

УДК 623

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕМОНТА ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ В ПРОГРАММНОМ СРЕДСТВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ARENA

Г.А. Еланцев

ФГБУ «46 Центральный научно-исследовательский институт» Минобороны России
Россия, 129327, Москва, Чукотский проезд, 10
E-mail: grifoni@mail.ru

Ключевые слова: имитационное моделирование, техническое обеспечение, сервисный центр, выездная ремонтная бригада, система массового обслуживания

Аннотация: В статье рассмотрена задача оптимального управления процессом ремонта неисправного ВВТ выездной ремонтной бригадой в месте дислокации воинской части или в территориально удаленном сервисном центре. При этом в качестве критериев оптимизации рассмотрены показатель исправности ВВТ и удельные затраты на ремонт ВВТ. Для описания процесса технического обеспечения войск использовано программное средство имитационного моделирования Arena. В статье приведены примеры, демонстрирующие работоспособность разработанной модели.

При планировании мероприятий ремонта и сервисного обслуживания вооружения и военной техники (ВВТ) необходимо решать задачи, связанные с оценкой их эффективности. В настоящее время ремонт и сервисное обслуживание ВВТ осуществляется в сервисных центрах предприятий-изготовителей ВВТ, подразделениях ОАО «Оборонсервис» и непосредственно в воинских частях выездными ремонтными бригадами от этих специализированных центров.

В работе [1] была рассмотрена постановка задачи оптимального управления процессом ремонта неисправного ВВТ с учетом территориальной удаленности сервисных центров от мест постоянной дислокации воинских частей.

По условиям задачи рассматривается воинская часть, на вооружении которой находится N единиц ВВТ одного типа, необходимых для решения заданного объема боевых задач. Ремонт ВВТ может быть организован выездной ремонтной бригадой в месте дислокации воинской части или в специализированном сервисном центре, который удален от воинской части на расстояние d . Доля неисправного ВВТ, отправляемого на ремонт в сервисный центр, задается параметром управления α . Кроме того, ВВТ может быть направлено в ремонт при истечении межремонтного срока службы. В этом случае ремонт проводится только в сервисном центре и, как правило, заранее известно время подачи техники в ремонт. Задача состоит в нахождении оптимального значения параметра α , при котором обеспечивается заданный уровень исправности ВВТ и минимизация удельной стоимости его достижения, для различных значений параметра d .

Для решения задачи была разработана математическая модель, основанная на теории массового обслуживания и методе динамики средних. Данная модель позволяет

получить количественную оценку эффекта и затрат, необходимых для осуществления ремонта неисправного ВВТ за определенный временной интервал.

Адекватность модели подтверждается полученными в результате моделирования зависимостями исправности ВВТ и затрат от времени при различных начальных условиях и управляющих воздействиях, и, следовательно, может быть использована при решении оптимизационных задач управления техническим обеспечением.

Вместе с тем разработанная модель обладает некоторыми недостатками:

- интервал времени между поломками ВВТ, время ремонта в сервисном центре и выездной бригадой заданы константами (средними значениями);
- время, необходимое на транспортировку ВВТ в сервисный центр и обратно задано константой, суммирующейся со средним временем ремонта образца ВВТ, т.е. не решается транспортная задача;
- стоимость ремонта рассчитывается исходя из усредненной стоимости ремонта одного образца ВВТ, т.е. не учитывается стоимость простоя специалистов сервисного центра и выездной бригады в случае отсутствия неисправного ВВТ;
- не рассчитывается средняя загруженность мощностей сервисного центра и выездной бригады;
- рассмотрен простейший случай, когда одну воинскую часть обслуживает один сервисный центр.

Перечисленные недостатки являются характерными при использовании аналитического подхода к решению задач теории массового обслуживания. При исследовании более сложных систем массового обслуживания аналитический подход становится неприменимым. В такой ситуации для анализа и оценки функционирования изучаемой системы используется имитационное моделирование. Имитационная модель – логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере.

В настоящее время существует ряд современных программных средств, реализующих функции имитационного моделирования. Одним из самых современных и функциональных программных средств имитационного моделирования является Arena – программное средство, разработанное компанией Systems Modeling Corporation. Оно позволяет разрабатывать модели, используя которые можно адекватно представить очень многие реальные системы. В основу системы имитационного моделирования Arena заложен математический аппарат «раскрашенных» сетей Петри и систем массового обслуживания.

