

А.А. Пьянков, кандидат технических наук, доцент

### Имитационная модель системы технического обеспечения воинского формирования с произвольными потоками требований

*Рассмотрен метод имитационного моделирования и его применение к описанию процесса технического обеспечения воинского формирования. Показаны преимущества имитационных моделей по сравнению с аналитическими. В рамках исследований разработана имитационная модель системы технического обеспечения воинского формирования с произвольными потоками требований с использованием среды имитационного моделирования Arena. Приведены результаты моделирования в различных условиях, на основе которых рассчитаны показатели, характеризующие эффективность рассматриваемой системы технического обеспечения воинского формирования.*

В настоящее время в Вооруженных Силах Российской Федерации (ВС РФ) функционирует новая система материально-технического обеспечения (МТО) войск, при которой мероприятия технического обеспечения реализуются как силами войсковых ремонтных подразделений, так и силами центров ОАО «Оборонсервис», а также организациями промышленности. Восстановление ВВТ в объеме текущего ремонта осуществляется непосредственно в войсках, а средний и капитальный ремонт ВВТ – в подразделениях и центрах ОАО «Оборонсервис» и на предприятиях промышленности [1].

Существующая система технического обеспечения ВС РФ создана в 2010 году и еще не прошла испытание временем. Следует полагать, что она в скором времени будет реформирована. Свидетельством этому является заседание Коллегии Министерства обороны РФ 19 августа 2014 г., на котором было принято решение о реорганизации ОАО «Оборонсервис» в связи с низкой эффективностью работы этой организации [2]. При этом все ремонтные предприятия планируется до середины 2015 года передать в оборонно-промышленный комплекс страны.

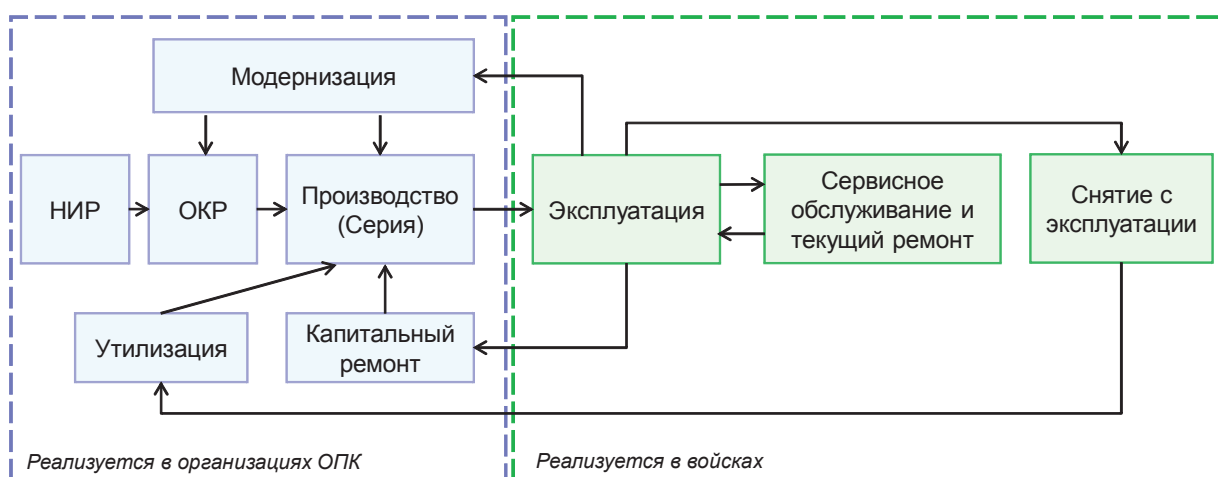


Рисунок 1 – Жизненный цикл образца ВВТ

Вместе с тем следует отметить, что планирование и управление техническим обеспечением ВС РФ во многом зависит от планирова-

ния мероприятий по разработке и производству ВВТ. Поэтому при решении задач управления техническим обеспечением (ТО)

необходимо рассматривать полный жизненный цикл образца ВВТ, включая мероприятия по созданию, производству, модернизации и капитальному ремонту образцов ВВСТ (рисунок 1).

