

УДК 519.711.5

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОБЫТИЙ НА ОБЪЕКТАХ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

*Канд. техн. наук ШЕСТОПАЛОВА О. Е., магистр ВОРОНИН А. Н.,  
канд. техн. наук, доц. ЛИПСКИЙ В. К., студ. ЦАРИК Ф. М.,  
докт. техн. наук, доц. СЕРЕНКОВ П. С.*

*Полоцкий государственный университет,  
Белорусский национальный технический университет*

Одним из показателей качества услуги по транспортированию энергоносителей магистральным трубопроводным транспортом (МТТ) является безопасность и надежность его функционирования. Безопасность можно рас-

сматривать как отсутствие опасности, т. е. состояние защищенности жизни, здоровья и наследственности человека, имущества и окружающей среды. Под опасностью понимается источник причинения вреда. Надежность ха-

рактируется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах транспортирования. В качестве количественной меры безопасности и надежности может использоваться риск, представляющий собой сочетание вероятности возникновения неблагоприятного события и величины его последствий.

**Постановка задачи.** Основным инструментом анализа безопасности и надежности функционирования сложных систем являются методы риск-анализа, включающие в себя идентификацию опасностей, квантификацию опасностей путем оценки рисков и разработку рекомендаций по уменьшению рисков [1].

Этап идентификации возможных опасностей (неблагоприятных событий) включает в себя их обнаружение, ранжирование по значимости и получение количественных и временных характеристик, используемых в качестве исходных данных в расчете рисков. МТТ как объект риск-анализа характеризуется следующими особенностями, затрудняющими формирование исчерпывающих перечней опасностей:

- использованием опасных веществ (энергоносителей);
- структурной сложностью (распределенность, разнородность, изменчивость);
- функциональной сложностью, проявляющейся в множественности и взаимосвязи процессов – потенциальных источников опасности (транспортирование и хранение энергоносителей, сооружение и эксплуатация объектов и т. д.).

Ввиду перечисленных особенностей при решении задач этого этапа риск-анализа МТТ не существует альтернативы экспертным методам обнаружения опасностей (неблагоприятных событий). Гарантией учета максимально широкого перечня неблагоприятных событий функционирования объектов МТТ с учетом существующих взаимосвязей является комплексное использование системного и процессного подходов, так как зарождение опасностей происходит при выполнении какого-либо вида работ, т. е. в процессах, а проявление опасностей связано с функционированием производственных объектов – элементов системы [2–4].

Предметом исследования данной работы является оценка вероятности возникновения неблагоприятных событий при функционировании объектов МТТ (начальный этап риск-анализа) по результатам экспертного анализа и получения количественных оценок числа случаев с возможными результатами исходов методом имитационного вероятностного моделирования.

**Методы исследований.** Одним из способов получения комплексного описания функционирования объектов МТТ является применение методологии функционального моделирования структуры процессов IDEF0 [5], получившей в последнее время широкое распространение. Так, в США она принята в виде федерального стандарта FIPS 183 [6], в России – в виде рекомендаций по стандартизации Р 50.1.28–2001 [7], в Беларуси – в виде методических рекомендаций ТК РБ 4.2-МР-05–2002 [8].

IDEF0 разработана на основе методологии структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis and Design Techniques). В ее основе лежит универсальный графический язык моделирования систем, позволяющий ограниченным набором структурных примитивов и связей описывать иерархию процессов любой системы с достаточной полнотой и наглядностью. При построении модели с использованием IDEF0 применяют декомпозицию сложных функций и связей системы глубиной, как правило, не более четырех уровней [4, 6]. Полученное модельное описание в дальнейшем используется для анализа процессов с целью определения путей обеспечения безопасности и надежности, уточнения распределения полномочий и ответственности и т. п.

На этапе квантификации вероятности возникновения неблагоприятных событий на основании количественных и временных характеристик функционирования объектов МТТ, полученных экспертными методами, расчет осуществляется по результатам имитационного статистического моделирования. В имитационном моделировании систем с вероятностной природой случайные значения параметров модели задаются с помощью генераторов псевдослучайных чисел, реализованных по заданному закону распределения. Один «прогон» модели дает одну реализацию случайного процесса, поэтому для получения достоверных оценок

требуется представительная выборка, т. е. большое число модельных экспериментов [9].

