

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЯ КОРАБЛЕЙ

В.И. Поленин, И.В. Бондаренко, А.А. Бассауэр (Санкт-Петербург)

Известно, что наиболее сложными факторами при исследовании систем военного назначения являются их структурная функциональная сложность, а также случайный (и иногда неопределенный) характер функционирования.

Значительное число взаимоувязанных факторов, в том числе качественно-количественных, переводит задачу исследования таких систем в разряд задач большой размерности и чрезвычайной сложности.

К таким системам в полной мере относятся корабельные радиоэлектронные системы, представляющие собой совокупность образцов радиоэлектронного вооружения, технических средств и отдельных элементов, предназначенных для выполнения определённой задачи кораблем (навигация, жизнеобеспечение, разведка, применение оружия и т.д.).

Задача прогнозирования, оценки и повышения эффективности функционирования радиоэлектронной системы корабля определяется следующим особенностями:

– во-первых, функционирование самой системы представляет собой процесс взаимодействия нескольких сотен (а иногда тысяч) отдельных компонентов (блоков, модулей, элементов);

– во-вторых, функционирование системы осуществляется во взаимосвязи с множеством других систем корабля, и зачастую эти системы определяют работоспособность друг друга;

– в-третьих, функционирование системы вооружения обусловлено функционированием вышестоящей системы – корабля или группы кораблей (нахождением в состоянии линейности, цикличностью использования, выполнением кораблями совместных задач);

– в четвертых, исследование систем вооружения должно охватывать значительную часть жизненного цикла корабля (25 лет и более).

Таким образом, задача моделирования радиоэлектронной системы корабля состоит, с одной стороны, в корректном учете индивидуальных особенностей множества компонентов, а с другой – в оценке группового эффекта их длительного функционирования.

Таким образом, в целом система характеризуется такими показателями размерности и структурной сложности, что её изучение и, тем более, формирование оптимизирующего управления с применением аналитических методов являются совершенно недоступными.

Одним из наиболее современных направлений в методологии исследования больших систем является многоподходное имитационное моделирование, которое в отличие от аналитического, обеспечивает более корректный учет структурной и функциональной сложности исследуемой системы. Благодаря возможностям объектно-ориентированного подхода, реализуемого в современных средствах имитационного моделирования, удастся избежать вынужденного компромисса между простотой и детализацией описания моделируемой системы и, таким образом, учесть важные индивидуальные особенности отдельных её элементов, формирующие поведение системы в целом.

Предлагаемая имитационная модель предназначена для решения задач мониторинга функционирования корабельных радиоэлектронных систем в целях выбора наилучшей стратегии управления запасами ЗИП, обеспечивающей минимизацию эксплуатационных расходов и риска выхода кораблей из состояния линейности (способности выполнять целевые задачи).

Входными факторами модели приняты: количество кораблей, количество и характеристики функционирующих на кораблях систем вооружения, количество и характеристики входящих в состав систем электронных компонентов, а также совокупность правил, характеризующих ту или иную модель управления запасами. Под моделью управления запасами понимается совокупность подходов по определению объемов, способов и сроков поставок ЗИП, характеризующихся эффективностью функционирования системы при некоторых затратах.

В качестве показателей эффективности приняты начальная стоимость объема поставленного ЗИП, затраты на ремонт/поставку комплектующих, коэффициент технической готовности компонентов и систем вооружения и коэффициент оперативной готовности систем вооружения, кораблей и групп кораблей в целом [3].

Коэффициент технической готовности ($K_{ТГ}$) рассчитывается как отношение количества работоспособных в текущий момент времени t систем вооружений корабля n_{pa} к общему их количеству N :

$$K_{ТГ}(t) = \frac{n_{pa}(t)}{N}. \quad (1)$$

Вычисление коэффициента технической готовности реализовано для каждой системы вооружения и каждого корабля.

Коэффициент оперативной готовности ($K_{ОР}$), имеющий тот же смысл, но относящийся к кораблю или группе кораблей в целом, рассчитывается за выбранный период как отношение времени безотказной работы всех систем, то есть боеспособности корабля (группы кораблей), к общему времени выполнения кораблем (группой кораблей) целевых задач:

$$K_{ОР}(t) = \frac{T_{Боесп}(t)}{T_{Служь}}. \quad (2)$$

Вычисление коэффициента оперативной готовности реализовано для каждого корабля и группы кораблей.