Имитационные модели, реализуемые в системе Arena, являются дискретными, динамическими и стохастическими одновременно. Такой вид моделей чаще всего называют дискретно-событийным, он используется для построения моделей, отражающих развитие системы во времени, когда состояние переменных системы меняется в конкретные моменты времени под воздействием определенных происходящих в системе событий [2]. При этом основными достоинствами имитационного моделирования являются:

- построение адекватных моделей исследуемой системы, задание ее основных свойств и законов функционирования;
- наблюдение за изменением состояния системы в динамике;
- выявление «узких мест» в материальных, информационных, транспортных и других потоках;
- выделение переменных, наиболее важных для успешного функционирования моделируемой системы, и анализ имеющихся между ними зависимостями;
- управление системой и определение оптимальных способов управления при заданных целях и критериях;

- анализ прямых и косвенных последствий реализации заданных форм и способов воздействия на систему.

Несмотря на то, что программное средство Arena в настоящее время только начинает использоваться в России, его успешная апробация прошла за рубежом на ряде крупных предприятий, в таких областях как машиностроительная отрасль, фармацевтика, авиа- и кораблестроение, промышленные производства, оборонная промышленность и т.п.

В рамках проведенного исследования описанная в [1] экономико-математическая модель системы ремонта ВВТ была реализована в программном средстве Arena. При этом в разработанной имитационной модели учтены перечисленные выше недостатки, характерные для аналитического подхода к решению задачи оптимального управления процессом ремонта неисправного ВВТ.

Интервал времени между поломками ВВТ, время ремонта в сервисном центре и выездной бригадой, время транспортировки в сервисный центр и обратно задаются случайными величинами с различными законами распределения.

Процесс транспортировки ВВТ имитируется следующим образом: два средства транспортировки перевозят неисправное ВВТ в сервисный центр, а отремонтированное (обслуженное) ВВТ – к месту дислокации воинской части. Из-за возможного отсутствия свободных транспортных средств могут образовываться очереди ВВТ, ожидающего транспортировки. При этом алгоритм транспортировки задан с учетом необходимости обеспечения максимально возможной загруженности мощностей сервисного центра.

Стоимость ремонта складывается из затрат на оплату труда специалистов сервисного центра и выездной бригады, а также стоимости необходимого для ремонта запасного имущества и принадлежностей (ЗИП).

Отличительной особенностью имитационной модели ремонта ВВТ, реализованной в системе Arena, является потенциальная возможность ее масштабирования, создание сложной многоканальной модели, состоящей из множества воинских частей различного уровня иерархии и обслуживающих их сервисных центров.

На рис. 1 представлена модель системы ремонта ВВТ, реализованная в программном средстве имитационного моделирования Arena. В ней можно выделить следующие основные модули.

1) Инициализации:

- сущностями «образец ВВТ» (Initial);
- сущностями «средство транспортировки» (Init Transp).

2) Генерации потока требований:

- поток поломок ВВТ (λ_{01});
- поток планового сервисного обслуживания ВВТ (λ_{KR}).

3) Обработки сущностей:

- эксплуатация ВВТ в воинской части (S0);
- ремонт ВВТ выездной бригадой (S2);
- ремонт ВВТ в сервисном центре (S3);
- транспортировка ВВТ в сервисный центр (Transportirovka to SC);
- транспортировка ВВТ из сервисного центра (Transportirovka from SC);
- перемещение транспортного средства в сервисный центр и обратно (соответственно Transport forwarding и Transport returning);
- ожидание транспортировки ВВТ в сервисный центр и обратно (соответственно Waiting for Transp to SC и Waiting for Transp from SC).

