

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для выполнения курсового проекта
(раздел **«Исследование вычислительных систем
неоднородной структуры»**)
по дисциплине **«Основы теории систем»**
для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению 09.03.01 —
«Информатика и вычислительная техника»

Севастополь
2016

Методические указания для выполнения курсового проекта (раздел «Исследование вычислительных систем неоднородной структуры») по дисциплине «Основы теории систем» для студентов очной и заочной формы обучения по направлению 09.03.01 — «Информатика и вычислительная техника» / Составили: А.В. Скатков, В.И. Шевченко, И.А. Балакирева. — Севастополь: СевГУ, 2016. — 36 с.

Целью методических указаний является оказание методической помощи студентам в выполнении курсового проекта по дисциплине «Основы теории систем»

Методические указания содержат:

- краткие теоретические сведения по основам моделирования вычислительных систем;
- методика проведения экспериментов для исследования свойств имитационных моделей;
- задание для выполнения курсового проекта;
- список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- индивидуальные варианты заданий.

Методические рекомендации рассмотрены и утверждены на заседании кафедры информационных технологий и компьютерных систем, протокол № 9 от 19 мая 2016 г.)

Рецензент: канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем Козлова Е.В.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие вопросы имитационного моделирования	4
1.1	Сущность имитационного моделирования	4
1.2	Технологические этапы создания и использования имитационных моделей	5
1.2.1	Составление содержательного описания объекта моделирования	5
1.2.2	Составление концептуальной модели	6
1.2.3	Составление формального описания объекта моделирования	6
1.2.4	Составление имитационной модели	7
1.2.5	Программирование	7
1.2.6	Испытание модели	7
1.2.7	Исследование свойств имитационной модели	7
1.2.8	Эксплуатация имитационной модели	7
1.2.9	Анализ результатов моделирования	8
2	Испытания и эксплуатация имитационных моделей	8
2.1	Технологические этапы испытания и эксплуатации имитационных моделей	8
2.2	Статистический анализ результатов моделирования	9
2.2.1	Задание исходной информации для моделирования	9
2.2.2	Проверка адекватности модели	10
2.2.3	Калибровка имитационной модели	12
2.3	Исследование свойств имитационной модели	12
2.3.1	Оценка погрешности имитации, обусловленной наличием в имитационной модели генераторов случайных чисел	12
2.3.2	Определение длительности переходного процесса	15
2.3.3	Оценка устойчивости результатов имитации	17
2.3.4	Исследование чувствительности имитационной модели	18
3	Задание для выполнения курсового проекта	21
4	Содержание пояснительной записки	23
	Библиографический список	23
	Приложение А	24

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. СУЩНОСТЬ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитация представляет собой численный метод проведения на компьютере экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных систем (СС) в течение заданного или формируемого периода времени. Поведение компонент СС и их взаимодействие в имитационных моделях (ИМ) чаще всего описываются набором алгоритмов, реализуемых на некотором языке моделирования. Все эти описания представляют собой программную ИМ.

Каждая модель представляет собой некоторую комбинацию таких составляющих, как компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции.

Под **компонентами** понимают составные части, которые при соответствующем соединении образуют систему. Иногда компонентами считают также элементы системы или ее подсистемы. Система определяется как группа или совокупность объектов, объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия или взаимозависимости для выполнения заданной функции.

Параметрами являются величины, которые исследователь может выбирать произвольно, в отличие от **переменных** модели, которые могут принимать только значения, определяемые видом данной функции. В модели системы будем различать переменные двух типов - экзогенные и эндогенные. Экзогенные (входные) переменные порождаются вне системы или являются результатом взаимодействия внешних причин. Эндогенными переменными называются переменные, возникающие в системе в результате воздействия внутренних причин. В тех случаях, когда эндогенные переменные характеризуют состояние или условия, имеющие место в системе, их называют переменными состояния. Когда же необходимо описать входы и выходы системы, имеют дело с входными и выходными переменными.

Функциональные зависимости описывают поведение переменных и параметров в пределах компоненты или же выражают соотношения между компонентами системы. Эти соотношения по своей природе являются либо детерминированными, либо стохастическими. Оба типа соотношений обычно выражаются в виде алгоритмов, которые устанавливают зависимость между переменными состояния и экзогенными переменными.

Ограничения представляют собой устанавливаемые пределы изменения значений переменных или ограничивающие условия их изменений. Они могут вводиться либо разработчиком, либо устанавливаться самой системой вследствие присущих ей свойств.

Целевая функция (функция критерия) представляет собой точное отображение целей и задач системы и необходимых правил оценки их выполнения. Выражение для целевой функции должно быть однозначным определением целей и задач, с которыми должны соизмеряться принимаемые решения.

1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Независимо от способа проектирования сложной системы и назначения моделирования можно выделить следующие восемь этапов создания и использования математических моделей [1]:

- определение объекта имитации, установление границ и ограничений моделирования, выбор показателей для сравнения эффективности вариантов системы (составление содержательного описания объекта моделирования);

- формулировка замысла модели, переход от реальной системы к логической схеме ее функционирования (составление концептуальной модели);

- реализация объекта в терминах математических понятий и алгоритмизация функционирования ее компонент (составление формального описания объекта);

- преобразование формального описания объекта в описание имитационной модели (составление описания имитационной модели);

- программирование и отладка модели (программирование модели);

- проверка модели, ее свойств и затрат ресурсов на имитацию (испытание и исследование модели);

- организация модельного эксперимента на ЭВМ (эксплуатация модели);

- интерпретация результатов моделирования и их использование в ходе проектирования сложной системы (анализ результатов).

1.2.1. Составление содержательного описания объекта моделирования представляет собой выполнение следующих действий.

В начале определяется объект имитации и состав исходной технической информации, достаточной для изучения тех сторон его функционирования, которые представляют интерес для исследователя.

Устанавливаются границы изучения функционирования объекта. Составляется возможный список ограничений модели, которые допустимы при организации имитации или при наличии которых еще имеет смысл имитация функционирования объекта моделирования.

Результатом работ на данном этапе является содержательное описание объекта моделирования с указанием целей имитации и ас-

пектов функционирования объекта моделирования, которые изучить на ИМ. Обычно оно представляет собой техническое описание объекта моделирования, описание внешней среды, с которой он взаимодействует, и временную диаграмму этого взаимодействия.

1.2.2. Составление концептуальной модели производится в следующей последовательности:

- На основании содержательного описания уточняется задача моделирования, определяются процедура и график ее решения.

- Уточняется методика всего имитационного эксперимента в зависимости от наличных ресурсов, выделенных для имитации.

- Общая задача моделирования разбивается на частные подзадачи. Устанавливаются приоритеты решения подзадач моделирования.

- Обосновываются требования в рабочей силе и выделения вычислительных ресурсов.

- Затем проводится тщательный анализ задач, стоящих перед имитацией. Часто при создании небольших моделей данный этап работ совмещается с этапом составления содержательного описания моделируемой системы.

1.2.3. Составление формального описания объекта моделирования представляет собой ответственный этап создания имитационной модели СС. Цель — исследование алгоритмов поведения компонент СС и отражение вопросов взаимодействия между собой этих компонент. При составлении формального описания модели исследователь использует тот или иной язык формализации. В зависимости от сложности объекта моделирования и внешней среды могут использоваться три вида формализации: аппроксимация явлений функциональными зависимостями, алгоритмическое описание объектов в системе, смешанное представление в виде последовательности формул и алгоритмических записей.

После составления формального описания объекта моделирования приступают к его проверке. Это первая главная проверка достоверности будущей модели СС в процессе проектирования. Для обеспечения контроля правильности функционирования модели вводят классические модели, достоверность которых доказана. Они фигурируют в модели в виде составных частей. На вход таких моделей поступают данные, вычисляемые в других частях модели, достоверность которых проверяется. Если результат работы классической модели окажется недостоверным, то считают, что предшествующая часть формального описания системы также недостоверна.

В процессе проверки достоверности модели необходимо ответить на следующие вопросы: позволяет ли модель решить поставленные задачи моделирования, насколько полна предложенная схема модели и

отражает ли она фактическую последовательность развития процессов в реальной системе. Необходимо провести анализ каждой модели и убедиться, что она нашла свое отражение в формальном описании системы.

Результатом этапа является проверенное формальное описание исследуемой системы на выбранном языке формализации.

1.2.4. Составление имитационной модели. Здесь рассматриваются вопросы реализации модели: декомпозиция объекта на составляющие и формирование элементов модели; отработка вопросов синхронизации частей компонент модели друг с другом в модельном времени; задание начальных условий моделирования; планирование процессов имитации отдельных вариантов системы; проверка окончания моделирования; обработка результатов имитации. Результатом этапа является описание модели сложной системы.

1.2.5. Программирование. На этом этапе составляется план создания и использования программной модели. Как правило, программа модели создается с помощью некоторой программной среды моделирования. Поэтому в плане указываются: программная среда; примерные затраты вычислительных ресурсов на создание программы модели и ее рабочих массивов; затраты времени вычислений на один цикл работы модели; оценки затрат на программирование и отладку программы модели.

На этом же этапе проверяют достоверность программы модели системы. В процессе этой проверки устанавливается соответствие операций в программе и описании модели.

1.2.6. Испытание модели. Это важный этап создания модели. При этом необходимо выполнить следующее. Во-первых, убедиться в правильности динамики развития алгоритма моделирования объекта исследования в ходе имитации его функционирования (провести верификацию модели). Во-вторых, определить степень адекватности модели и объекта исследования. Под адекватностью программной имитационной модели реальному объекту понимают совпадение с заданной точностью векторов характеристик поведения объекта и модели. При отсутствии адекватности проводят калибровку имитационной модели.

1.2.7. Исследование свойств имитационной модели. При этом оцениваются точность имитации явлений, устойчивость результатов моделирования, чувствительность критериев качества к изменению параметров модели.