Модель выполнена в среде моделирования AnyLogic [1, 2], являющейся программным продуктом, поддерживающим все методологии имитационного моделирования, и реализующим концепцию объектно-ориентированного программирования.

Реализуя основные принципы объектно-ориентированного подхода, в среде моделирования AnyLogic разработаны четыре базовых класса, составляющих базу моделей – своего рода шаблонов, способных описать индивидуальные свойства элементов исследуемой системы посредством параметрической настройки.

Модель представляет собой иерархию популяций агентов четырех базовых классов, взаимодействующих на четырех уровнях (рисунок 1).

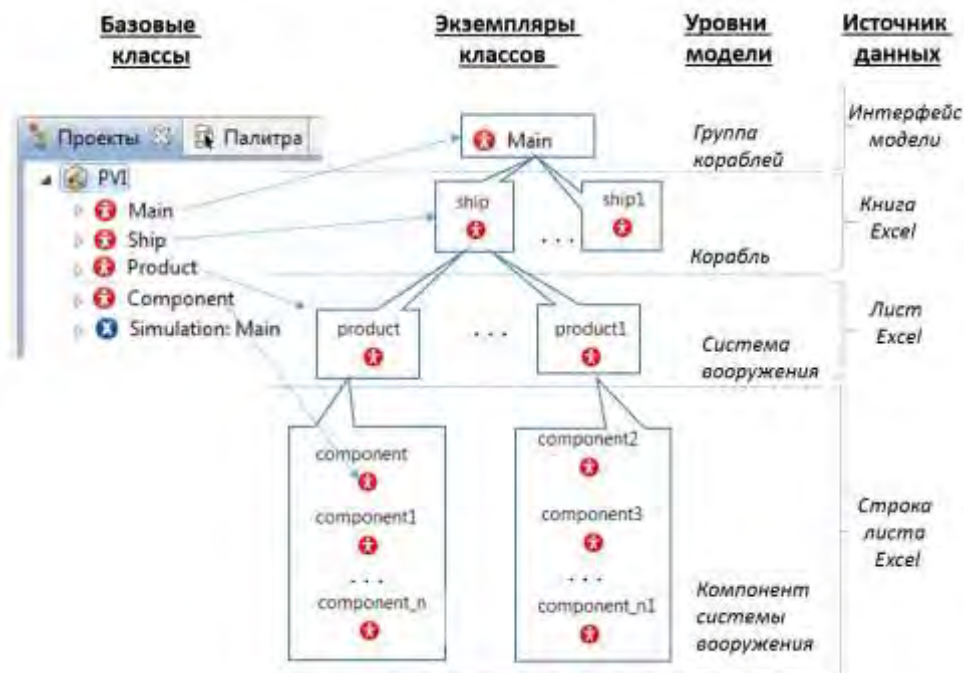


Рис.1 – Структура имитационной модели

Класс *Component* (нижний уровень) моделирует функционирование компонентов радиоэлектронной системы (отдельные блоки, модули, устройства) и является пределом членения рассматриваемой системы.

Класс *Product* описывает поведение систем вооружения, содержащих конкретный набор компонентов таким образом, что класс *Component* является вложенным (инкапсулированным) по отношению к классу *Product*.

Класс *Ship* моделирует рассматриваемую систему на уровне корабля, эксплуатирующего одну или несколько систем вооружения, то есть класс *Product* является вложенным по отношению к классу *Ship*.

Класс *Main* является так называемым агентом верхнего уровня и характеризует систему на уровне группы кораблей таким образом, что класс *Ship* является вложенным классом для класса *Main*.

Формирование структуры модели осуществляется перед запуском эксперимента путем создания на каждом из уровней модели популяций экземпляров базовых классов в количестве и с характеристиками, соответствующими исходным данным.