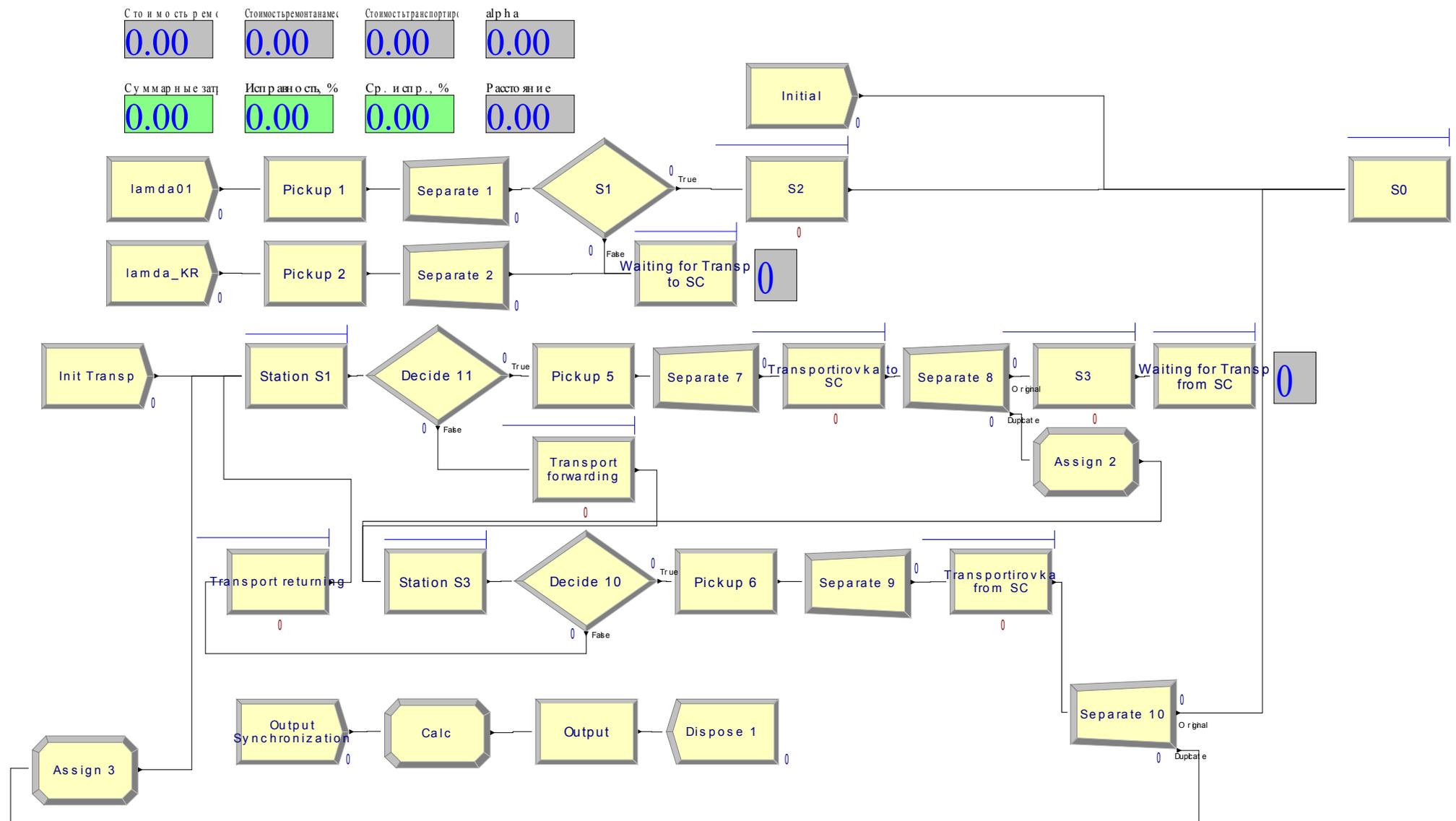


Рис. 1. Модель системы ремонта ВВТ, реализованная в системе Arena.

Исходные данные. Моделирование осуществлялось при следующих исходных данных:

