, Z^o, Z^A, Z^B, s,$

где $D = [I_1, I_2, \dots, I_j, \dots, I_J]^T,$

$Z^o = [Z_1^o, Z_2^o, \dots, Z_i^o, \dots, Z_J^o]^T,$

$Z_i^o = [z_{i1}^o, z_{i2}^o, \dots, z_{ij}^o]^T,$

$Z^A = [z_1^A, z_2^A, \dots, z_j^A, \dots, z_J^A]^T,$

$Z^B = [z_1^B, z_2^B, \dots, z_j^B, \dots, z_J^B]^T.$

Требуется построить аналитико-имитационную модель, описывающую следующую зависимость $t^{np} = f(t_s, D, Z^o, Z^A, Z^B, s).$

Построение концептуально-информационной модели функционирования комплекса с приданной СПЗЧ

Процесс функционирования СПЗЧ является динамическим, значения ряда показателей, характеризующих объект (таких, например, как текущее местоположение), существенно меняются во времени, что определяет необходимость применения динамических моделей при исследовании такого типа объектов.

Перед построением математических моделей необходим анализ объекта исследований, определение и вербальное описание существенных устойчивых зависимостей между параметрами оборудования и СОЗЧ, оказывающими влияние на целевой показатель $t^{np}.$

Представим комплекс как совокупность источников заявок на пополнение запасными элементами из ЗИП высшего уровня (U^o и U^A) и сигналов об

удовлетворении заявок (Q^A и Q^B) (рис.2), где

$U^o = [U_1^o, U_2^o, \dots, U_i^o, \dots, U_I^o]^T,$

$U_i^o = [u_{i1}^o, u_{i2}^o, \dots, u_{ij}^o, \dots, u_{iI}^o]^T, u_{ij}^o \in \mathbb{N}_0,$

$Q^A = [q_1^A, q_2^A, \dots, q_j^A, \dots, q_J^A]^T, q_j^A \in \mathbb{N}_0$

$U^A = [u_1^A, u_2^A, \dots, u_j^A, \dots, u_J^A]^T, u_j^A \in \mathbb{N}_0$

$Q^B = [q_1^B, q_2^B, \dots, q_j^B, \dots, q_J^B]^T, q_j^B \in \mathbb{N}_0.$

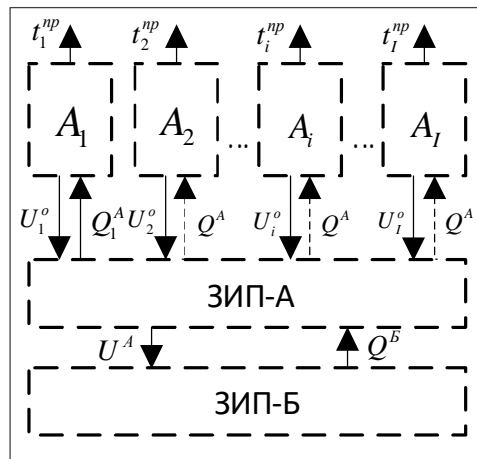


Рис. 2. Концептуально-информационная модель комплекса

Представленная в данной работе модель комплекса с приданной СОЗЧ является динамической моделью с дискретным временем. Продвижение модельного времени выполняется с фиксированным шагом, с приращением на заданную константу, и принимает значения $t = 1..t_9$. Тогда каждый агрегат комплекса в момент времени t можно описать кортежем входных и выходных данных, а задача получения аналитико-имитационного описания зависимости

$$t_i^{np}(t) = t_i^{np}(t - 1) + f(U^O(t), U^A(t), Q^A(t), Q^B(t)) \quad (2)$$

сводится к описанию правил изменения этих переменных во времени.

2.1. Концептуальная модель агрегата

В случае отказа одного (или нескольких) элемента ijk изменяется признак его работоспособности P_{ijk} , что приводит к изменению информации о наличии в агрегате неисправных блоков R_i и изменению признака работоспособности агрегата в целом P_i^A .