Построение модели осуществляется по принципу «сверху – вниз», то есть сначала формируется агент верхнего уровня *Main*, затем внутри класса *Main* создается популяция агентов класса *Ship*, далее в каждом из агентов *Ship* создаются популяции агентов класса *Product*, в каждом из которых создаются популяции агентов *Component*.

Состав группы кораблей (размер популяции экземпляров класса *Ship*) задается через интерфейс пользователя в верхней части вкладки «Исходные данные/результаты» (рисунок 2).

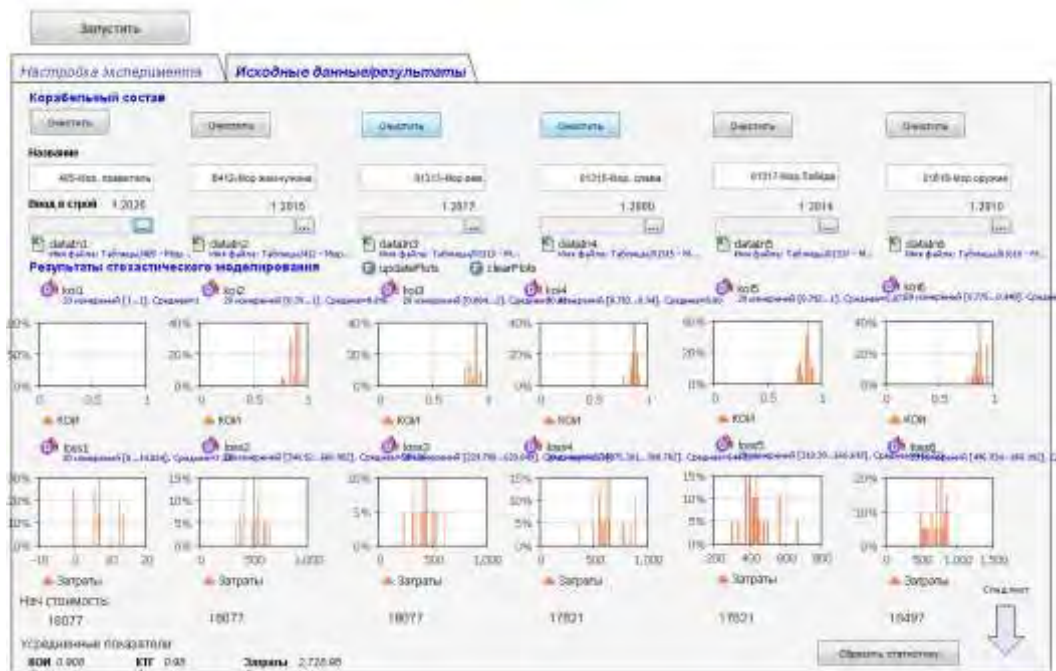


Рис.2 – Интерфейс пользователя имитационной модели

В текстовые поля вписываются названия кораблей, затем элементом «Выбор файла» (ниже текстового поля) устанавливается связь с соответствующими книгами MS Excel, на основе которых моделью создаются агенты остальных базовых классов и задаются их эксплуатационные характеристики (рисунок 3).