- в воинской части по штату – 500 единиц условного ВВТ;
- ремонт отказавшего ВВТ может осуществляться выездной бригадой в месте дислокации воинской части, а также в сервисном центре;
- плановое техническое обслуживание и продление ресурса ВВТ осуществляется в сервисном центре;
- сервисный центр одновременно может осуществлять ремонт (плановое техническое обслуживание) двух единиц условного ВВТ, выездная бригада – одной единицы;
- расстояние от сервисного центра до места дислокации (d), км – 50, 100, 200, 400;
- доставка ВВТ в сервисный центр осуществляется двумя условными транспортными средствами, способными перевозить не более одной единицы ВВТ;
- скорость транспортировки, км/ч – случайная величина, имеющая бета-распределение на отрезке [10; 40] с параметрами $\alpha = 2, \beta = 2$;
- скорость перемещения порожнего транспортного средства, км/ч – случайная величина, имеющая бета-распределение на отрезке [20; 80] с параметрами $\alpha = 2, \beta = 2$;
- интервал времени между отказами ВВТ, суток – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром $\lambda = 2$;
- периодичность планового технического обслуживания – каждые полгода;
- количество единиц ВВТ, единовременно направляемого для прохождения планового технического обслуживания, – 10% от исправного ВВТ, находящегося в месте дислокации;
- время ремонта одной единицы ВВТ, суток – случайная величина, имеющая бета-распределение на отрезке [1; 5] с параметрами $\alpha = 2, \beta = 5$;
- затраты на оплату труда, усл. ед. / час:
 - специалистов сервисного центра ($C_{СЦ}$) – 0,14;
 - специалистов выездной бригады ($C_{ВБ}$) – 0,15;
- затраты на ЗИП и расходные материалы ($C_{ЗИП}$), усл. ед. / ед. ВВТ – 1;
- затраты на транспортировку ВВТ ($C_{ТР}$), усл. ед. / час – 0,1;
- доля ВВТ, ремонтируемой в сервисном центре (α), % – 0, 10, 20, ..., 100;
- период моделирования (T) – 2 года;
- шаг моделирования (t) – 1 сутки.

Результаты моделирования. В таблице 1 и на рис. 2 и представлены зависимости средней исправности ВВТ и удельной стоимости ее достижения от параметров α и d , полученные в результате моделирования.

Таблица 1. Результаты моделирования.

α	d = 50 км		d = 100 км		d = 200 км		d = 400 км	
	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.
0	0,8949	0,6389	0,8873	0,6581	0,8930	0,6984	0,8798	0,7766
10	0,9119	0,6420	0,9285	0,6705	0,9116	0,7172	0,9111	0,8258
20	0,9414	0,6480	0,9374	0,6786	0,9466	0,7385	0,9337	0,8597
30	0,9699	0,6533	0,9731	0,6957	0,9632	0,7640	0,9316	0,8659
40	0,9713	0,6621	0,9756	0,7099	0,9703	0,7861	0,9163	0,8718
50	0,9777	0,6650	0,9738	0,7147	0,9693	0,8260	0,9132	0,8849
60	0,9688	0,6757	0,9703	0,7315	0,9702	0,8323	0,8813	0,9007
70	0,9653	0,6778	0,9685	0,7353	0,9651	0,8560	0,8701	0,9041
80	0,9648	0,6818	0,9625	0,7446	0,9560	0,8700	0,8423	0,9051

α	d = 50 км		d = 100 км		d = 200 км		d = 400 км	
	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.	Ср.испр.	Уд.стоим.
90	0,9467	0,6829	0,9403	0,7461	0,9523	0,8793	0,8262	0,9044
100	0,9367	0,6845	0,9348	0,7516	0,9278	0,8764	0,8013	0,9042