1.2.8. Эксплуатация имитационной модели. Этот этап начинается с составления плана эксперимента, позволяющего исследователю получить максимум информации при минимальных затратах на вычисление. Обязательно статистическое обоснование плана эксперимента. Итогом работы являются результаты моделирования.

1.2.9. Анализ результатов моделирования. Данный этап завершает технологическую цепочку этапов создания и использования имитационных моделей. Получив результаты моделирования, исследователь приступает к интерпретации результатов. Результатом этапа интерпретации результатов моделирования являются рекомендации по проектированию системы или ее модификации.

В конечном итоге после выполнения всех перечисленных выше итерационных этапов исследователь либо окажется удовлетворенным результатом моделирования и будет их учитывать при проектировании сложной системы, либо забракует проектируемую систему и сформирует техническое задание на разработку новой архитектуры системы.

2. ИСПЫТАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

2.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

После того как ИМ реализована на ЭВМ, исследователь должен выполнить последовательность технологических этапов: испытание ИМ, исследование свойств модели, составление плана имитационных экспериментов на ЭВМ, эксплуатацию модели [1,2].

Введем некоторые определения и обозначения. На реальную систему воздействуют параметры G^* , которые можно измерять, но нельзя ими управлять, и входные переменные X^* , которые исследователь может изменять в ходе экспериментов. На выходе системы возможно измерение выходных характеристик Y^* . При этом существует некоторая неизвестная исследователю функциональная зависимость между выходных характеристик от переменных и параметров системы: $Y^* = \varphi^*(X^*, G^*)$. Модель системы, в свою очередь, определяется как совокупность компонент, объединенных для выполнения заданной функции $Y = \varphi(X, G)$. Здесь Y, X, G — векторы соответственно результата действия модели системы, входных переменных модели и параметров моделирования. Входные переменные модели X исследователь может выбирать произвольно. Параметры G модели должны принимать только те значения, которые характерны для дан-

ного объекта моделирования или условий его функционирования. Поэтому в ходе имитации реальных процессов вектор G формируется на основе реальной информации. Для этой цели обычно измеряют фактические значения параметров G^* и результатов поведения системы Y^* при заданных значениях входных переменных системы X^* .

Испытания ИМ начинаются с задания исходной информации моделирования. Затем необходима верификация модели, которая состоит в проверке соответствия ИМ тому замыслу, который был заложен при ее разработке. Далее необходимо выполнить проверку адекватности модели объекту моделирования, т.е. необходимо проверить соответствие между поведением реальной системы (Y^*) и поведением ИМ (Y).

Для обеспечения адекватности ИМ реальному объекту исследования осуществляется калибровка модели. Цель калибровки состоит в модификации функции вида $\varphi(X, G)$ модели таким образом, чтобы модель стала адекватно отображать поведение реальной системы.

Исследование свойств ИМ предполагает последовательность выполнения следующих действий: оценки погрешностей имитации из-за неидеальности генераторов случайных чисел, используемых в модели; определения времени моделирования, необходимого для достижения заданной точности моделирования; оценки устойчивости результатов моделирования Y при различных изменениях параметров X и заданных значениях переменных G ; оценки чувствительности результатов моделирования к изменению параметров модели G и исходных данных моделирования X .

Весьма существенным технологическим этапом организации имитационных экспериментов на компьютере является планирование экспериментов. Поскольку «прогоны» вариантов модели обычно дороги, нужно стремиться к тому, чтобы количество параметров моделирования (размерность X) и число уровней каждого параметра были минимальными и соответствовали целям эксперимента. Важными с этой точки зрения являются следующие вопросы:

- определение требуемого размера выборки статистик моделирования, используемых при вычислении значений Y ;
- определение интервалов изменения входных переменных моделирования X ;
- планирование поиска ошибок в имитационном эксперименте.

2.2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.2.1. Задание исходной информации для моделирования.

Процедура задания исходной информации для моделирования зависит от типа модели. Если мы имеем дело с функционирующей системой, то зачастую организуется измерение характеристик поведения системы Y^* , параметров системы G^* и входных переменных системы X^* . В ходе этих испытаний определяются характеристики каждой компоненты векторов G^* , X^* , Y^* .

В ходе натурального эксперимента по результатам измерения параметров системы G^* формируется модель параметров системы G . Степень соответствия модели параметрам системы определяется вектором точностей ее компонент $\delta(G)$ и уровнем детализации алгоритма системы, т.е. точностью аппроксимации зависимости $\varphi^*(X^*, G^*)$ функцией $\varphi(X, G)$.

Когда нет возможности определить значения компонент вектора G^* на основании измерений, приходится полагаться на субъективные (экспертные) оценки.

При построении модели параметров G по значениям измеренных или установленных экспертным путем компонент вектора G^* широко применяются статистические методы. В качестве задаваемых характеристик качества модели параметров G используется уровень доверия β и вектор точностей моделирования переменных $\delta(G)$. В связи с этим перед исследователем возникает множество проблем, связанных с конкретным применением измерительных средств на реальных системах. Одна из проблем - это необходимость удовлетворения требованиям, чтобы измерители значений компонент вектора G не искажали их и по возможности не влияли на те физические явления и процессы, которые являются предметом моделирования.

2.2.2. Проверка адекватности модели. Оценка адекватности модели объекту моделирования проводится чаще всего для случая, когда можно определить значение отклика системы в ходе натуральных испытаний. Пусть известен отклик реальной системы Y^* при параметрах G^* , входных переменных X^* и неизвестной из-за сложности и малой изученности протекающих в объекте процессов функции $Y^* = \varphi^*(X^*, G^*)$. Модель представляет собой аппроксимирующую

зависимость $Y_k = \varphi(X_k, G)$, $k = \overline{1, N}$ (k и N — соответственно номер и число опытов на модели и реальной системе), найденную в ходе эксплуатации объекта по результатам наблюдений входных воздействий X_k^* , $k = \overline{1, N}$ и выхода Y_k^* при заданных значениях G^* .

Проверку адекватности модели реальному объекту исследования можно проводить различными способами. Рассмотрим три наиболее употребительных способа:

- по средним значениям откликов модели и реальной системы;
- по дисперсиям отклонений откликов модели на средние значения откликов системы;
- по максимальному значению абсолютных отклонений откликов модели от откликов системы.

При первом способе проверяется гипотеза о близости средних значений каждой n -й компоненты откликов модели $\bar{Y}_n$ известным средним значениям n -й компоненты откликов реальной системы $\bar{Y}_n^*$. Проводят N_1 опытов на реальной системе и измеряют по каждой n -й компоненте откликов системы выборки значений $\{\bar{Y}_{nk}^*\}$, $k = \overline{1, N_1}$. Выполняют N_2 опытов на модели системы и получают по тем же n -м компонентам откликов модели выборки значений $\{Y_{nk}\}$, $k = \overline{1, N_2}$. Обычно стараются, чтобы объемы выборок были одинаковы ($N_1 = N_2$), но в ряде случаев натурные эксперименты весьма дороги и поэтому $N_2 > N_1$. По выборкам вычисляются оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и системы с помощью следующих соотношений:

$$\bar{Y}_n = \frac{1}{N_2} \sum_{k=1}^{N_2} Y_{nk}; \quad D_n = \frac{1}{N_2 - 1} \sum_{k=1}^{N_2} (Y_{nk} - \bar{Y}_n)^2; \quad (1)$$

$$\bar{Y}_n^* = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} Y_{nk}^*; \quad D_n^* = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} (Y_{nk}^* - \bar{Y}_n^*)^2. \quad (2)$$

Основой проверки гипотезы является разность $(\bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*)$, оценкой дисперсии которой будет

$$D_{pn} = \frac{(N_1 - 1)D_n + (N_2 - 1)D_n^*}{N_1 + N_2 - 2}. \quad (3)$$

Величины $(\bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*)$ и D_{pn} являются статистически независимыми, и поэтому можно использовать t -статистику:

$$t_n = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*) \sqrt{\frac{N_1 N_2}{D_{pn}(N_1 + N_2)}}. \quad (4)$$

Таким образом, можно воспользоваться таблицей распределения t -статистики, взяв число степеней свободы равным $\gamma = N_1 + N_2 - 2$. Обычно задаются уровнем зависимости $\alpha = 0,05$ и при конкретном значении числа степеней свободы γ по таблицам находят критическое значение t -статистики ($t_{кр}$). Если выполняется неравенство $t_n \leq t_{кр}$, то гипотеза о близости средних значений n -й компоненты откликов модели и системы принимается. Только при близости откликов по всем компонентам векторов Y и Y^* можно говорить об адекватности модели объекту по первому способу.

2.2.3. Калибровка имитационной модели. Когда модель оказывается неадекватной реальной системе, необходимо провести ее калибровку. Цель калибровки состоит в уменьшении неточностей формулировки ИМ, обусловленных ошибочной или недостаточно подробной моделью $\varphi(X, G)$. Исследователь может корректировать либо модель параметров G , либо алгоритм функционирования модели $\varphi(X, G)$. В ходе калибровки модели сложной системы можно проводить изменения трех типов:

- глобальные структурные изменения (например, добавление программ процессов, изменения событий в процессах);
- локальные изменения в модели (например, замена компонент модели внешне эквивалентными, но более точными);
- изменение некоторых параметров, используемых в качестве калибровочных.

2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

После того как завершена верификация ИМ и достигнута адекватность модели реальному объекту, необходимо исследовать свойства ИМ [1,3]. Наиболее существенными являются следующие процедуры исследования модели:

- оценка погрешности имитации, обусловленной наличием в ИМ неидеальных генераторов случайных чисел;
- определение длительности переходного режима в работе ИМ;
- оценка устойчивости результатов имитации исследуемых процессов;
- исследование чувствительности ИМ, т.е. зависимости изменения Y от изменения X .

2.3.1 Оценка погрешности имитации, обусловленная наличием в ИМ генераторов случайных чисел. В любой вероятностной ИМ сложной системы применяются генераторы случайных чисел. Как правило, система автоматизации моделирования предоставляет в распоряжение исследователя несколько различных генераторов случайных чисел. Каждый из них использует базовый генератор, числа с выхода которого затем преобразуются для получения случайных величин с заданными законами распределения. Оказывается, что такой генератор является источником погрешности имитации.