№	Наименование	Объем	Кол-во в составе	Кол-во в ЗПП	Кол-во в ЗПП	Кол-во в ЗПП (с)	Назначение	Реализация	Срок службы	Стоимость	Сложность	Средняя стоимость	Средняя стоимость	Прочность	Средняя стоимость	Назначение	Техническое описание
1	Компонент 1	00.000.001	3	1	2	1	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Работы на территории	12	11,74	5,22	12	1300	3	Модуль	Модуль	1
2	Компонент 2	00.000.002	2	0	0	0	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Работы на территории	2	40,06	17,80	12	200	4	Другое	Другое	2
3	Компонент 3	00.000.003	2	0	0	1	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Работы в РФ	7	3,90	3,45	12	350	4	Другое	Другое	1
4	Компонент 4	00.000.004	2	1	2	2	Получка РФ	Получка нового изделия	23	2,54	5,85	12	250	2	Модуль	Модуль	1
5	Компонент 5	00.000.005	2	1	2	2	Получка РФ	Получка нового изделия	1	5,67	5,63	12	100	2	Модуль	Модуль	1
6	Компонент 6	00.000.006	3	2	4	4	Получка РФ	Получка нового изделия	6	2,53	5,85	12	100	2	Модуль	Модуль	2
7	Компонент 7	00.000.007	3	2	4	4	Получка РФ	Получка нового изделия	2	5,33	5,85	12	150	2	Модуль	Модуль	2
8	Компонент 8	00.000.008	2	2	2	0	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Получка нового изделия	8	2,01	2,23	9	81	4	Другое	Другое	1
9	Компонент 9	00.000.009	1	1	1	0	Получка РФ	Получка нового изделия	10	2,13	2,37	9	81	4	Другое	Другое	1
10	Компонент 10	00.000.010	2	2	0	0	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Получка нового изделия	2	13,57	12,07	9	340	4	Другое	Другое	1
11	Компонент 11	00.000.011	2	1	2	3	Получка РФ	Получка нового изделия	5	3,01	3,34	12	100	4	Другое	Другое	2
12	Компонент 12	00.000.012	2	1	2	3	Получка РФ	Получка нового изделия	1	21,65	81,80	12	100	4	Другое	Другое	2
13	Компонент 13	00.000.013	12	2	2	7	АО «Космич» «НПО «Мотор»	Работы на территории	7	14,87	8,61	12	232	2	Модуль	Модуль	3

Рис.3 – Электронная таблица Excel с характеристиками компонентов радиоэлектронных систем

Перечень компонентов системы вооружения может включать несколько сотен компонентов. В свою очередь, в составе корабля может быть несколько десятков систем. В таких условиях связь с таблицами Excel позволяет реализовать учет множества количественно-качественных характеристик компонентов систем вооружения и, таким образом, обеспечить высокий уровень детализации модели.

Связанная электронная книга состоит из листов, на основе каждого из которых формируется модель конкретной радиоэлектронной системы в составе корабля (экземпляр класса *Product*).

Каждая строка листа книги служит основой для создания модели компонента радиоэлектронной системы (экземпляра класса *Component*), с учетом значений параметров, внесенных в соответствующие столбцы таблицы: наименования, обозначения, количества ЗИП, эксплуатационных, экономических и надежности характеристик).

Информация из электронных таблиц учитывает множество индивидуальных особенностей каждого компонента и формирует основу его поведенческой модели.

На рисунке 4 приведена диаграмма экземпляра класса *Component*, моделирующего функционирование системы на низшем уровне иерархии – уровне компонентов радиоэлектронных систем.