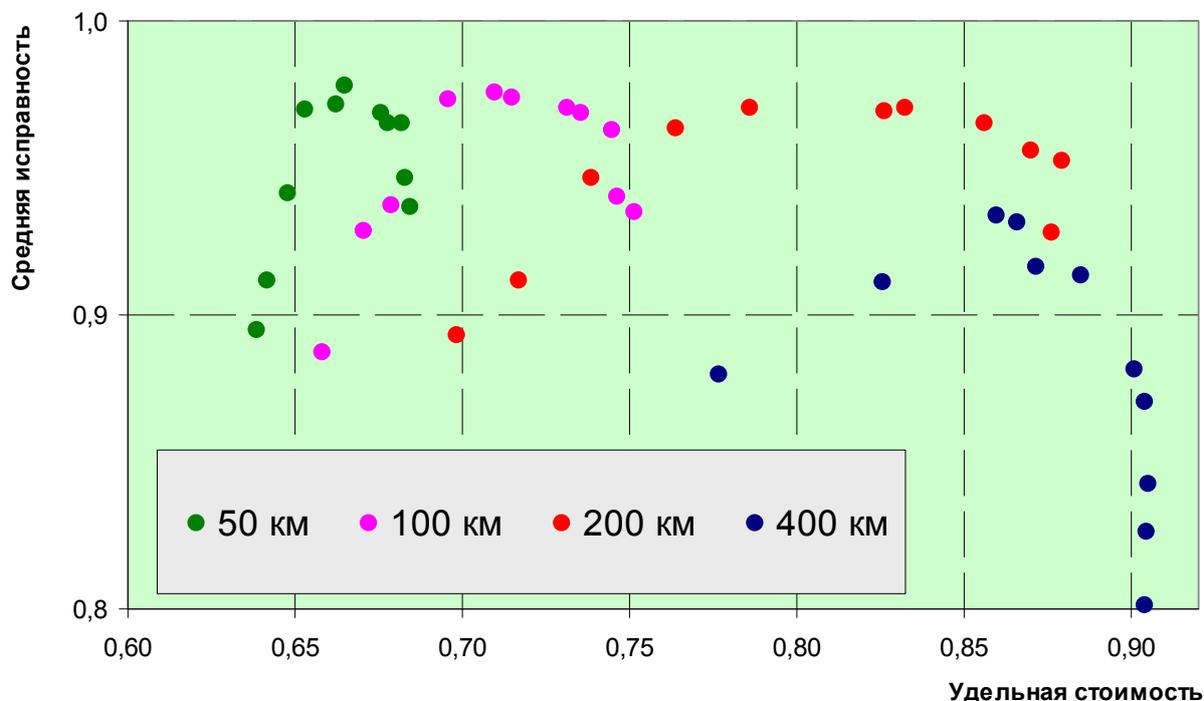


Рис. 2. Зависимости средней исправности ВВТ и удельной стоимости ее достижения от параметров α и d .

Средняя исправность рассчитывается по формуле

$$(1) \quad \overline{ИСПР} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{K_{ИСПР}(t)}{K_{Штам}}$$

где $K_{ИСПР}(t)$ – количество исправного ВВТ в момент времени t ; $K_{Штам}$ – количество единиц ВВТ в воинской части согласно штату.

Удельная стоимость достижения средней исправности ВВТ на уровне \overline{ENID} рассчитывается по формуле

$$(2) \quad \text{Удел. стоим.} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{C_{СЦ}(t) + C_{ВБ}(t) + C_{ТР}(t) + k(t) \times C_{ЗИП}}{K_{Штам}}$$

где $C_{СЦ}(t)$, $C_{ВБ}(t)$, $C_{ТР}(t)$ – затраты в момент времени t соответственно на оплату труда специалистов сервисного центра, специалистов выездной бригады, транспортировку ВВТ; $k(t)$ – количество единиц отремонтированного ВВТ в момент времени t .

Проанализировав данные таблицы 1, можно сделать вывод о том, что для заданных исходных данных диапазон оптимальных с точки зрения максимизации средней исправности ВВТ и минимизации удельной стоимости ее достижения значений параметра α находится в пределах 20-50%. При этом оптимальное значение параметра α зависит от параметра d .

Далее оценим загруженность мощностей выездной бригады и сервисного центра при заданных исходных данных, ограничив возможные значения параметра α диапазоном 20-50%.

В таблице 2 представлены зависимости исправности ВВТ и средней загруженности мощностей (выездной бригады и сервисного центра) от времени.

Из таблицы видно, что загруженность мощностей выездной бригады близка к 1, если параметр α находится в диапазоне 20-30%. При этом загруженность мощностей сервисного центра близка к 0,5. Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный сервисный центр при таких исходных данных недогружен и, соответственно, вполне может обслужить еще одну воинскую часть с характеристиками, близкими с рассматриваемой воинской частью. Для этого достаточно внести в модель соответствующие изменения. Это позволит обеспечить рациональную загруженность мощностей сервисного центра и тем самым оптимизировать расходы на его содержание.

Для заданных исходных данных загруженность мощностей сервисного центра сильно зависит от периодичности планового технического обслуживания ВВТ. Это видно из рис. 3, на котором представлен график зависимости мгновенной загруженности мощностей сервисного центра от времени. Эту особенность необходимо учитывать при масштабировании модели, когда одним сервисным центром будет осуществляться ремонт и техническое обслуживание ВВТ нескольких воинских частей.