В качестве среды реализации имитационной модели использовалась система GPSS World, предназначенная для статистического моделирования систем с дискретными и непрерывными процессами функционирования. В GPSS World модель сложной системы представляется совокупностью элементов и логических правил их взаимодействия в процессе функционирования, причем набор логических правил ограничен и описывается стандартными операторами. В GPSS World реализован событийный алгоритм управления временем – шаг приращения модельного времени является переменным и равен времени наступления ближайшего события в системе, поэтому, кроме комплекса описаний объектов и логических операторов, в составе системы GPSS World имеется программа-планировщик, которая выполняет следующие функции:

- продвижение по заданным маршрутам динамических объектов модели (заявок, задач, объектов материальных потоков технологических систем и т. п.);
- планирование событий, происходящих в модели, путем регистрации времени наступления каждого события и выполнения их в нарастающей временной последовательности;
- регистрацию статистической информации [10].

**Идентификация неблагоприятных событий и постановка задачи оценки рисков.** Объектом анализа в данной работе являлись процессы, связанные с функционированием оборудования МТТ – газоперекачивающий агрегат ГПА-16-01 в составе основного и резерв-

ного агрегатов, находящихся в реальной эксплуатации на предприятии по транспортированию газа. Оба газовых газоперекачивающих агрегата (далее – ГПА1 и ГПА2) функционируют в режиме периодических отказов с заменой отказавшего оборудования на резервное и восстановлением (ремонт) отказавшего оборудования для последующего резервирования.

Процессы, связанные с функционированием газоперекачивающего агрегата, записанные при помощи языка функционального моделирования методологии IDEF0, представлены на рис. 1.

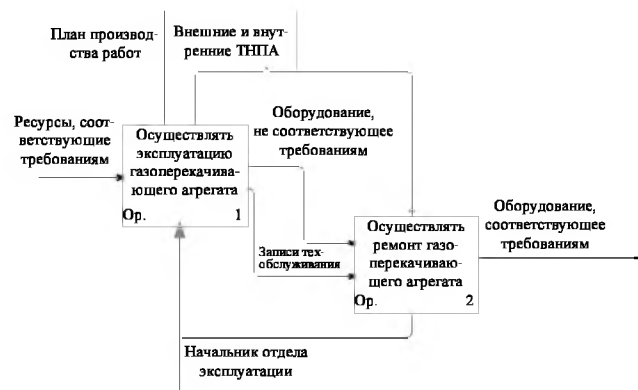


Рис. 1. Процессы, связанные с функционированием ГПА и записанные при помощи языка функционального моделирования по методологии IDEF0

Для получения вероятностей неблагоприятных событий необходимо каждый из «входов» преобразовать таким образом, чтобы каждому «входу» можно было назначить количественные значения натуральных показателей. Процессы, связанные с функционированием ГПА с преобразованными «входами», представлены на рис. 2.



Рис. 2. Процессы, связанные с функционированием ГПА с преобразованными «входами»

В результате экспертного анализа были получены следующие исходные данные для проведения анализа:

- случайное время наступления отказа ГПА1 и ГПА2 можно считать распределенным по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, составляющим 145,83 сут.;
- случайное время подключения резервного ГПА имеет равномерный тип распределения и составляет  $25 \pm 5$  мин;
- случайное время ремонта отказавшего ГПА имеет равномерный тип распределения и составляет  $2 \pm 0,2$  сут.;
- эксплуатация газокompрессорной установки осуществляется непрерывно, причем длительность одной рабочей смены обслуживающего персонала принималась равной 1 сут.

Оценка вероятности возникновения неблагоприятных событий при функционировании ГПА состояла в расчете следующих показателей:

- вероятности простоя ГПА из-за затрат времени на подключение резервного ГПА для замены отказавшего;
- возможности увеличения вероятности простоя из-за того, что на момент очередного отказа эксплуатируемого ГПА восстановление ранее отказавшего ГПА еще не будет завершено, т. е. на момент отказа в системе не окажется готового к использованию резерва;
- вероятности одновременного отказа ГПА1 и ГПА2.