В работах [3-6] рассмотрены аналитические модели оптимального распределения ресурсов при планировании технического обеспечения в Вооруженных Силах Российской Федерации, в основе которых лежит математический аппарат массового обслуживания и уравнений динамики средних. Суть подхода состоит в том, что исходя из возможных состояний образца ВВТ и интенсивностей переходов из одного состояния в другое, строится граф состояний, который является основой для построения системы уравнений для средних численностей ВВТ определенного типа, находящихся в различных состояниях.

Учитывая относительную простоту использования такого подхода, аналитические модели позволяют оперативно получать оценочные значения численности ВВТ, находящегося в каждом из состояний, а отсюда значения основных показателей, характеризующих эффективность системы технического обеспечения: оснащенность, боеготовность, исправность ВВТ, боевой потенциал войск и затрат, необходимых для реализации мероприятий ТО.

Вместе с тем, одним из условий использования математического аппарата массового обслуживания является наличие пуассоновских потоков требований. То есть потоки, циркулирующие в системе, должны обладать свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последствий [7]. В связи с этим серьезным ограничением использования аналитических методов моделирования процессов технического обеспечения ВС РФ является наличие произвольных (не пуассоновских) потоков требований, например: неравномерный выход из строя ВВТ, расписания работы ремонтных организаций с перерывами, прерывание обслуживания ввиду отсутствия ремонтного фонда в течение определенного времени и другие. Еще одним немаловажным требованием использования методов массо-

вого обслуживания является наличие в системе большого количества однородных элементов (например, образцов ВВТ одного типа), что ограничивает использование этих методов при анализе воинских формирований, оснащенных различными типами ВВТ. Кроме того, при усложнении модели (увеличении количества участников процесса технического обеспечения, учета большего количества факторов) появляется многоканальность и асинхронность потоков заявок. В таких задачах применение аналитических методов моделирования становится чрезвычайно сложным или невозможным. В этом случае целесообразно использовать методы имитационного моделирования [8].

Одним из наиболее популярных инструментов имитационного моделирования является среда имитационного моделирования (СИМ) Arena, предоставляющая пользователю удобный графический интерфейс с набором шаблонов моделирующих конструкций [9]. Для создания модели в пакете Arena моделирующие конструкции сначала «перетаскивают» в окно модели, а затем соединяют, чтобы обозначить движение объектов в моделируемой системе. Затем моделирующие конструкции детализируются с помощью диалоговых окон или встроенных таблиц. В иерархии модели может быть неограниченное число уровней. Число потоков случайных чисел в пакете Arena не ограничено. Более того, пользователь имеет доступ к стандартным теоретическим распределениям вероятностей, а также к эмпирическим распределениям. Кроме того СИМ Arena обладает всеми необходимыми качествами для моделирования систем военного назначения, а именно:

- независимостью от операционной системы;
- возможностью использования нескольких подходов к моделированию или их комбинации для обеспечения максимальной гибкости моделирования;

- возможностью моделирования иерархических структур для обеспечения имитации сложных систем;

развитыми стандартными библиотеками, а также возможностью создавать пользовательские библиотеки и шаблоны;

развитыми средствами документирования, анализа и оптимизации.

На рисунке 2 показана схема имитационной модели технического обеспечения воинского формирования, реализованная в СИМ Arena. В модели реализованы следующие процессы:

- эксплуатация ВВТ в воинском формировании;
- диагностика ВВТ;
- утилизация ВВТ на предприятии ОПК;
- модернизация ВВТ на предприятии ОПК;

капитальный ремонт на предприятии ОПК; ремонт в воинском формировании; поставка нового образца ВВТ.