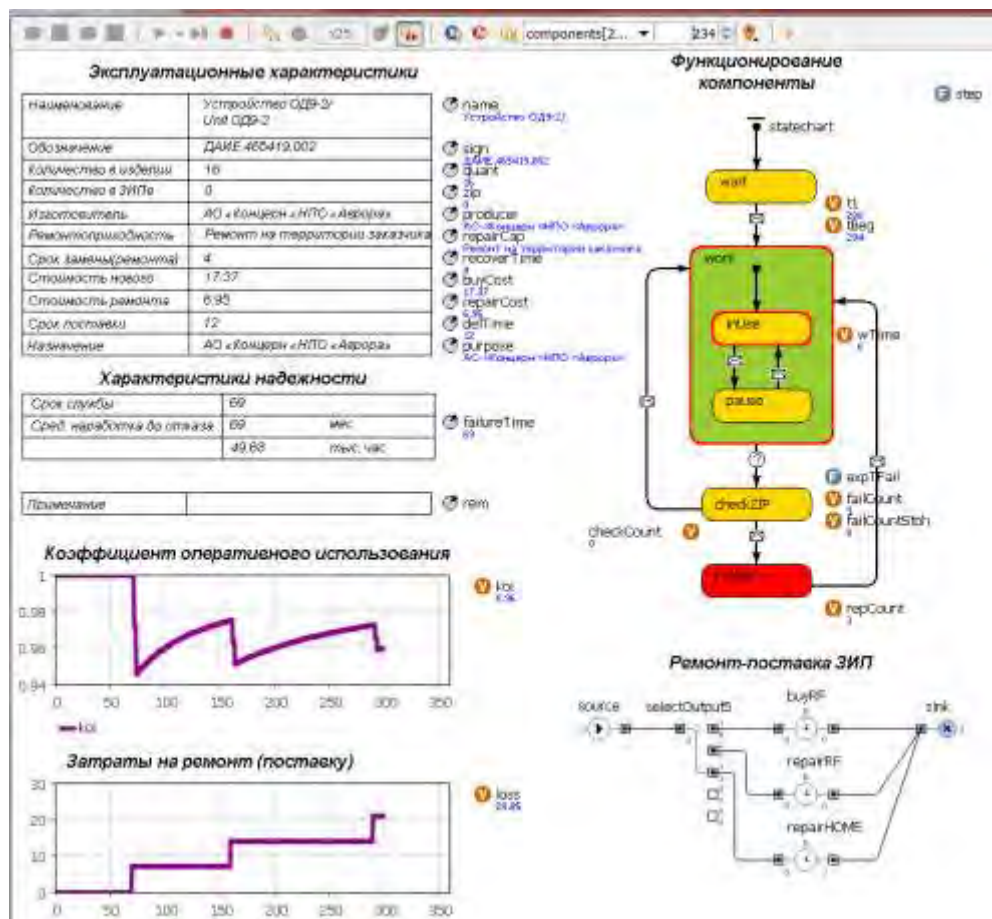


Рис.4 – Диаграмма экземпляра класса *Component*

Диаграмма экземпляра класса содержит:

– таблицу, отражающую содержание граф соответствующей строки листа электронной таблицы;

– диаграмму состояний, задающую поведенческую модель электронного компонента: нормальное функционирование, простой, отказ, восстановление работоспособности и т. д;

– потоковую диаграмму, выполненную на основе дискретно-событийного подхода и моделирующую временной задержкой процесс восстановления работоспособности (поставку) компонента;

– два графика, отражающих изменение значений принятых показателей эффективности во времени.

В основу функционирования разработанной имитационной модели положен подход, при котором работоспособность каждого вышестоящего по иерархии элемента модели обеспечивается нахождением в работоспособном состоянии всех нижестоящих по иерархии элементов. То есть, при отказе радиоэлектронного компонента и отсутствии при этом ЗИП происходит отказ системы вооружения и потеря работоспособности кораблем в целом. В связи с этим структура остальных базовых классов в первую очередь обеспечивает управляющую функцию, реализующую данный подход, а также функцию расчета и отображения результатов моделирования на каждом уровне иерархии системы, от отдельного компонента до группы кораблей (рисунок 5).