Чем и как оценить эту погрешность? Как показала практика исследования вычислительных систем на ИМ, зачастую достаточно определить оценки математического ожидания и дисперсий отклонений компонент вектора откликов Y .

В серединной точке области изменения входных переменных модели X организуется несколько (рекомендуется $N=10$) прогонов модели с одними и теми же значениями X и G , но с разными начальными значениями для базовых генераторов случайных чисел ξ_{0j} . В системе моделирования GPSS World каждый j -й прогон соответствует выбору j -го генератора случайных чисел RN_j . Для каждого j -того прогона модели вычисляются значения k -й компоненты ($k=1, \dots, n$) вектора отклика Y_{jk} . Например, в качестве таких компонент могут выступать коэффициенты загрузки устройств, средние длины очередей, средние времена пребывания заявок в очереди, средние числа занятых каналов и так далее. В результате получают выборки значений отклика $\{Y_k\}$ при использовании различных генераторов случайных чисел. Размер выборки равен числу используемых генераторов. По выборкам определяют оценки математического ожидания и дисперсии. Такими оценками являются соответственно $\bar{Y}_k$ и $\bar{D}_k$, вычисляемые по формулам (1). Определяется доверительный интервал нахождения истинного значения математического ожидания k -ой компоненты отклика Y_{ku} . Можно допустить нормальность распределения отклонения Y_{ku} от истинного значения Y_{ku} . Поскольку объемы выборок малы (исполь-

зуется $N=10$ различных генераторов), то для нахождения доверительных интервалов используется t -статистика

$$t = (\bar{Y}_k - Y_{ku}) \sqrt{\frac{N-1}{D_k}}, \quad (7)$$

имеющая распределение Стьюдента. Задавшись уровнем значимости $\alpha = 0,05$, можно с вероятностью 0,95 утверждать, что истинное значение $Y_{ли}$ лежит в пределах

$$\bar{Y}_k - t_{0,05} \sqrt{\frac{D_k}{N-1}} \leq Y_{ku} \leq \bar{Y}_k + t_{0,05} \sqrt{\frac{D_k}{N-1}}, \quad (8)$$

где $t_{0,05}$ — значение t -статистики, определяемое при $(N-1)$ степенях свободы и уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Доверительный интервал для среднего значения k -ой компоненты вектора отклика (при $N=10$ и $\alpha = 0,05$ можно записать в виде

$$\bar{Y}_k \pm d_k = \bar{Y}_k \pm 0,753 \sqrt{\frac{D_k}{N-1}}. \quad (9)$$

Значение d_k и определяет погрешность k -ой компоненты отклика модели. Затем из всех d_k находят максимальное значение, которое в данном случае и будет верхней границей погрешности, связанной с использованием в ИМ генераторов случайных величин.

Результаты оценки погрешности генераторов рекомендуется представить в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты исследования погрешности имитации, обусловленная наличием в ИМ генераторов случайных чисел

Компоненты отклика	Генераторы случайных чисел					Оценки выборки		Погрешность компонент
	RN ₁	...	RN _j	...	RN ₁₀	$\bar{Y}_k$	$\bar{D}_k$	
Y_1								
...								
Y_k								
...								
Y_n								

После того как погрешность оценена, и она оказалась достаточно высокой, исследователь должен пересмотреть состав генераторов случайных чисел и процедуру использования самих генераторов в ходе имитации.

2.3.2 Определение длительности переходного процесса. Одно из основных отличий имитационных экспериментов от натуральных испытаний объекта моделирования заключается в простоте повторения и воспроизведения условий эксперимента, а так же в простоте запуска, прерывания и возобновления эксперимента. Это позволяет экспериментатору полностью контролировать модельный эксперимент. Обычно ИМ применяются для изучения системы в типичных для нее и повторяющихся изо дня в день условиях. Но в большинстве стохастических моделей требуется некоторое время T_0 для достижения моделью необходимого установившегося состояния. Поэтому исследователь должен позаботиться об уменьшении влияния начального периода моделирования или его исключения из результатов моделирования.

Существуют три способа уменьшения влияния начального периода на динамику моделирования сложной системы:

- использование длинных прогонов модели;
- исключение из рассмотрения начального периода прогона;
- выбор такого начального условия, которое ближе всего к типичному.

Первый подход можно применять только в случае, если прогон модели не требует много машинного времени. При втором подходе часть машинного времени тратится бесполезно и из-за сокращения объема выборки увеличивается дисперсия отклика модели Y . При этом весьма трудно установить, когда заканчивается переходный процесс. Не существует полностью надежных методов для решения вопроса о том, достигнуто ли установившееся состояние или нет. Установившееся состояние вовсе не означает, что переменная отклика достигла некоторого постоянного уровня. Переменная отклика продолжает изменяться присущим ей образом. Под статистическим равновесием или установившимся состоянием понимается такое, в котором противодействующие влияния сбалансированы и компенсируют друг друга. Предполагается, что для каждой стохастической модели существует распределение вероятностей значений отклика, являющееся характеристикой системы. Модель находится в равновесии, когда отклик не выходит за предельные значения.

Для отделения переходного режима от стационарного у исследователя должна быть возможность наблюдения за моментом входа контролируемого параметра моделирования в стационарный режим. Это можно осуществить, например, путем наблюдения за длиной очереди заявок к наиболее загруженной компоненте модели. Такой контроль может быть выполнен на любой компоненте модели, если исследователь предполагает, что она позже всех входит в стационарный режим. Необходимо задать временной интервал, по окончании кото-

рого происходит вычисление средней длины очереди. Проверку можно выполнить по критерию Вилкоксона, который требует задания уровня значимости. С интервалов времени Δt проводится сравнение соседних значений средних длин очереди l_k и l'_k , $k = \overline{1, m}$ где m — объем выборки; k — номера замеров длины очереди. С помощью критерия Вилкоксона проверяется гипотеза H_0 об однородности двух выборок: $\{l_k\}$ и $\{l'_k\}$. Предполагается, что обе выборки взаимно независимы и извлечены из одной и той же генеральной совокупности и, следовательно, функции распределения случайных величин одинаковы. Эту гипотезу можно выразить тождеством

$$H_0 : p\{l \leq x\} \equiv p\{l' \leq x\}, \quad x < \infty,$$

и воспользоваться для ее проверки ранговым критерием. На первом этапе реализации процедуры проверки гипотезы об однородности производится объединение случайных величин l_k и l'_k в один вариационный ряд в порядке возрастания их значений. В результате формируется последовательность типа

A A B A A A B B B B ... A B B

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ... N-2 N-1 N,

где буквами A и B обозначены члены вариационного ряда, принадлежащие выборкам $\{l_k\}$ и $\{l'_k\}$ соответственно. Каждому члену объединенной выборки приписываются ранги r_q , обозначающие порядковые номера в этой выборке, $q = \overline{1, N}$, $N = 2m$. На основании установленных рангов вычисляется значение статистики Вилкоксона

$$W_l = \sum_{q=1}^N r_q \quad (10)$$

Проверка гипотезы об однородности производится на основе неравенства

$$w_1(\alpha) \leq W_l \leq w_2(\alpha), \quad (11)$$

где $w_1(\alpha)$ и $w_2(\alpha)$ - нижняя и верхняя границы статистики Вилкоксона при уровне значимости α ($0 < \alpha < 1$). Если неравенство выполняется, то гипотеза H_0 принимается. Верхняя и нижняя границы вычисляются исходя из соотношений:

$$w_1(\alpha) = \frac{m(2m+1)-1}{2} - \psi \sqrt{\frac{m^2(2m+1)}{12}},$$

$$w_2(\alpha) = m(2m-1) - w_1(\alpha), \quad (12)$$

где $\psi = \arg \Phi(1 - \alpha/2)$; $\arg \Phi(x)$ означает функцию, обратную функции нормального закона распределения.

Не всегда целью моделирования является исследование поведения системы в стационарном режиме. Бывают случаи, когда предмет имитации является переходный режим, имеющий место в реальной системе. Но и в этих случаях важно уметь уловить момент окончания переходного режима в модели, чтобы завершить имитацию, не затратив лишних вычислительных ресурсов.

2.3.3 Оценка устойчивости результатов имитации. Под устойчивостью результатов имитации будем понимать степень нечувствительности ее к изменению входных условий. Универсальной процедуры такой проверки не существует, но довольно часто используется апостериорная проверка. Она состоит в сравнении предсказаний модели и результатов измерений после того, как будет произведено какое-либо изменение в установке, предусмотренной в исследовании.

Практика моделирования вычислительных систем показала, что устойчивость результатов моделирования можно оценивать дисперсией значений отклика (по выбранной компоненте). Если эта дисперсия при увеличении времени моделирования T_u не увеличивается, значит результаты моделирования устойчивы. Результаты исследования статистической устойчивости ИМ рекомендуется представить в виде таблицы, указав используемое модельное время и дисперсию, вычисленную для конкретных компонентов отклика модели.

Таблица 2 — Результаты исследования статистической устойчивости модели

Модельное время	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
Дисперсия компоненты 1 отклика модели	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
...	...	...	...	...	...
Дисперсия компоненты i отклика модели	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
...	...	...	...	...	...
Дисперсия компоненты n отклика модели	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5

Кроме указанной методики оценки дисперсии может иметь место следующая. В модельном времени t_0 задаются шаг Δt контролирования показателя качества Y и число шагов h для контроля, а также экспертное значение изменения контролируемого параметра ΔY_{ε} . По

достижении стационарного состояния оценивается амплитуда изменений параметра Y и вычисляется модуль амплитуды как функции от h . Каждый раз при этом проверяется выполнимость неравенства $|\Delta Y| \leq \Delta Y_0$. Если на всем интервале исследования Y окажется в заданных пределах, то считается, что модель находится в устойчивом состоянии. Рост разброса контролируемого параметра от начального значения при изменении h указывает на неустойчивый характер имитации исследуемого процесса.