Эксплуатация ВВТ в воинском формировании реализована модулем Process 6, который имитирует соответствующий процесс в течение межремонтного срока эксплуатации конкретного образца ВВТ. Данная характеристика задана случайной величиной с бета-распределением. В течение данного срока образец ВВТ считается исправным, а по его окончании – неисправным и автоматически попадает в субмодель (Process 7) процесса диагностики ВВТ (рисунок 3).

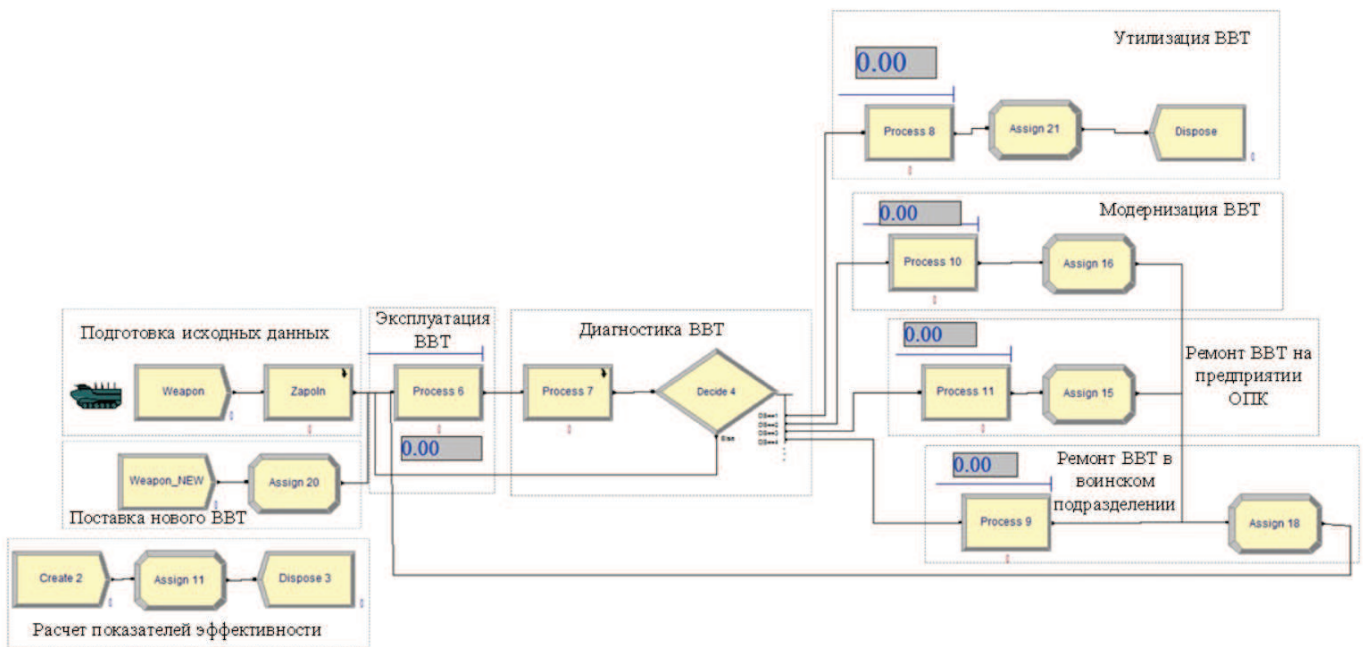


Рисунок 2 – Модель системы технического обеспечения воинского формирования, реализованная в системе Arena

Диагностика ВВТ смоделирована в виде анализа различных условий, в зависимости от которых осуществляется множественный выбор диагноза ВВТ. Например, если возраст образца ВВТ превысил нормативный срок службы, то он отправляется или в утилизацию, или, при наличии необходимого потенциала модернизации, соответствующего контракта и свободных мощностей промышленности, на модернизацию, а также в ремонт на предприятие промышленности или в воинское фор-

мирование. Утилизация ВВТ реализована модулями Process 8, Assign 21 и модулем Dispose, в котором образец ВВТ покидает модель.