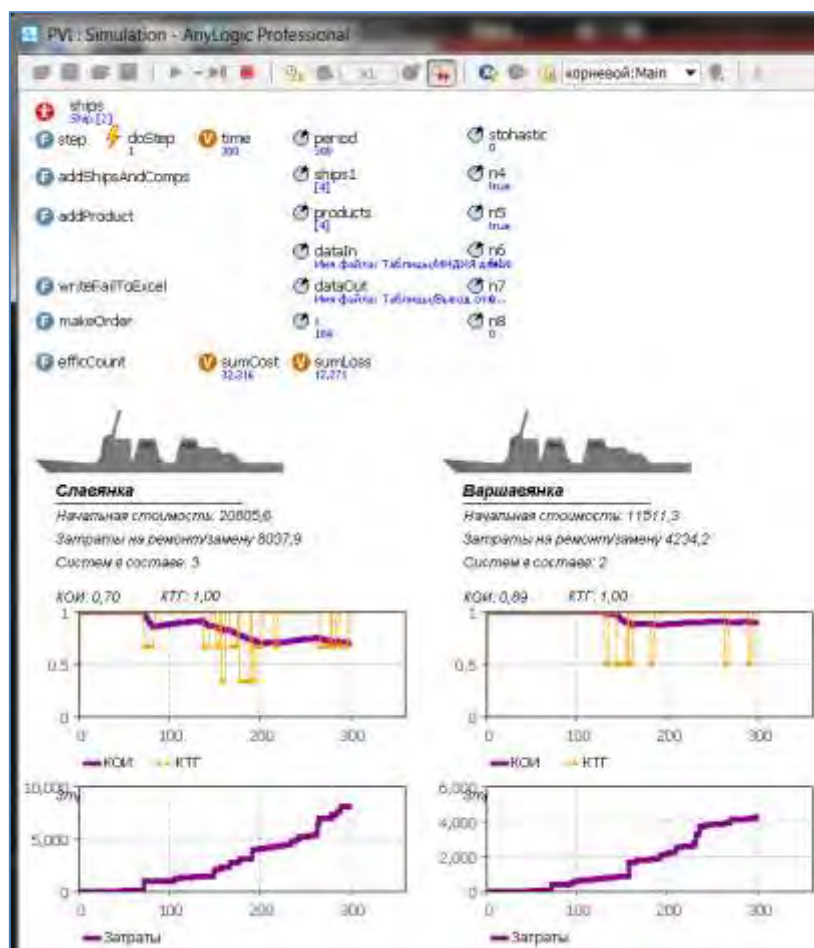


Рис.5 – Диаграмма экземпляра класса *Component*

Кроме того, модель поддерживает два типа экспериментов. Выбор эксперимента осуществляется переключателем «Тип эксперимента» на вкладке «Настройка эксперимента» интерфейса пользователя модели (рисунок 6).