2.3.4 Исследование чувствительности имитационной модели.

Исследователь должен установить диапазон изменения отклика модели Y при изменении каждой компоненты вектора входных переменных X . В зависимости от диапазона изменения откликов Y определяется стратегия планирования экспериментов на ИМ. Если при значительной амплитуде изменений некоторой компоненты вектора входных переменных модели X отклик Y меняется незначительно, то это означает, что точность представления этой компоненты в ИМ не играет существенной роли. Кроме того, в планировании имитационных экспериментов эта компонента не будет использоваться как основная. Если же отклик модели Y окажется высокочувствительным к изменению некоторой компоненты вектора X , то это служит прямым указанием на необходимость представления ее в модели с максимально возможной точностью.

Вторым не менее важным моментом исследования чувствительности модели является проверка зависимости отклика модели Y от изменения параметров модели G . Меняя характеристики G в обе стороны на некоторую величину ΔG , исследователь оценивает диапазон изменений вектора отклика модели δY . Если δY незначителен, то требования к точности задания модели в параметров могут быть не существенными. В противном случае измерение характеристик G^* , по которым строится модель параметров G , и сами способы стабилизации значения G в модели должны быть высокоточными. Анализ поведения приращения отклика модели δY при колебаниях X и G иногда позволяет скорректировать алгоритмы ИМ в сторону их упрощения.

Определение чувствительности параметров ИМ лучше всего проводить в центральной точке пространства изменения параметров. Выбор центральной точки осуществляется, как правило, на основании априорных суждений и носит неформальный характер. Исходя из тех же априорных сведений, пользователь должен задать интервал изме-

нения каждой компоненты вектора параметров X модели системы.

Например, область изменения показателей качества можно определить следующим образом. Каждая q -я компонента вектора X отклоняется от значения его в центральной точке в обе стороны на длину выбранного интервала его изменения ($\min X_q$, $\max X_q$). Остальные компоненты вектора X остаются без изменения и соответствуют центральной точке. При указанных значениях вектора входных переменных X проводится пара модельных экспериментов и вычисляются отклики модели ($\min Y$, $\max Y$), где $\min Y$ и $\max Y$ означают соответственно векторы отклика, полученные при минимальном и максимальном значениях q -й компоненты вектора X . Вычисляется приращение q -й компоненты вектора параметров модели

$$\delta X_q^0 = \frac{(\max X_q - \min X_q) * 2}{(\max X_q + \min X_q)} 100\%, \quad (13)$$

которое и будет приращением вектора параметров X при изменении только одной компоненты q . Находится приращение n -й компоненты вектора отклика

$$\delta Y_n = \frac{|\max Y_n - \min Y_n| \cdot 2}{(\max Y_n + \min Y_n)} 100\%. \quad (14)$$

Изменение вектора отклика Y можно определять либо модулем вектора приращений (δY_n , $n=1, \dots, L$; L — размерность вектора отклика), либо максимальным значением из δY_n . Чаще всего исследователи останавливаются на втором способе, когда в качестве изменения вектора отклика выбирают $\delta Y_q^0 = \max\{\delta Y_n\}$, где δY_n вычисляются по формуле (14).

Итак, чувствительность модели по q -й компоненте вектора X определяется парой значений ($\delta X_q^0, \delta Y_q^0$). Эта пара чисел показывает, на сколько процентов может измениться отклик модели при увеличении q -й компоненты параметров на δX_q^0 процентов. Затем подобным образом поступают с остальными компонентами вектора параметров X . В результате получают множество пар значений $\{\delta X_q^0, \delta Y_q^0\}$,

$q=1, \dots, h$, где h — размерность вектора входных переменных модели X .

При исследовании статистической чувствительности ИМ в качестве варьируемых параметров предлагается рассмотреть:

— X — среднее время поступления заявок в систему (если входных потоков два, то для каждого из потоков X_1 и X_2);

— G_i — средние времена обработки заявок устройствами (выбрать по усмотрению два-три устройства).

Определить реакцию модели на изменение входных и внутренних параметров модели по трем компонентам вектора отклика, например:

- среднее время пребывания заявки в модели;
- коэффициенты загрузки устройств;
- средние длины очередей и средние времена пребывания в них;
- среднее число занятых каналов (для многоканальных устройств).

Результаты исследований для каждого из выходных параметров рекомендуется представить в таблице 3.

Таблица 3 — Результаты исследования чувствительности модели по выходной компоненте вектора отклика модели Y .

Изменяемые величины		X_1		G_1		G_2	
Прогоны модели	1	$\min X_1$	$Y(\min X_1)$	G_1 среднее		G_2 среднее	
	2	$\max X_1$	$Y(\max X_1)$	G_1 среднее		G_2 среднее	
	3	X_1 среднее		$\min G_1$	$Y(\min G_1)$	G_2 среднее	
	4	X_1 среднее		$\max G_1$	$Y(\max G_1)$	G_2 среднее	
	5	X_1 среднее		G_1 среднее		$\min G_2$	$Y(\min G_2)$
	6	X_1 среднее		G_1 среднее		$\max G_2$	$Y(\max G_2)$
Диапазон изменения параметров и отклика модели		$\delta X, \%$	$\delta Y_1, \%$	$\delta G_1, \%$	$\delta Y_1, \%$	$\delta G_2, \%$	$\delta Y_1, \%$

Этой информации, как правило, бывает достаточно для ранжирования компонент вектора входных переменных модели X по значению чувствительности вектора отклика модели. Если модель оказывается мало чувствительной по какой-либо q -й компоненте вектора парамет-

ров модели X_q , то исследователь может не включать в план имитационного эксперимента анализ изменения X_q , чем достигается экономия ресурса времени моделирования.

3. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Цель выполнения курсового проекта — построение имитационной модели предложенной вычислительной системы неоднородной структуры, сбор статистики и исследование свойств разработанной модели.

Для моделирования предложена схема распределенного вычислительного центра обработки и хранения данных, далее распределенная вычислительная система (РВС), неоднородной структуры (рисунок 1).

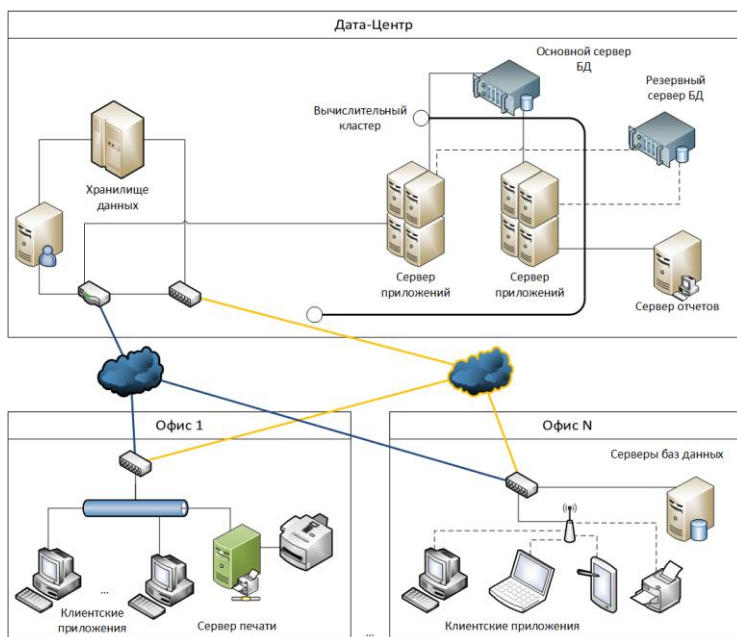


Рисунок 1 — Обобщенная схема распределенного вычислительного центра обработки и хранения данных

В качестве объекта моделирования студенту необходимо выбрать, согласно варианту, одну из подсистем РВС.

В рамках выполнения курсовой работы необходимо:

— выбрать структуру подсистемы РВС, представленной модели

(см. приложение А);

— разработать имитационную модель системы в среде GPSS World [4];

— провести целенаправленные эксперименты с моделью;

— оценить погрешности имитации функционирования РВС, обусловленные наличием в ИМ генераторов псевдослучайных чисел;

— определить длительность переходного процесса;

— провести статистическую оценку устойчивости и чувствительности модели к изменению параметров и входных переменных;

— используя известные статистические методы, построить функцию распределения времени пребывания заявок в системе.

Общее описание входных данных для подсистем РВС:

— Входной поток заявок в системе предполагается простейший с заданным средним временем поступления заявок.

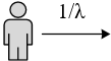
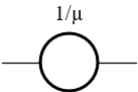
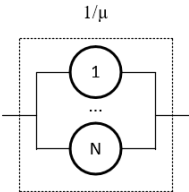
— Времена обработки заявок в узлах обработки и передачи данных распределены экспоненциально со средним временем, указанным на схеме.

— Единица измерения времен при моделировании – минуты.

— В процессе обработки запросов пользователей по обработке данных возможны коллизионные ситуации, в связи с чем запросы могут быть направлены на дообслуживание. Вероятности перехода заявок на дообслуживание указаны на схемах с обратными связями.

На структурных схемах подсистем РВС, как моделей СМО, приняты обозначения, согласно таблице 4.

Таблица 4 — Обозначения для элементов модели подсистемы РВС

Обозначение	Элемент модели
	Входной поток заявок со средним временем поступления $1/\lambda$.
А 	Канал обслуживания со средним временем обработки $1/\mu$.
В 	Многоканальное обслуживающее устройство.
	Буфер обмена с неограниченной емкостью.

Варианты для выполнения курсового проекта приведены в При-

ложении А. Номер варианта выбирается:

— для студентов ОФО — в соответствии с номером в списке группы;

— для студентов ЗФО номер варианта равен остатку от деления двух последних цифр номера зачетной книжки на 25; При делении без остатка выбрать вариант № 25.