Модернизация ВВТ на предприятии ОПК реализована модулями Process 10 и Assign 16. Процесс модернизации ВВТ осуществляется за определенный интервал времени, который задается случайной величиной с бета-распределением. В результате модернизации образца ВВТ увеличивается его боевой потенциал, и он возвращается в войска.

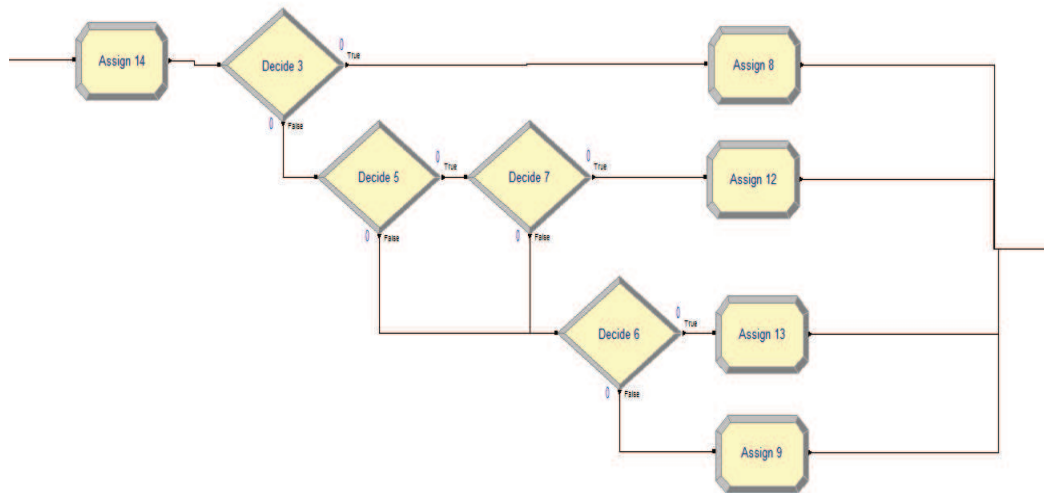


Рисунок 3 – Подмодель диагностики ВВТ

Капитальный ремонт на предприятии ОПК реализован модулями Process 11 и Assign 15, а ремонт в воинском формировании – модулями Process 9 и Assign 18. В результате ремонта образца ВВТ восстанавливается его ресурс, и образец ВВТ возвращается в эксплуатацию. При этом следует отметить, что интенсивность восстановления представляют собой разрывную периодическую импульсную функцию, обусловленную наличием перерывов в работе системы обслуживания и ремонта (8 или 16-часовой рабочий день, выходные дни).

Поставка новых образцов ВВТ реализована модулями Weapon\_NEW и Assign 21. Данные модули обеспечивают генерацию сущностей – новых образцов ВВТ, обладающих лучшими характеристиками и боевым потенциалом по сравнению с существующими в модели образцами ВВТ. При этом поставка нового образца ВВТ может осуществляться по расписанию (ежеквартально, ежегодно) определенными партиями или в соответствии с каким-либо условием, например: если боевой потенциал воинского формирования ниже требуемого уровня.

Нахождение образца в каждой из стадий жизненного цикла требует финансовых затрат, которые необходимо учесть в модели: затраты на содержание ВВТ, затраты на вы-

полнение войскового ремонта, ремонта в промышленности, утилизацию и модернизацию ВВТ, а также затраты на закупку новых образцов ВВТ.

Кроме того, в модели присутствуют служебные модули. Группа модулей подготовки исходных данных (Weapon и Zapoln) предназначена для установления начальной численности образцов ВВТ, находящихся в различных состояниях и обладающих различными характеристиками (возраст, боевой потенциал). По сути, здесь моделируется текущее техническое состояние ВВТ на начало рассматриваемого периода.