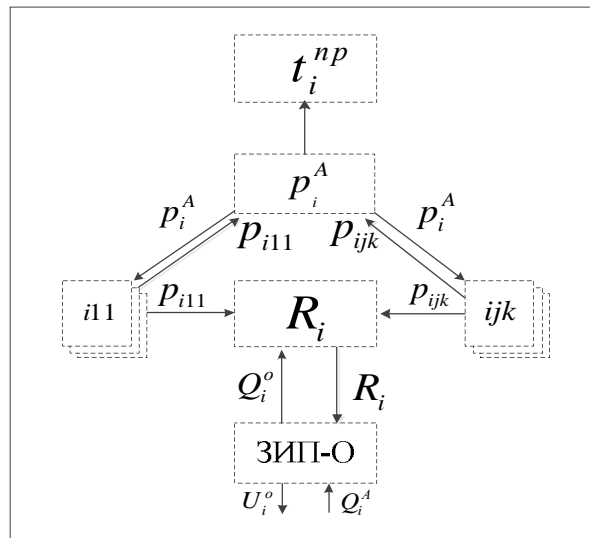


Рис. 3. Концептуально-информационная модель агрегата

На основании информации f_{ij} из ЗИП-О, входящего в состав агрегата, истребуются ТЭЗ для восстановления работоспособности.

При этом по сигналу об удовлетворении потребности Q , формируемому в ЗИП-О, уменьшается потребность R_i , а признаки работоспособности элементов, установленных взамен отказавших, соответствуют работоспособному состоянию.

На каждой фазе моделирования выполняется контроль признаков работоспособности элементов.

При отсутствии в агрегате неисправных блоков признак работоспособности агрегата устанавливается в «работоспособен».

Поскольку при неисправности любого элемента ijk , входящего в состав агрегата, последний простаивает, за время простоя агрегата можно принять длительность нахождения в его составе, по крайней мере, одного неисправного элемента.

2.2 Концептуально-информационная модель элемента

Работоспособность каждого агрегата определяется исправностью входящих в его состав элементов.

При отсутствии в агрегате неисправных блоков признак его работоспособности $p_i^A = 1$, в этой фазе модельного времени агрегат работоспособен и наработка всех блоков увеличивает на 1.

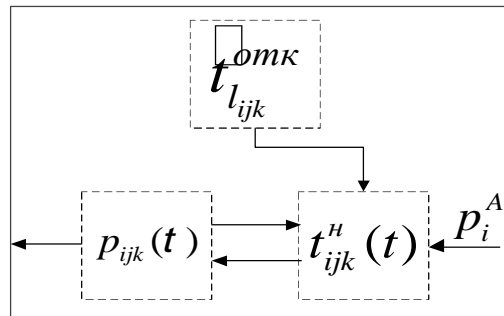


Рис. 4. Концептуально-информационная модель элемента

Допустим, что отказ элемента ijk , входящего в состав i -го агрегата, происходит при достижении им наработки $t_{ijk}^{отк} = \hat{X}_{ijk}$, где \hat{X}_{ijk} – некоторая случайная величина, определенная с помощью генератора случайных чисел, использующего известное распределение с заданным параметром l .

При этом признак работоспособности блока изменяется. При неисправности любого элемента, входящего в состав агрегата, последний простаивает, т.е. наработка всех входящих в его состав элементов остается неизменной.

Работоспособность ijk -го элемента восстанавливается и его наработка обнуляется только при получении запасной части j -ого типа из ЗИП-О с определением нового значения $t_{ijk}^{отк}$.

2.3 Концептуально-информационная модель ЗИП-О

К началу периода эксплуатации одиночные комплекты ЗИП агрегатов содержат z_{ij}^{O*} ТЭЗ.

В случае отказа одного или нескольких элементов агрегата задача ЗИП-О – выдать требуемое количество запасных элементов q_{ij}^O , определяемое с учетом потребности агрегата r_{ij} и текущего уровня запасов z_{ij}^O , при этом увеличивается потребность в восполнении запаса соответствующего типа ТЭЗ u_{ij}^O из ЗИП-А.