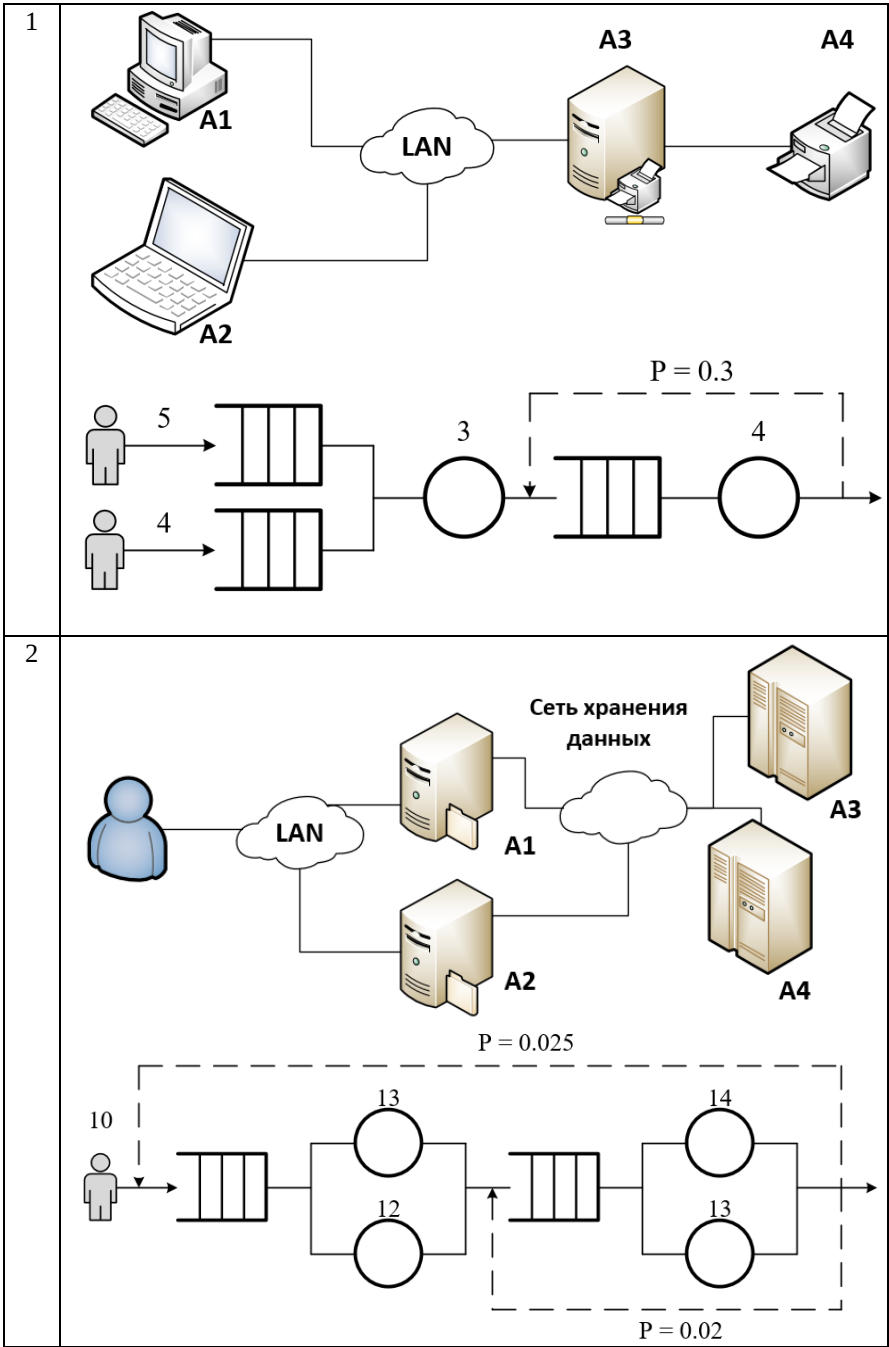
4. СОДЕРЖАНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

1. Постановка задачи.
2. Разработка имитационной модели.
3. Целенаправленные эксперименты с моделью.
4. Анализ результатов параметрического анализа и выводы о системных свойствах модели.

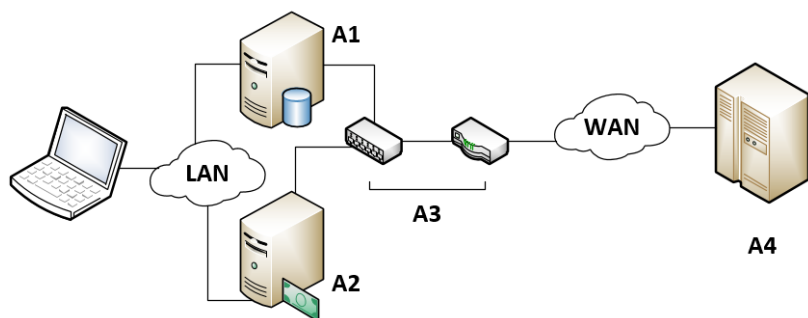
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем: учебное пособие в 3 ч. Ч.1. Математические основы / И.В. Максимей. — Минск: «Изд. Центр БГУ», 2009. — 263 с.
2. Волкова В.Н. Моделирование систем и процессов. Учебник для академического бакалавриата. / В.Н. Волкова. — М.: Издательство Юрайт, 2014. — 293 с.
3. Боев В. Д., Кирик Д. И., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование: Пособие для курсового и дипломного проектирования / В.Д. Боев, Д.И. Кирик, Р.П. Сыпченко. — СПб.: ВАС, 2011. — 348 с.
4. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: Учеб. Пособие /В.Д. Боев — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 368 с.

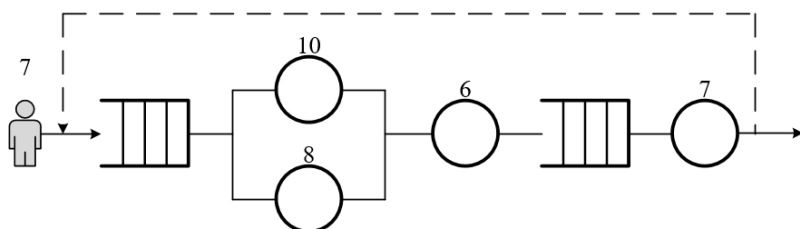
ПРИЛОЖЕНИЕ А



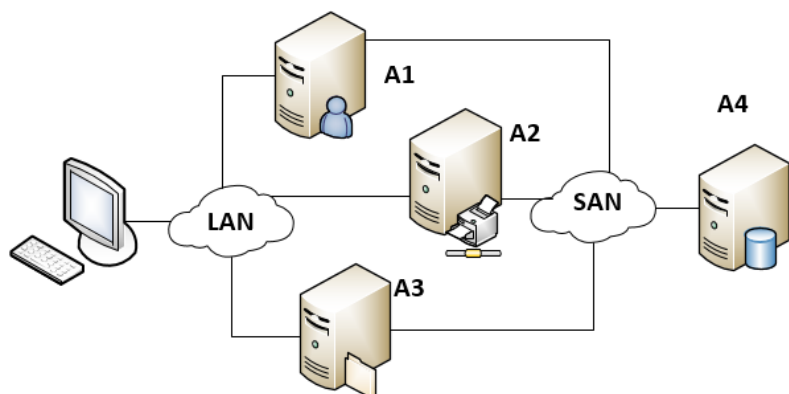
3



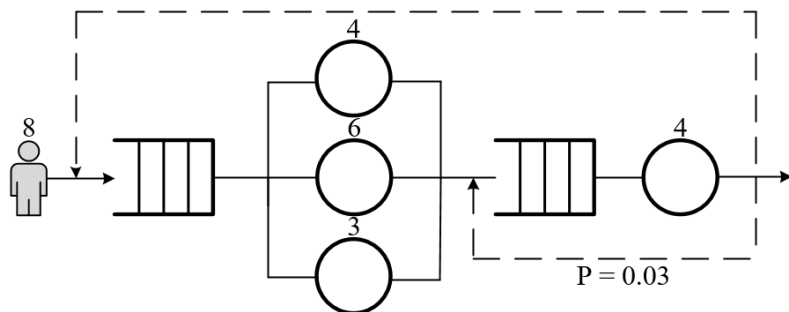
$$P = 0.05$$

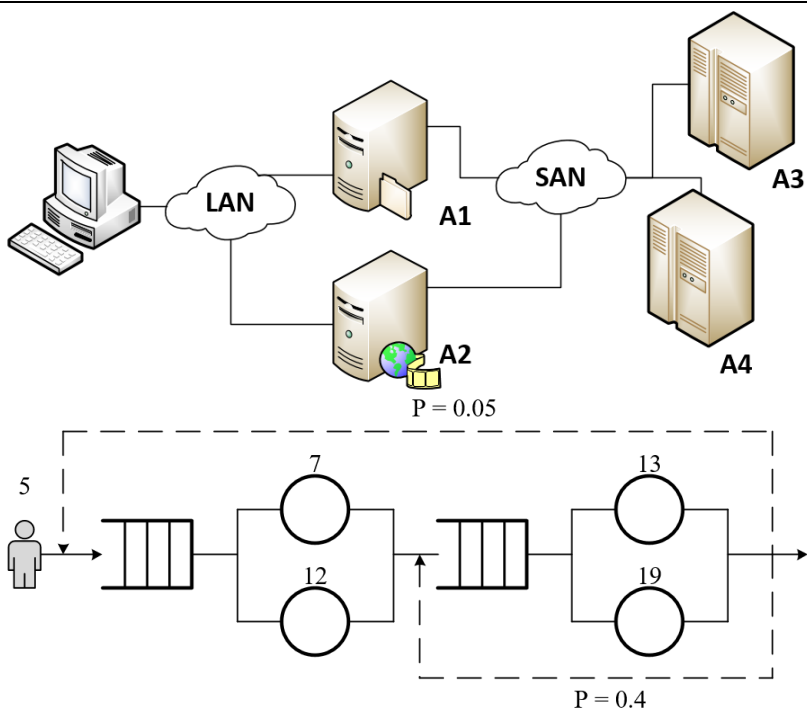
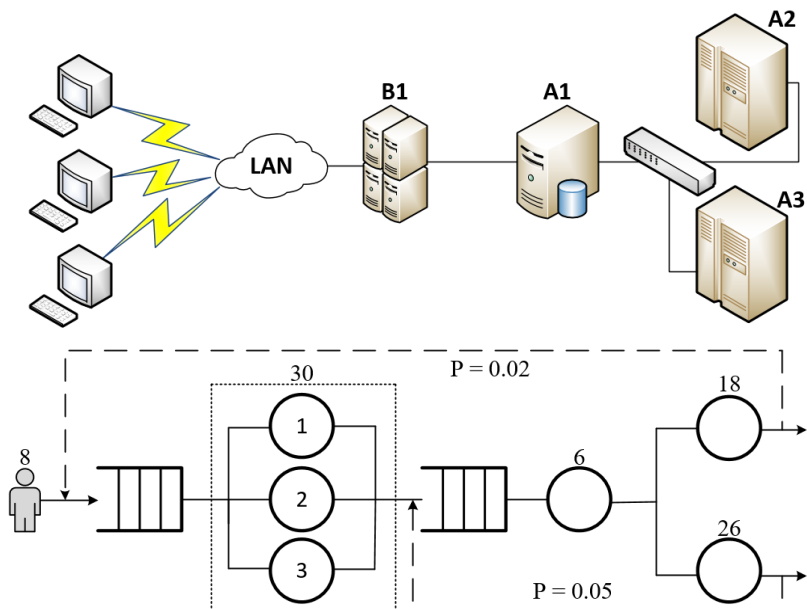