Другая группа модулей (Create 2, Assign 11 и Dispose 3) предназначена для проведения текущих расчетов основных показателей, характеризующих эффективность системы технического обеспечения воинского формирования: численность ВВТ, оснащенность и боевой потенциал воинского формирования, исправность ВВТ, затрат, необходимых на реализацию мероприятий технического обеспечения [3].

Оснащенность воинского формирования образцами ВВТ характеризуется коэффициентом оснащенности:

$$K_o(t) = \frac{n_0(t) + n_1(t)}{N^0(t)}, \quad (1)$$

а исправность – коэффициентом исправности

$$K_u(t) = \frac{n_0(t)}{n_0(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t)}, \quad (2)$$

где  $N^0(t)$  – штатная численность образцов ВВТ;  $n_0(t)$ ,  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ ,  $n_3(t)$ ,  $n_4(t)$  – численность образцов ВВТ, находящихся в эксплуатации в воинском формировании, на ремонте в воинском формировании, на ремонте на предприятии ОПК, на модернизации и на утилизации, соответственно.

Боевой потенциал ВВТ группировки зависит от боевых (функциональных) потенциалов образцов ВВТ и их относительной численности в составе группировки. В данном случае в

$$K_{БП}(t) = K_{БП}^{(0)} \frac{[N_\phi(t) - \bar{n}_m(t) - \bar{n}_n(t)]}{N_\phi(t)} + K_{БП}^{(1)} \frac{\bar{n}_m}{N_\phi(t)} + K_{БП}^{(2)} \frac{\bar{n}_n}{N_\phi(t)}, \quad (3)$$

где  $N_\phi(t) = n_0(t) + n_1(t)$  – текущая численность ВВТ;

$\bar{n}_m(t)$ ,  $\bar{n}_n(t)$  – численность модернизированных и новых образцов ВВТ к текущему моменту времени соответственно.

Затраты на мероприятия технического обеспечения включают текущие затраты, связанные с содержанием ВВТ в войсках и затраты, связанные с выполнением полного объема закупки, ремонта, модернизации и утилизации ВВТ.

$$C(t) = C_0(t)[n_0(t) + n_1(t)] + d(t)[c_1 n_1(t) + c_2 n_2(t) + c_3 n_3(t) + c_4 n_4(t) + c_6 \bar{\mu}_0(t)],$$

где  $C_0(t)$  – затраты на содержание ВВТ;

$c_1, c_2, c_3, c_4$  – затраты на выполнение войскового ремонта, ремонта в промышленности, модернизацию и утилизацию ВВТ на начало рассматриваемого периода, соответственно;

$c_6$  – стоимость закупки ВВТ;

$\bar{\mu}_0(0)$  – количество нового ВВТ.

Эти удельные затраты также могут зависеть от времени в силу инфляции и роста цен на ВВТ и услуги. Для учета этой зависимости используем коэффициент дефляции  $d(t) = (1+E)^t$ , где  $E$  – средний уровень инфляции, учитываемый при планировании технического обеспечения ВВТ. Принятые выше до-

качестве показателя боевого потенциала удобно использовать его относительную форму  $K_{БП} = \frac{БП}{БП_s}$ , где  $БП_s$  – боевой потенциал ВВТ, принятый за эталон [10].

Обозначим  $K_{БП}^{(0)}$  коэффициент боевого потенциала штатного образца ВВТ,  $K_{БП}^{(1)}$  – коэффициент боевого потенциала модернизированного образца ВВТ,  $K_{БП}^{(2)}$  – коэффициент боевого потенциала поставленного нового образца ВВТ. Тогда среднее значение коэффициента боевого потенциала ВВТ группировки составит:

Примем допущение о том, что затраты на содержание одного образца ВВТ в режиме эксплуатации, в ожидании ремонта и на модернизацию одинаковы и линейно зависят от времени его нахождения в данном режиме. Затраты, связанные с мероприятиями ТО, будем полагать также линейными, но относительно численности ВВТ. В этом случае общая стоимость затрат на мероприятия технического обеспечения будет определяться как:

пушения в основном соответствуют практике программного планирования развития ВВТ.