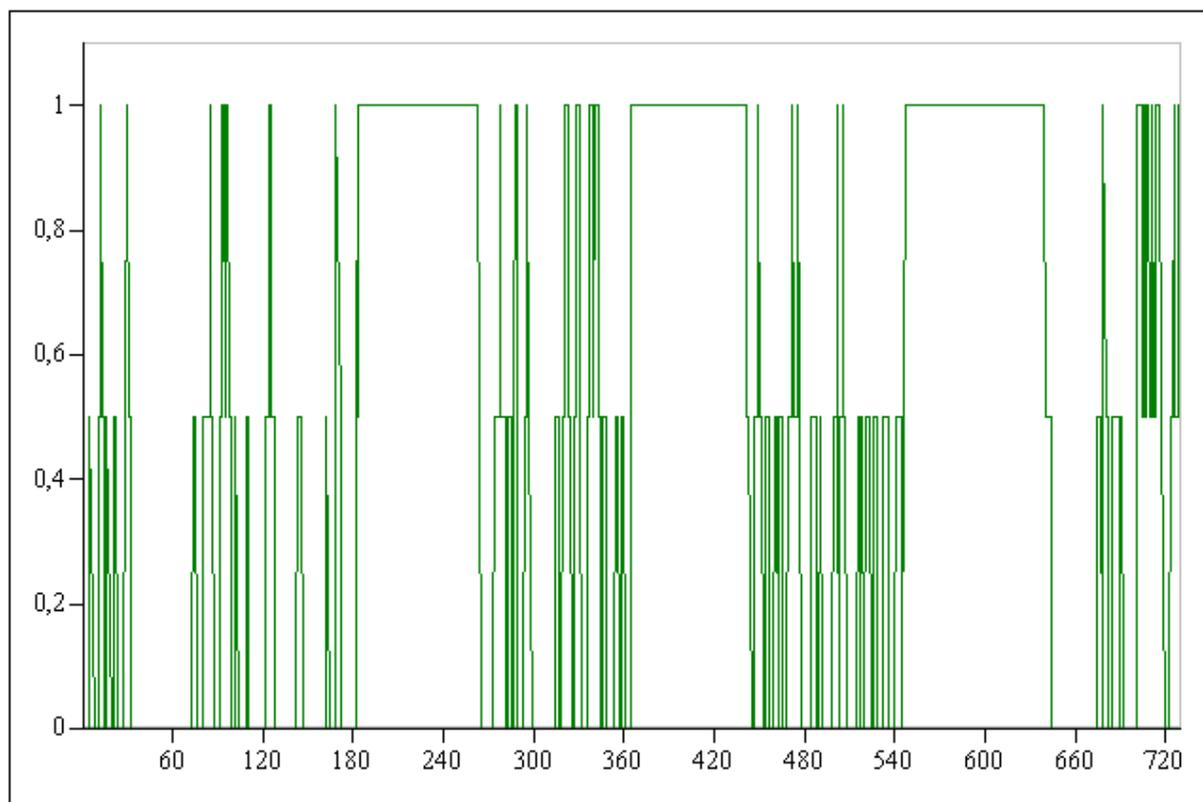
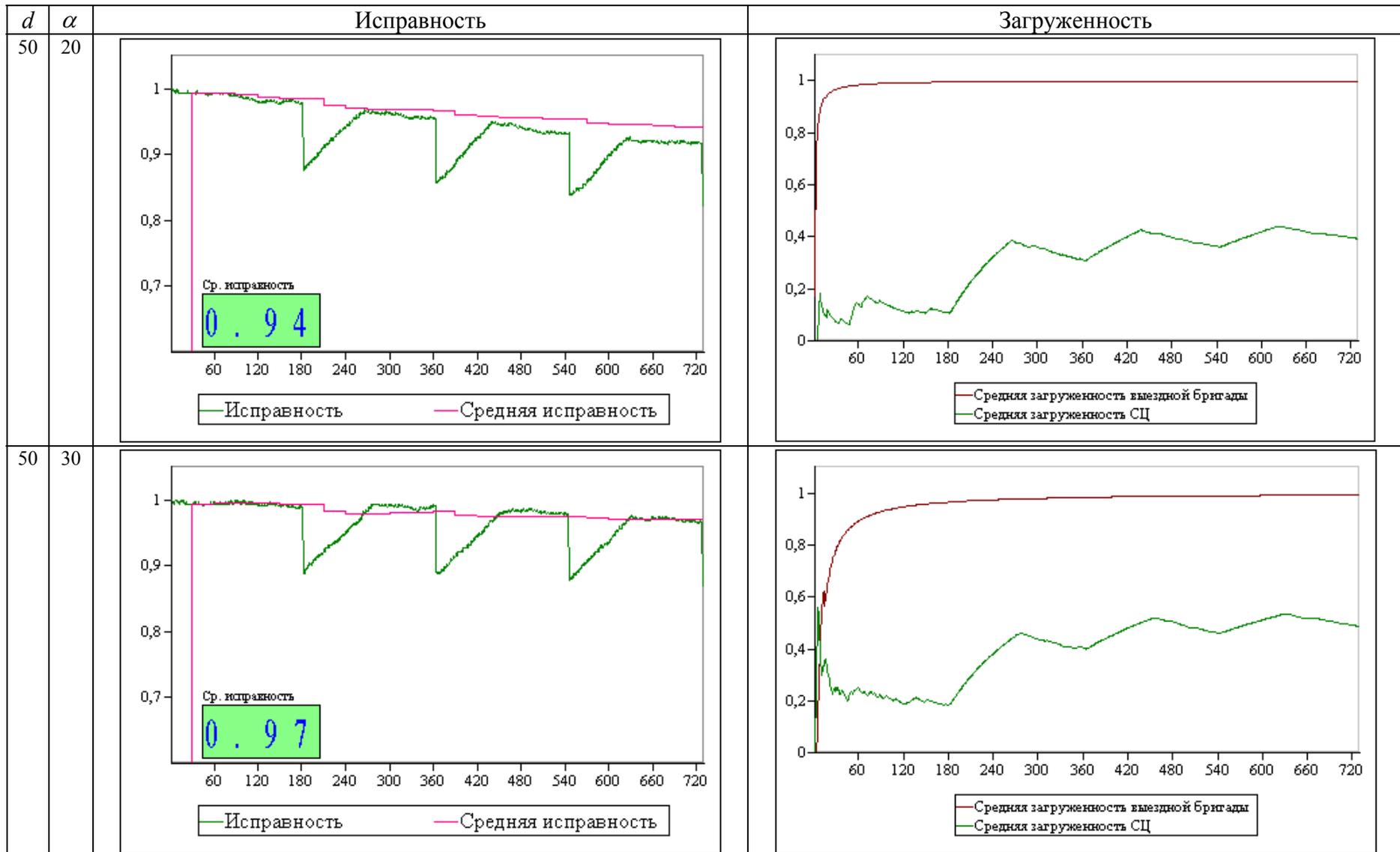