4

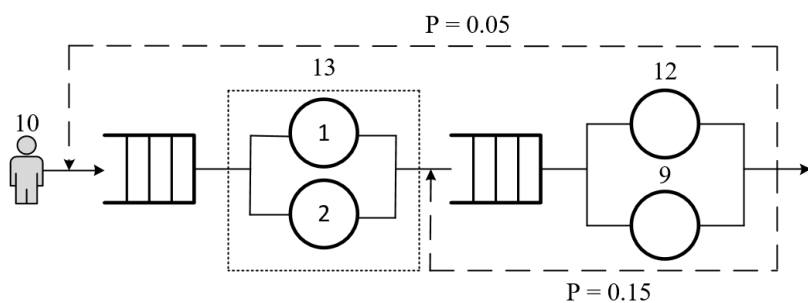
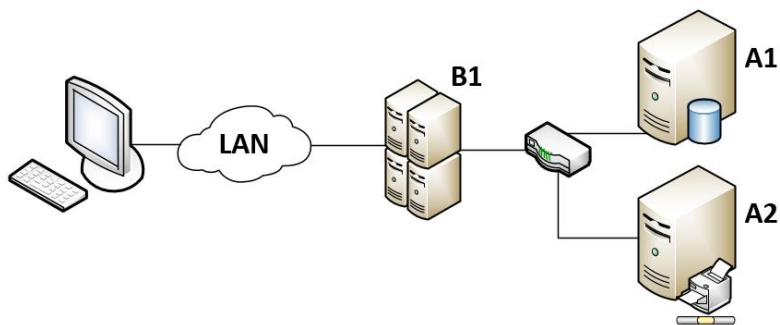


$$P = 0.02$$

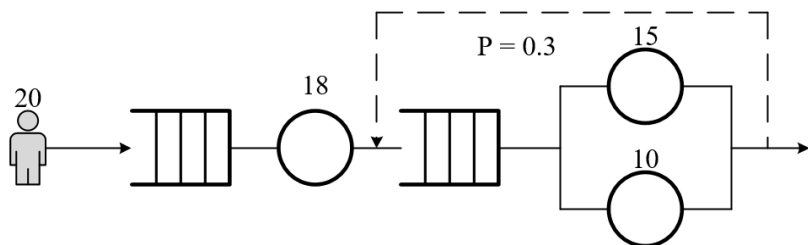
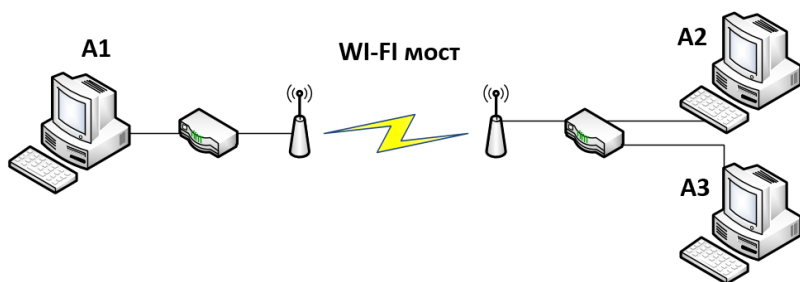


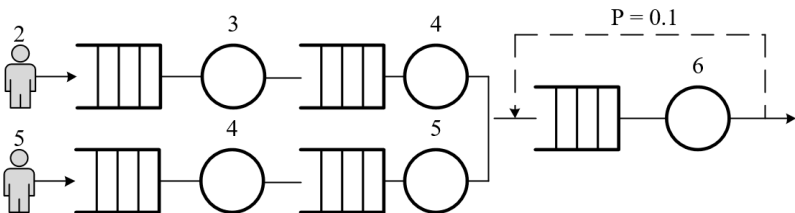
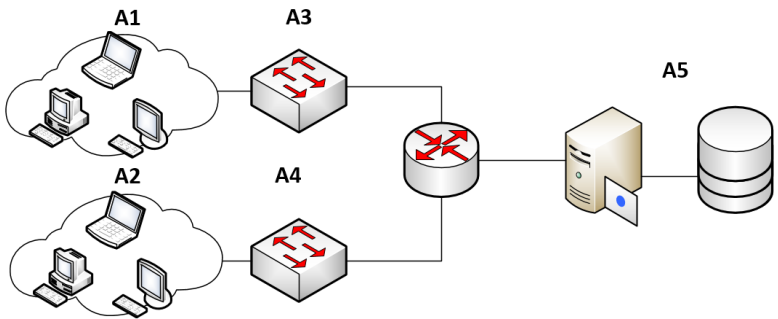
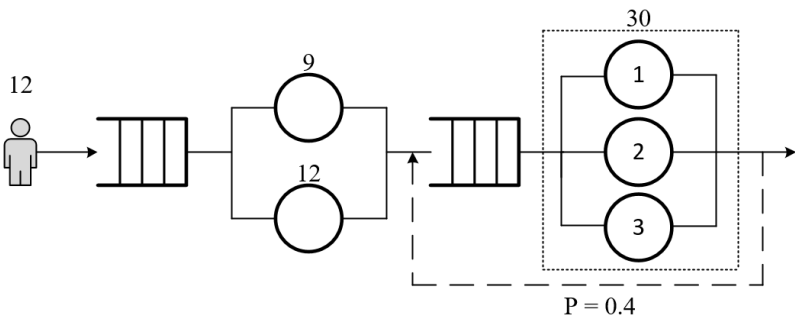
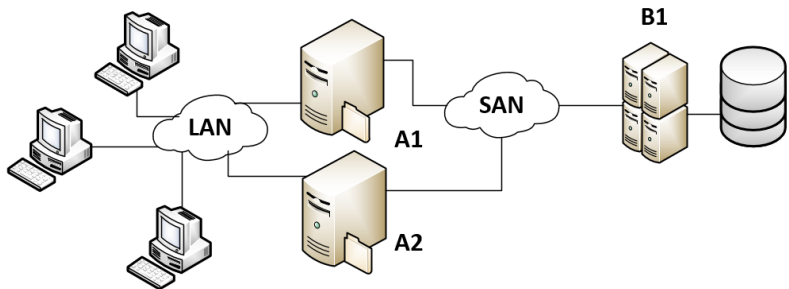