В рассматриваемой модели процессы утилизации, модернизации и ремонта описаны несколькими простыми блоками, что во многом упрощает модель. Вместе с тем программное средство Arena позволяет использовать подмодели, в которых можно более подробно смоделировать соответствующие процессы на более низких уровнях. Например, при создании подмодели предприятия ОПК или сервисного центра, осуществляющего ремонт ВВТ, можно учесть множество специфических параметров: количество занятого персонала, расписание работы каждого из них, количество производственных (ремонт-

ных) линий, наличие комплектующих, запасных частей и расходных материалов и т. д.

На рисунке 4 показано графическое отображение результатов моделирования процес-

сов технического обеспечения воинского формирования на интервале времени – 10 лет. При этом шаг моделирования составил 1 день.

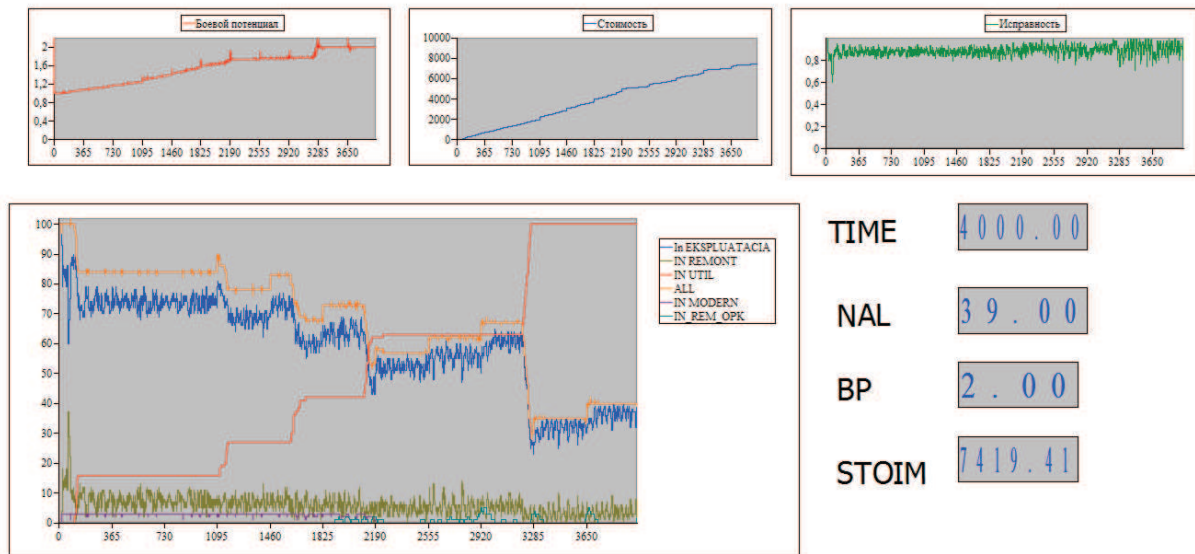


Рисунок 4 – Графическое отображение результатов моделирования

Рассмотрим результаты моделирования при следующих исходных данных (таблица 1).

На рисунке 5 показаны графики динамики изменения оснащенности, исправности парка ВВТ, боевого потенциала воинского формирования и затрат на ТО воинского формирования соответственно для трех различных вариантов, рассчитанные по формулам (1-3). В первом из них поставка новой техники осуществляется ежегодно с начала программного периода по 8 единиц, модернизация и ремонт осуществляются в полном объеме; во втором случае – с третьего года программного периода по 4 единицы ежегодно, мощности по модернизации ОПК снижены в 2 раза; в третьем случае – поставка нового ВВТ и модернизация не осуществляются, а возможности предприятия ОПК по ремонту ВВТ снижены на 15%.