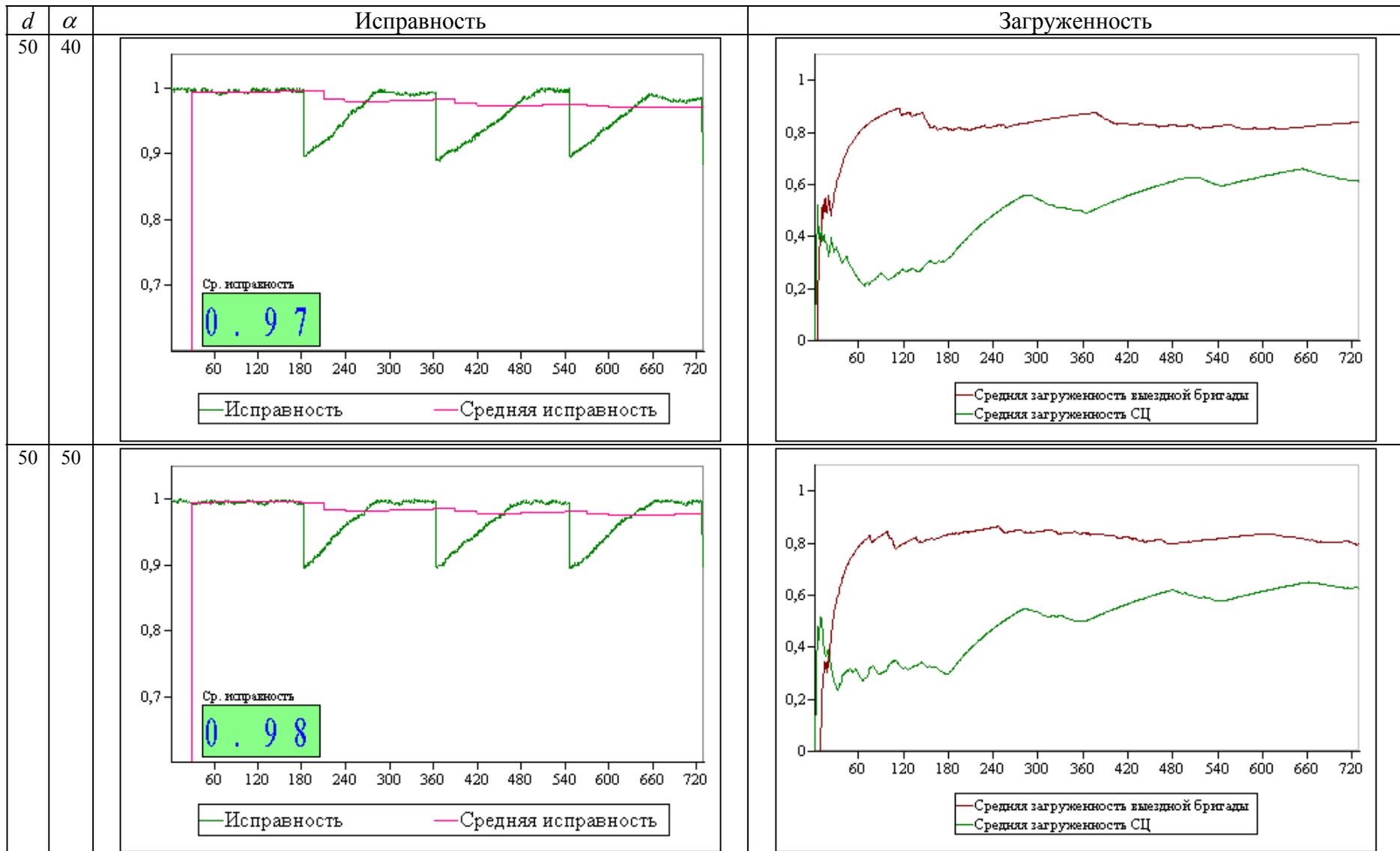