7

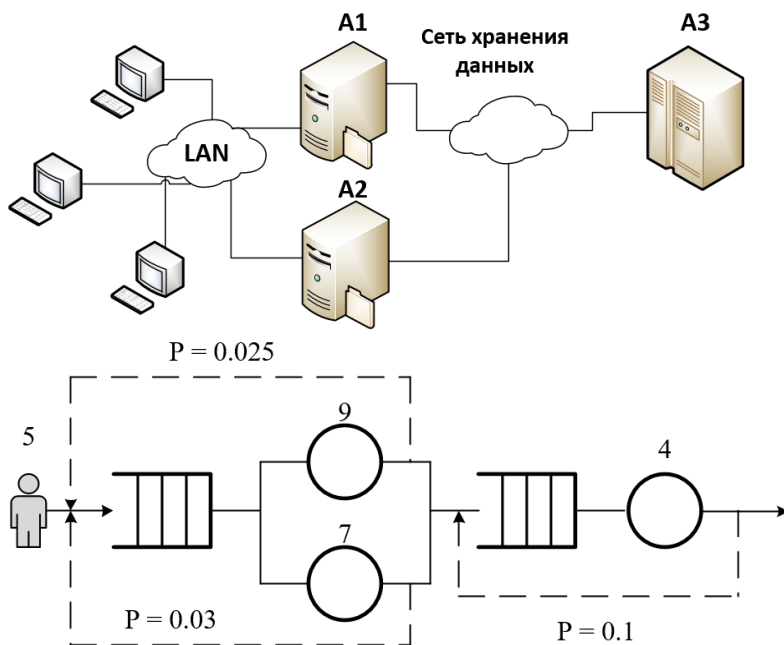


8

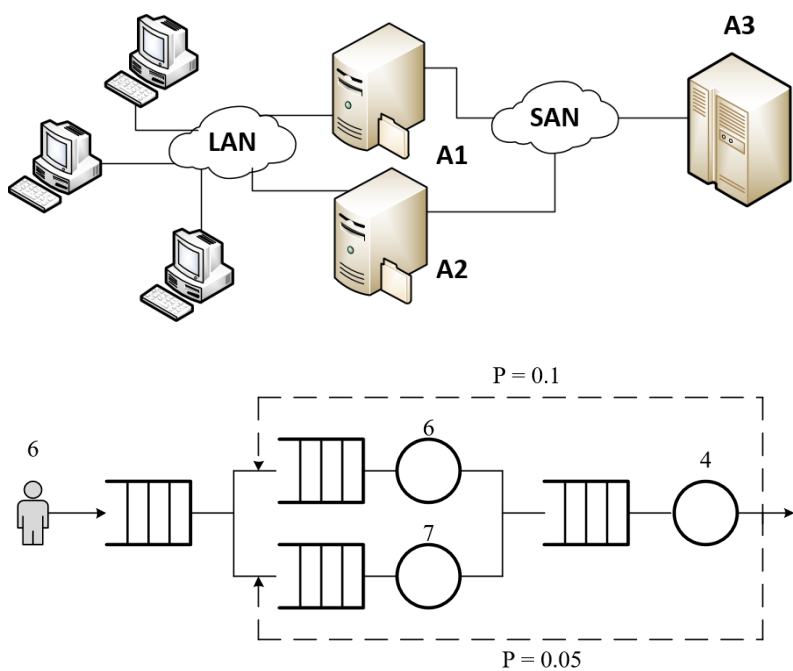




11

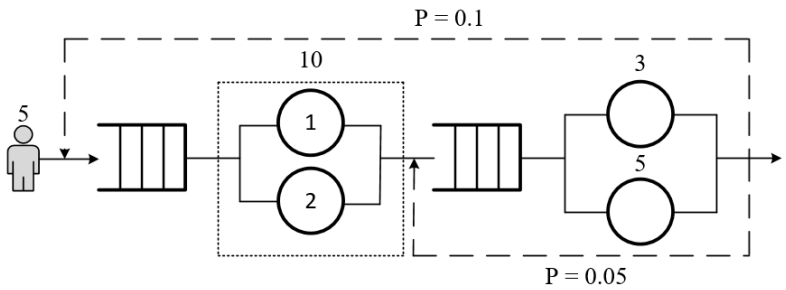
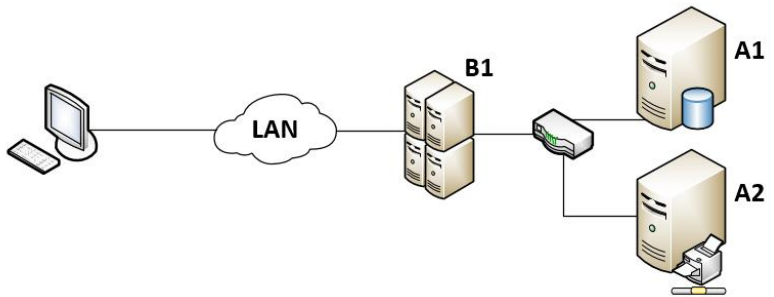


12

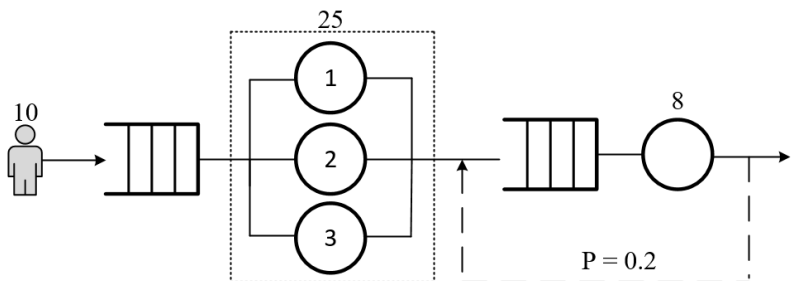
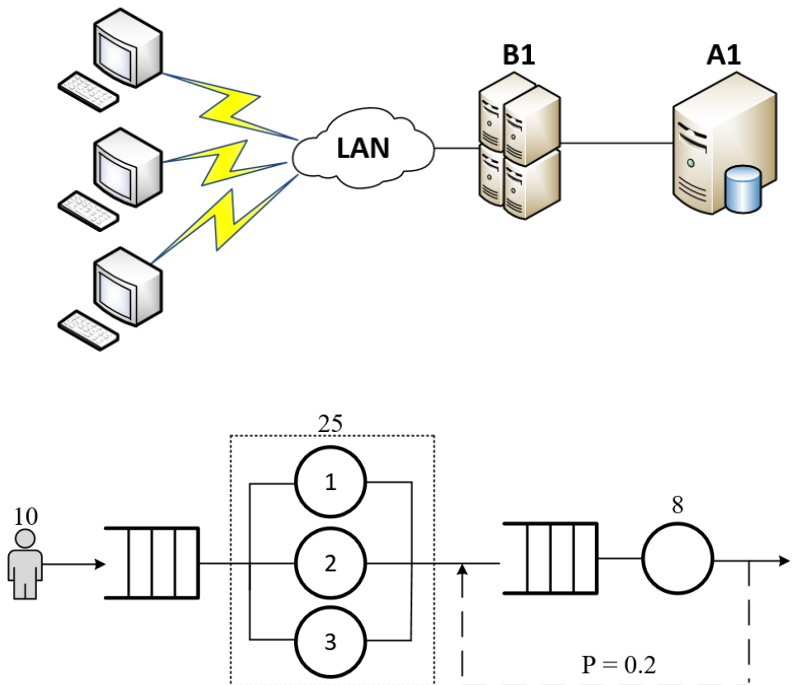


30

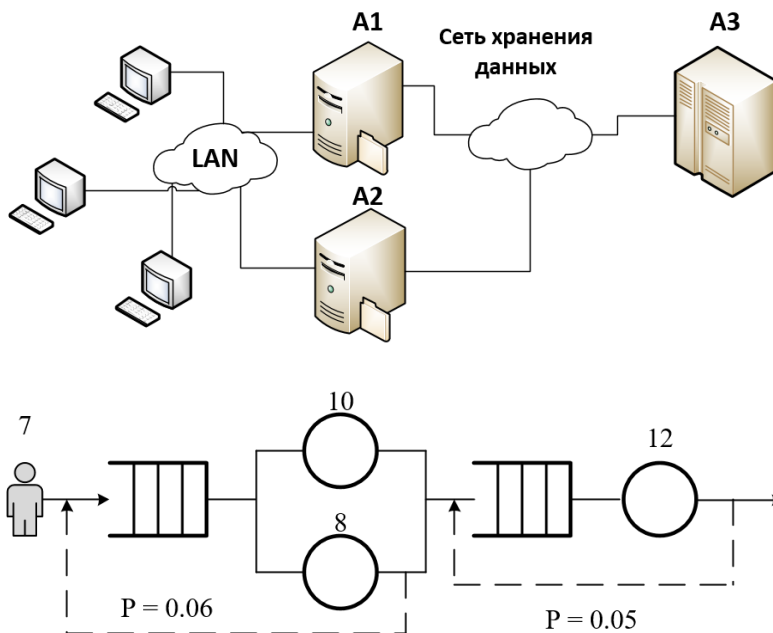
13



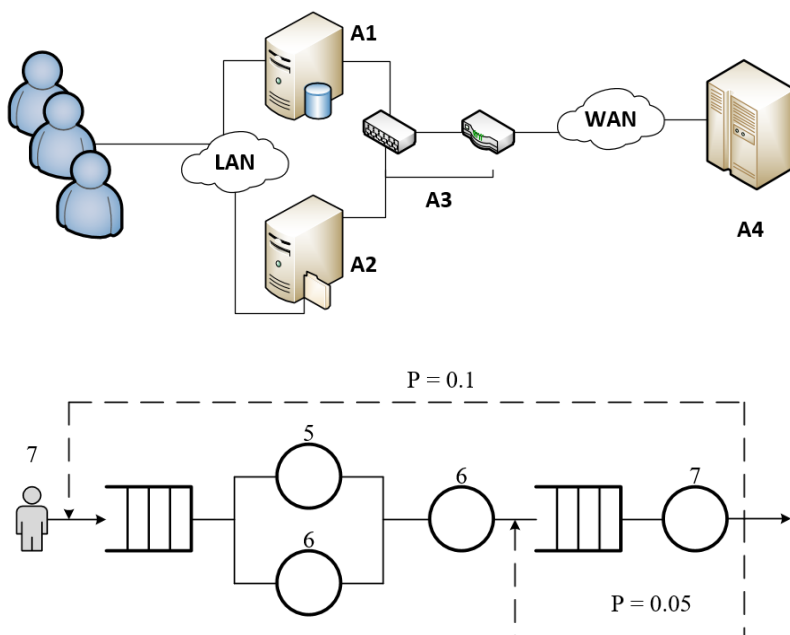
14



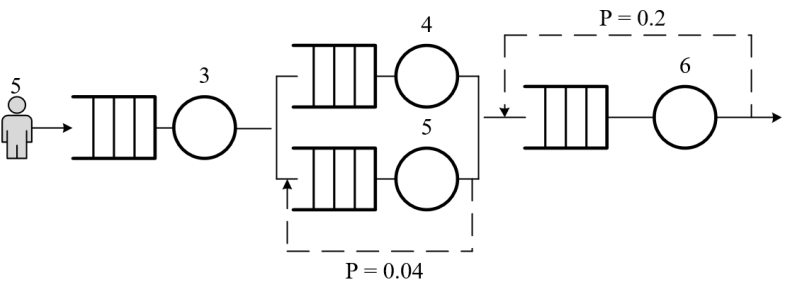
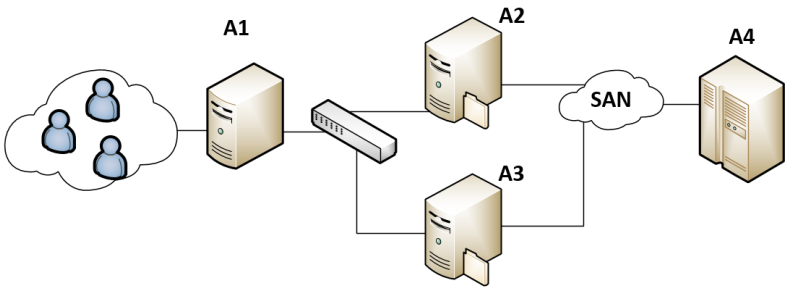
15