Как видно из графиков, боевой потенциал первых двух вариантов значительно отличается от третьего варианта за счет закупки новых образцов ВВТ и проведения модернизации. При третьем варианте боевой потенциал практически остается неизменным.

Однако следует также отметить, что при длительном времени моделирования боевой потенциал, принятый за эталонный, может существенно вырасти. В этом случае согласно (3) боевой потенциал рассматриваемой группировки ВВТ будет падать.

В третьем варианте средняя исправность ВВТ меньше чем в первых двух, что обусловлено более медленным восстановлением образцов ВВТ в связи с сокращением возможностей ОПК по ремонту для данного варианта.

Таким образом, разработанная имитационная модель обеспечивает расчет в динамике планируемого периода необходимых показателей, характеризующих эффективности системы технического обеспечения войск. Кроме этого программное средство Arena по окончании проигрыша модели формирует отчет, содержащий статистическую информацию: количество обслуживаемого ВВТ, загруженность станций технического обслуживания (каждой из линий), максимальное, минимальное, максимальное и среднее время ожидания начала обслуживания, минимальное, максимальное и среднее время обслуживания и др.

Таблица 1 – Исходные данные примера

Параметр	Значение
Шаг моделирования	1 день
Временной интервал моделирования	4000 суток
Общая численность ВВТ	100
Срок службы образца ВВТ	3600 суток
Интервал времени между отказами ВВТ	[25; 75] суток
Межремонтный срок эксплуатации	1800 суток
Боевой потенциал существующего образца ВВТ	1
Боевой потенциал модернизированного образца ВВТ	1,6
Боевой потенциал нового образца ВВТ	2
Время восстановления ВВТ силами МТО формирования	[4; 8] суток
Количество ремонтных смен	8
Время ремонта одного образца ВВТ на предприятии ОПК	[25; 35] суток
Количество линий на предприятии ОПК	2
Время модернизации одного образца ВВТ на предприятии ОПК	[55; 65] суток
Стоимость содержания одного образца ВВТ в части	0,0027 усл. ед.
Стоимость текущего ремонта одного образца ВВТ в формировании	0,5 усл. ед.
Стоимость ремонта одного образца ВВТ на предприятии ОПК	8,6 усл. ед.
Стоимость модернизации одного образца ВВТ	28 усл. ед.
Стоимость утилизации одного образца ВВТ	5 усл. ед.
Стоимость одного нового образца ВВТ	39 усл. ед.

Адекватность разработанной имитационной модели подтверждается сходимостью результатов моделирования в программном средстве Arena и результатов, полученных при использовании аналитической модели в [3] при одних и тех же исходных данных. Это говорит о возможности использования методов имитационного моделирования в задачах планирования и управления как техническим обеспечением войск, так и развитием системы вооружения в целом.

Следует также отметить, что создание имитационных моделей, в отличие от аналитических, требует гораздо больше исходных

данных о предметной области, а также достаточный временной ресурс. В то же время использование аналитических методов моделирования целесообразно при получении экспресс-оценок эффективности той или иной системы в условиях дефицита времени на разработку ее модели или при отсутствии достаточного объема исходных данных. Но независимо от выбранного инструмента моделирования, важнейшими факторами разработки моделей являются правильно поставленная задача, корректность исходных данных и адекватность модели.