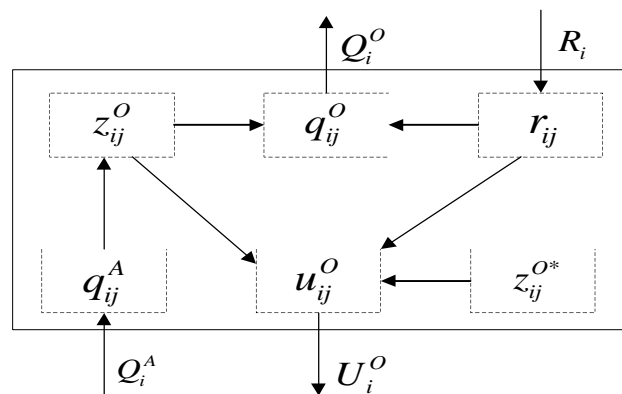


Рис. 5. Концептуально-информационная модель элемента

На основании информации о текущей потребности ЗИП-О в ТЭЗ формируется заявка на восполнение некомплекта U_i^o , которая передается в ЗИП вышестоящего уровня.

Восполнение запаса ТЭЗ в ЗИП-О i -ого агрегата (а при отсутствии – их поставка) осуществляется подвижным эшелонм СОЗЧ (ЗИП-А) после его прибытия в позицию.

На основании изложенного могут быть описаны зависимости времени простоя агрегата t_{np} и потребности в ТЭЗ ЗИП-О данного агрегата U_i^o от надежности показателей оборудования l и начального уровня запасов ТЭЗ Z_i^{o*} .

2.4 Концептуально-информационная модель ЗИП-А

При получении заявки на пополнение ЗИП-О i -го агрегата U_i^o информация о требуемом типе ТЭЗ и времени поступления заявки помещается в очередь F . При наличии, по крайней мере, одного элемента запрашиваемой j -ой номенклатуры в текущем запасе z_j^A , подвижный ЗИП-А двигается от текущей позиции $x = \overline{1, I}$ к позиции $y = i$, соответствующей агрегату, от которого поступила первая в очереди заявка, в течение известного времени $T^{x,y}$. При этом с каждым изменением фазы модельного времени уменьшается признак удаленности ЗИП-А от целевой позиции d .

При достижении целевого агрегата ЗИП-А удовлетворяет заявку, формируя сигнал Q^A (уменьшает текущую потребность ЗИП-О i -го агрегата). При этом уменьшается и запас элементов j -ой номенклатуры самого ЗИП-А, и формируется заявка на восполнение некомплекта U^A . После исполнения заявки из очереди выбирается следующая.

Кроме того, по условию задачи с периодичностью $s, s \in \mathbb{N}_0$ ЗИП-А выдвигается в позицию $y = I + 1$ для пополнения из ЗИП-Б. Решение о перемещении к ЗИП-Б принимается при условии, что с момента последнего пополнения t^B прошло s фаз модельного времени, а также в текущем запасе ЗИП-Б Z^B имеются ТЭЗ требуемого типа.

После пополнения ЗИП-А вновь убывает для удовлетворения заявок от агрегатов.