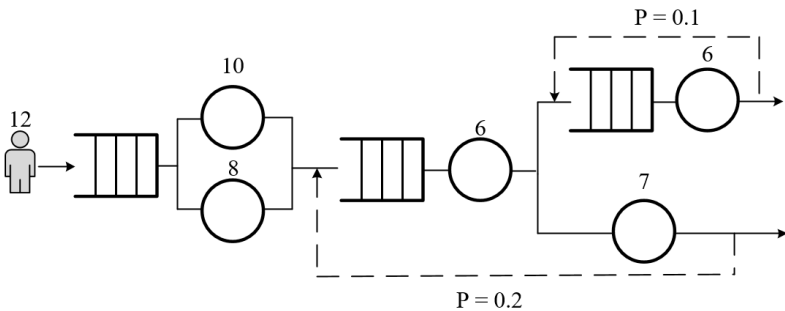
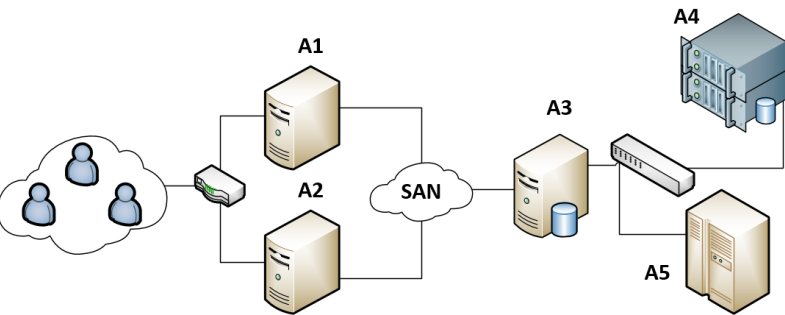
16



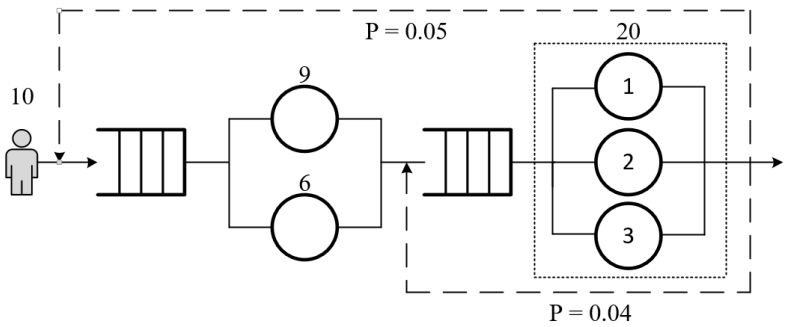
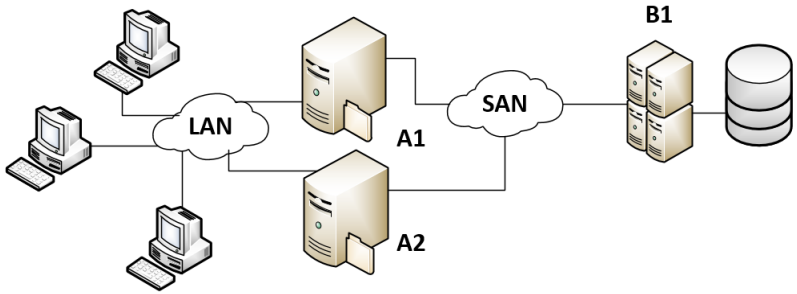
17



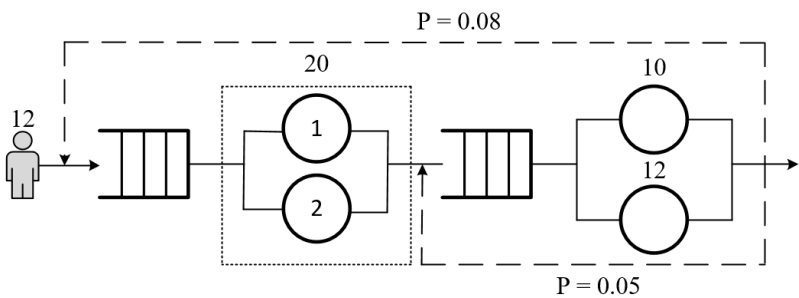
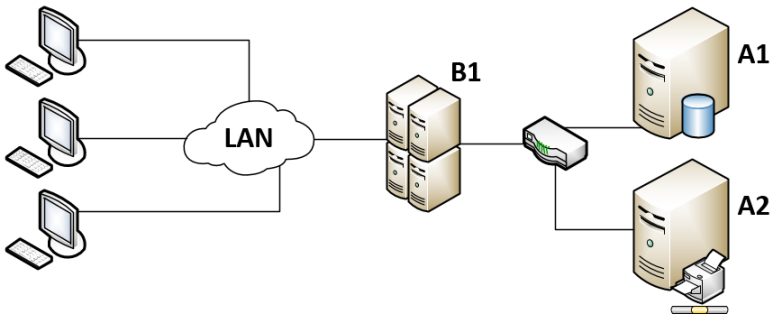
18

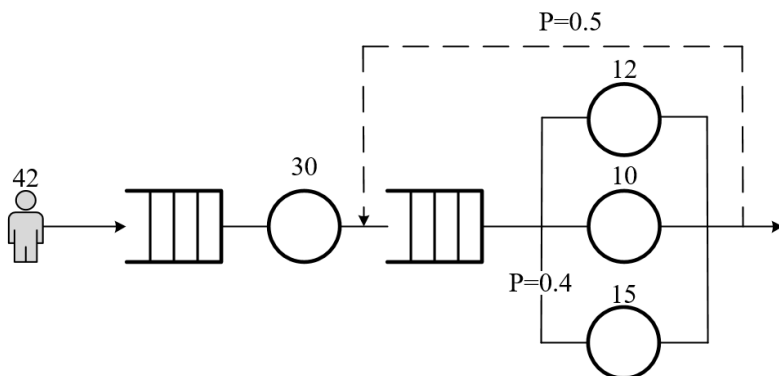
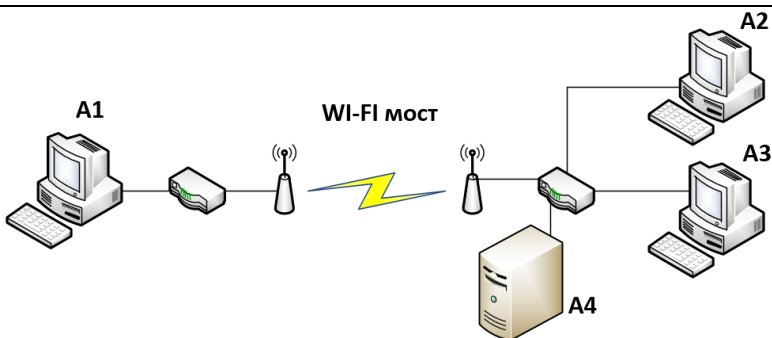
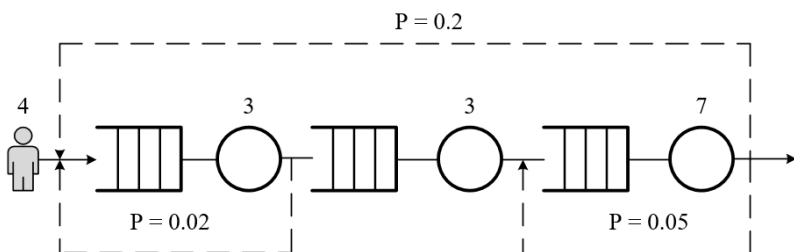
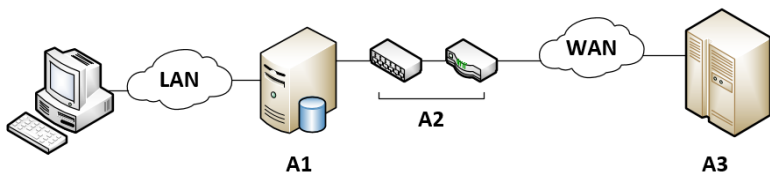


19

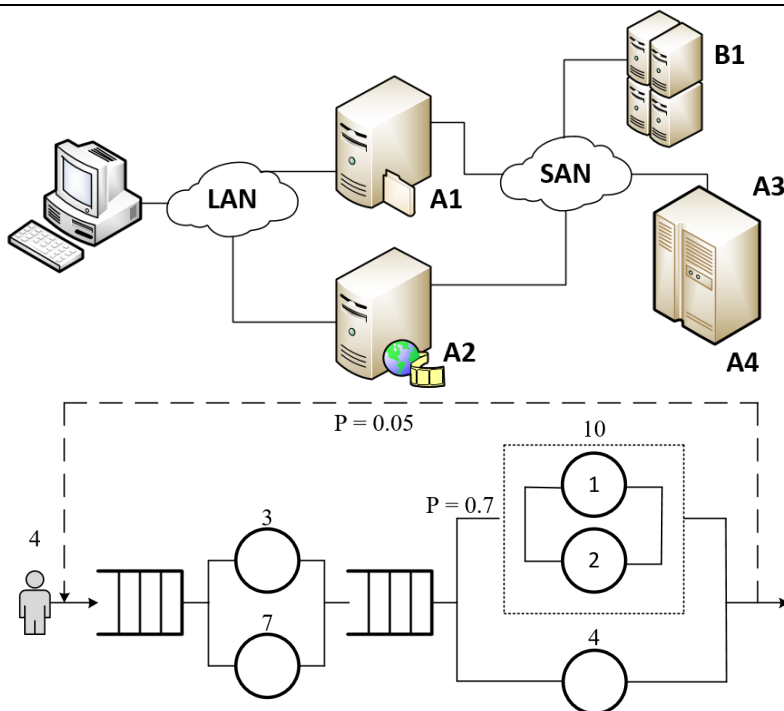


20





23



24