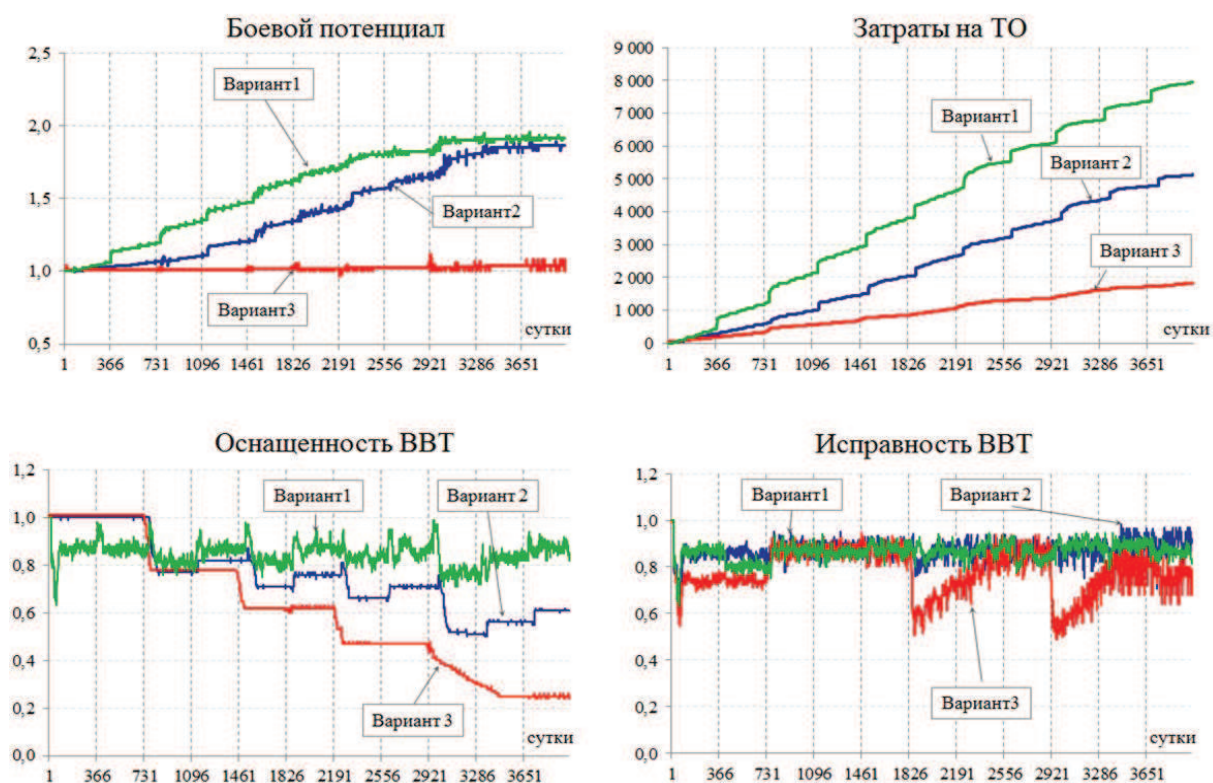


Рисунок 5 – Динамики изменения оснащённости, исправности парка ВВТ, боевого потенциала воинского формирования и затрат на ТО воинского формирования

#### Список использованных источников

1. Буравлев А.И. Марковская модель восстановления ВВТ в новой системе технического обслуживания и ремонта // Вооружение и экономика. – 2014. – № 1 (26).
2. Министерство обороны Российской Федерации [Офиц. Сайт]. URL: <http://www.mil.ru> (дата обращения 29.09.2014).
3. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Модель технического обеспечения войск // Вооружение и экономика. – 2010. – № 2 (10).
4. Пьянков А.А. Экономико-математическая модель системы ремонта вооружения и военной техники в современных условиях // Вооружение и экономика. – 2013. – № 4 (24).
5. Пьянков А.А. Математическая модель процесса восстановления вооружения и военной техники в ходе боевых действий тактического воинского формирования // Вооружение и экономика. – 2014. – № 2 (27).
6. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе / Под ред. В.М. Буренка. – М.: Граница, 2013. – 520 с.
7. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. Радио, 1971.
8. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. Классика CS. – 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
9. Еланцев Г.А. Моделирование системы ремонта вооружения и военной техники в программном средстве имитационного моделирования Arena // Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: Труды. – М.: ИПУ РАН, 2014. – 9616 с.
10. Брезгин В.С., Буравлев А.И. О методологии оценки боевых потенциалов вооружения и военной техники и воинских формирований // Военная Мысль. – 2010. – Вып. № 8. – С. 41-48.