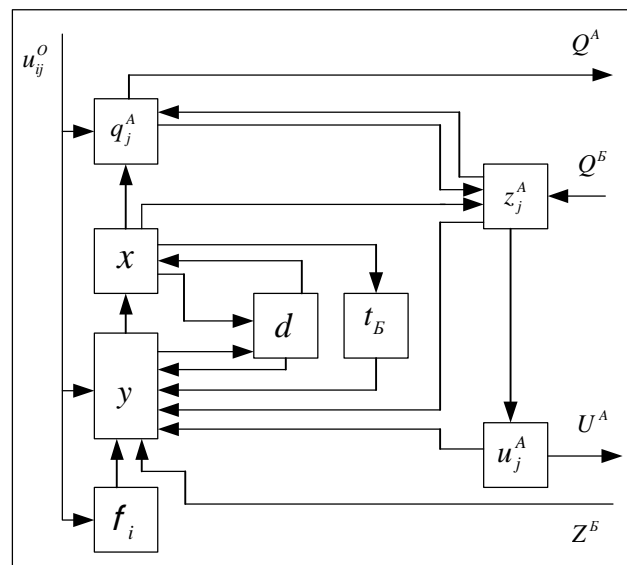


Рис. 6. Концептуально-информационная модель ЗИП-А

Таким образом могут быть описаны зависимости между заявками на восполнение запасов от ЗИП-О U_i^p , сигналами об удовлетворении заявок Q^A , запасами ТЭЗ в ЗИП-А Z^A топологией размещения комплекса на местности $T_{x,y}$ и периодичностью пополнения ЗИП-А s .

2.5 Концептуально-информационная модель ЗИП-Б

Групповой комплект ЗИП-Б размещается стационарно, на складе в месте постоянной дислокации. Запас ТЭЗ, находящихся на складе, восполняется из внешних источников с периодом, определенным установленной стратегией пополнения.

Информация о текущем запасе ТЭЗ в ЗИП-Б учитывается при принятии решения на совершение марша ЗИП-А в ППД.

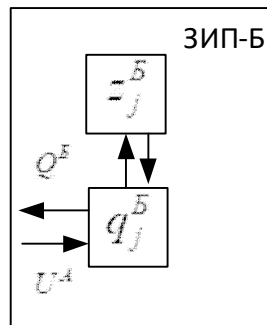


Рис. 7. Концептуально-информационная модель ЗИП-Б

При прибытии ЗИП-А в позицию $I+I$ по заявке U^A выполняется пополнение текущего запаса элементов из ЗИП-Б в пределах имеющегося остатка Z^B . При этом формируется сигнал выполнения заявки Q^B .

Выводы

Решение задачи обеспечения запасными частями мобильных СТК является актуальным в существующих условиях развития технической компоненты вооруженной борьбы.

Недостатки существующих подходов определяют необходимость построения нового комплекса моделей, позволяющих изучать объект исследований.

Анализ полученного комплекса моделей и вербального описания их взаимодействия позволяет подтвердить наличие сложных нелинейных зависимостей, оказывающих существенное влияние на значения целевого показателя.

Полученные результаты, в свою очередь позволяют приступить к формальному описанию объекта и построению соответствующих аналитико-имитационных моделей на основе построенных концептуально-информационных моделей.

Литература

1. ГОСТ 25.507-2015 Надежность в технике (ССНТ). Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов.
2. В.В. Чуркин Оценка и оптимизация комплекта ЗИП с помощью метода статистического моделирования // Научно-технические ведомости СПбГУ. 2015. 2'(217)-3'(222). С. 79-92.
3. Брежнев Д.Ю., Домира 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.

4. **Кокарев А.С., Марченко М.А., Пачин А.В.** Разработка комплексной программы повышения ремонтпригодности сложных технических комплексов. // *Фундаментальные исследования*. 2016. №4-3. С.501-505.
5. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40205> (дата обращения: 10.10.2018).
6. **Дьяков А.Н., Жеребцов Е.А., Кокарев А.С., Решетников Д.В.** Алгоритмы оперативного обоснования оптимальных планов доставки комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей / *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. Вып. 658. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2017. 270 с. (с.130-138) ISSN 2218-5429.
7. **Дьяков А.Н., Решетников Д.В., Бояршинов С.Н.** Моделирование системы поддержания работоспособного состояния сложных технических систем // *Вооружение и экономика*. 2016. № 3 (36). М.: Региональная общественная организация «Академия проблем военной экономики и финансов». С. 35-43. eISSN: 2071-0151.
8. **Кузнецов А.Н.** Методологические основы анализа функционирования и развития системы эксплуатации космических средств. СПб.: Наука, 2002. 167 с..