Рис. 3. Зависимость мгновенной загруженности мощностей сервисного центра от времени ($\alpha = 30, d = 100$).

Таблица 2. Исправность ВВТ и средняя загрузка мощностей (выездной бригады и сервисного центра).





Адекватность разработанной имитационной модели ремонта ВВТ подтверждается сходимостью результатов моделирования в программном средстве Arena и результатов, полученных в работе [1], при одних и тех же исходных данных.

Сходимость результатов свидетельствует также о том, что аналитическая модель может быть использована для получения оперативных приближенных оценок.

Вместе с тем, в отличие от аналитической модели, разработанной в работе [1], имитационная модель позволяет:

- учесть гораздо больше факторов, влияющих на процесс ремонта ВВТ;
- производить точный расчет показателей, характеризующих исправность ВВТ и экономические затраты в зависимости от расстояния между воинским подразделением и сервисным центром, количеством сил и средств технического обеспечения, а также выбранной стратегии ремонта ВВТ;
- анализировать как изменится результат с учетом совокупности случайных воздействий, которые могут иметь различные законы распределения, и выявить возможные отклонения показателей исправности и затрат от средних значений, вычисляемых с помощью аналитической модели;
- исследовать такие параметры, как мгновенная и средняя загруженность мощностей сервисного центра и выездной бригады, которые невозможно вычислить с помощью аналитической модели.

Кроме того имитационную модель можно достаточно легко масштабировать.

Разработанная имитационная модель может быть использована при решении следующих задач:

- определение оптимальной территориальной зоны ответственности сервисных центров и его выездных бригад по ремонту ВВТ для обеспечения заданного уровня исправности ВВТ и минимизации затрат;
- нахождение оптимального соотношения количества образцов ВВТ, ремонтируемых выездными бригадами и сервисными центрами для обеспечения заданного уровня исправности ВВТ и минимизации затрат;
- определение оптимального количества выездных бригад и сервисных центров для обеспечения заданного уровня исправности ВВТ, минимизации затрат и с учетом рациональной загруженности их мощностей.

Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-359.2013.10

Список литературы

1. Пьянков А.А. Экономико-математическая модель системы ремонта вооружения и военной техники в современных условиях // Электронный научный журнал «Вооружение и экономика». 2012. № 3 (24).
2. Замятина О.М. Моделирование систем. Учебное пособие. Томск: Издательство ТПУ, 2009. С. 42.
3. Финаев В.И., Павленко Е.Н., Заргарян Е.В. Аналитические и имитационные модели. Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета, 2007.
4. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Модель управления техническим обеспечением войск // Электронный научный журнал «Вооружение и экономика». 2011. № 4 (16).