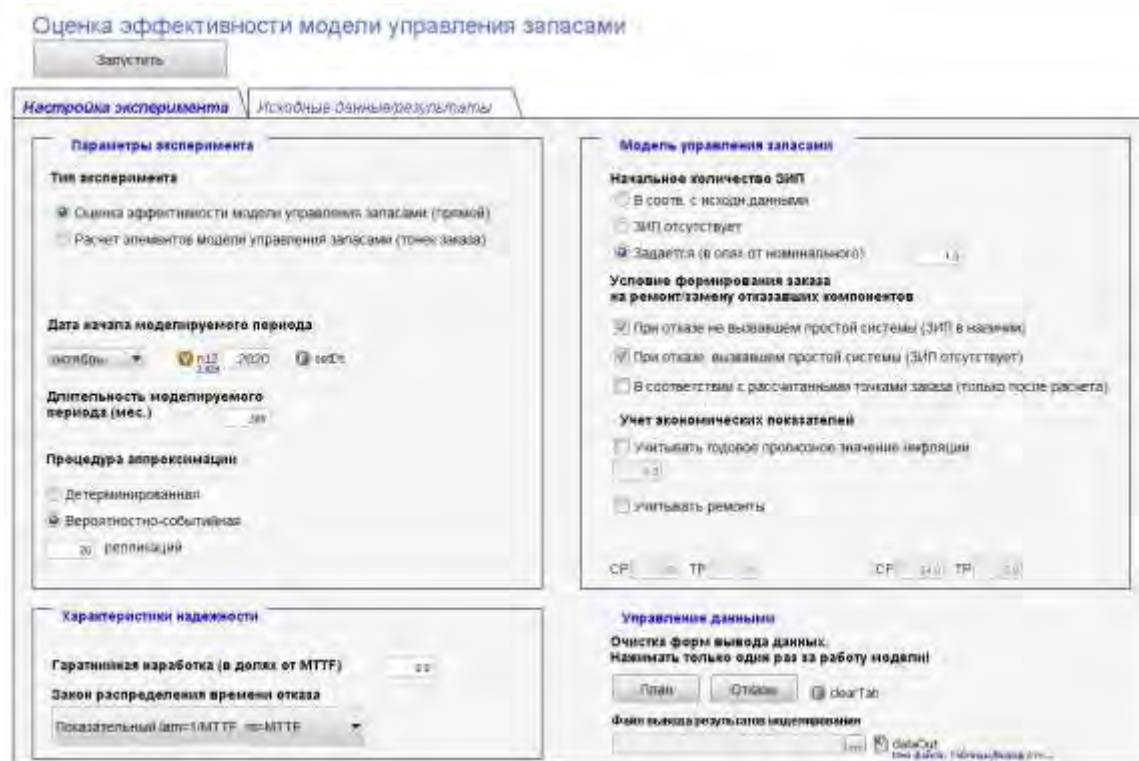


Рис.6 – Интерфейс настройки модели

При нахождении переключателя в положении «Оценка эффективности модели управления запасами (прямой)» выполняется прямой эксперимент, то есть оценивается качество системы, обладающей набором параметров, выражающим принятую модель управления запасами. Результатами прямого эксперимента являются диаграммы и графики, иллюстрирующие изменение во времени принятых показателей эффективности для каждого элемента и уровня иерархии модели. Кроме того, по результатам эксперимента формируется, в виде электронной таблицы Excel, список отказавших компонентов с отражением полной информации о таком компоненте (название, обозначение, принадлежность к системе, кораблю, времени отказа).

Как правило, показатели технической готовности системы со временем снижаются, и действующая система поставок и ремонтов перестает справляться с нарастающим потоком отказов, что характеризует несовершенство действующей модели управления запасами и обуславливает необходимость её корректировки за счет прогнозирования отказов.

Другими словами, необходимо определить параметры модели управления запасами, обеспечивающие требуемое качество системы – безотказную работу на протяжении всего моделируемого периода, то есть решить обратную задачу – задачу синтеза системы заданного качества. Решение обратной задачи осуществляется при нахождении переключателя настройки эксперимента в положении «Расчет элементов модели управления запасами (точек заказа)». Результатами эксперимента по решению обратной задачи являются значения прогнозных точек заказа по времени, упреждающих моменты отказов для каждого компонента. Использование этих прогнозных точек для своевременной, упреждающей поставки ЗИП в отношении компонентов, по которым прогнозируется отказ, соответствует совершенствованию

модели принятия решений по управлению запасами. Таким образом, модель позволяет не только оценить, но и обеспечить требуемый уровень готовности кораблей на протяжении всего периода эксплуатации при минимальных эксплуатационных расходах.

Следует подчеркнуть, что решаемая задача относится к классу задач большой размерности и высокой структурной сложности. Вместе с тем, принятая степень детализации позволяет рассматривать разработанную имитационную модель как агрегированный цифровой двойник радиоэлектронных систем кораблей, позволяющий проводить исследование такой системы на протяжении всего её жизненного цикла. Кроме того архитектура модели не требует от оператора навыков работы в среде моделирования: построение модели осуществляется на основе параметрической настройки через интерфейс пользователя и связанные электронные таблицы.

В заключение следует выделить ряд основных преимуществ принятой методологии моделирования:

1. Имитационные модели позволяют анализировать системы и находить решения в тех случаях, когда такие методы, как аналитические вычисления и все виды программирования (линейное, нелинейное, марковское и т.д.), с решением задачи не справляются.

2. Разработка имитационной модели содержательно гораздо проще, чем аналитической, поскольку процесс создания модели является модульным и нарастающим постепенно по относительно независимым и структурно простым ветвям процесса.

3. Структура имитационной модели не абстрактно, а естественным образом отображает структуру моделируемой системы.

4. Имитационная модель позволяет отслеживать любые объекты и фазы работы системы, добавлять метрики и проводить статистический анализ.

5. Одним из главных преимуществ имитационного моделирования является возможность создавать анимацию и проигрывать модель системы во времени, наблюдая за ее поведением. Анимация является неоспоримым преимуществом при отладке (поиске ошибок), демонстрации и верификации модели.

Таким образом, имеются все основания утверждать, что принятая методология, основанная на применении передовых технологий многоподходного визуализированного имитационного моделирования, способна обеспечить:

– преодоление проблемы большой размерности и высокой структурной сложности моделируемой системы;

– выполнение функции поддержки принятия решений по минимизации эксплуатационных расходов и риска выхода кораблей из состояния линейности (способности выполнять целевые задачи).

Литература

1. **Киселева М.В.** Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М.В. Киселёва. – Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2009. 88 с.
2. **Борщев А.** Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // ООО «Экс Джей Текнолоджис». СПб. Exponenta PRO, №3-4, 2004, С.38-47.
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Национальный стандарт РФ. – Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. N 1390-ст.