**Имитационное моделирование в GPSS World.** В силу рассмотренных выше особенностей алгоритма управления модельным временем и планирования событий система GPSS World обеспечивает наибольшую простоту моделирования систем, характеризующихся дискретной сменой состояний в процессе функционирования. Примером таких систем могут служить системы массового обслуживания, обеспечивающие обработку дискретного потока заявок. События в такой системе происходят в связи с поступлением очередной заявки в систему или в связи с завершением очередного обслуживания в устройствах системы.

Основной особенностью ГПА является непрерывный характер функционирования. Агрегат обслуживает непрерывный технологический поток газа, поэтому стандартное для GPSS

World представление входного потока дискретным потоком заявок в данном случае использовано быть не может. Поэтому на начальном этапе разработки модели были приняты следующие решения:

- рассматривать в качестве входного потока в данной системе условный непрерывный поток временных интервалов, равных длительности рабочей смены (1 сут.);
- все события, происходящие в системе, идентифицировать не только по времени их наступления, но и по принадлежности к конкретной рабочей смене;
- считать основной характеристикой рабочей смены реальную длительность интервала непрерывной эксплуатации используемого газового компрессора (ГПА1 и/или ГПА2).

Последнее решение потребовало ввести в использование следующую классификацию рабочих смен:

- смена нормального режима, т. е. смена, в течение которой не возникали отказы оборудования, и, следовательно, реальная длительность непрерывной эксплуатации оборудования оказалась равной номинальной длительности смены;
- смена режима отказа, т. е. смена, в течение которой имел место отказ ГПА, и время простоя, связанное с заменой, и, следовательно, реальная длительность непрерывной эксплуатации оборудования оказалась меньше номинальной длительности смены.

В соответствии с исходными данными в моделируемой системе эксплуатируются два газоперекачивающих агрегата – ГПА1 и ГПА2. После наступления отказа используемого компрессора производится подключение резервного, который продолжает обслуживание потока газа, а отказавший ремонтируется и становится резервным. Таким образом, по условиям моделирования ГПА1 и ГПА2 эксплуатируются в режиме замещения резерва после восстановления. Для задания начальных условий моделирования были приняты предположения о том, что момент начала моделирования совпадает с запуском ГПА1, а ГПА2 находится в резерве, и оба ГПА имеют на момент начала моделирования нулевое значение времени наработки на отказ. Также приняли, что после ремонта отсчет времени наработки на отказ для ГПА

начинается заново и что это время имеет тот же тип распределения с теми же параметрами, что и время наработки на отказ нового ГПА. Очевидно, что такое предположение является приближением, однако на момент реализации описываемой версии модели авторы не располагали экспертными данными, которые позволили бы точно определить характеристики распределения времени наработки на отказ оборудования после одно- и многократного восстановления.

В процессе реализации имитационной модели в GPSS World выяснилась необходимость раздельной реализации двух типов блоков, моделирующих смены режима отказа. Различие типов обусловлено следующими особенностями наступления отказов. В режиме отказа первого типа отказ основного ГПА и подключение резерва происходит в течение одной рабочей смены. Такая ситуация для случая, когда основным является ГПА1, а после его отказа подключается и используется резервный ГПА2, приведена на рис. 3.

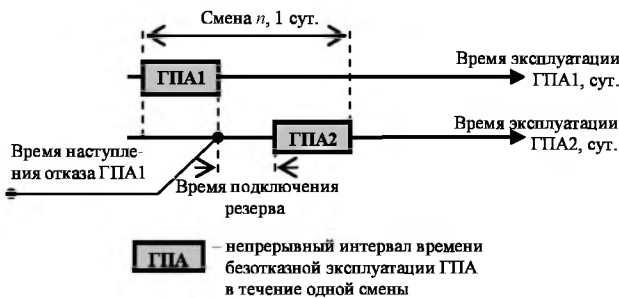


Рис. 3. Эксплуатация ГПА в режиме отказа первого типа

Как видно из ленточного графика (рис. 3), в режиме отказа первого типа подключение резерва после отказа успевает завершиться в течение одной рабочей смены, т. е. при определении реальной длительности текущей смены время подключения резерва вычитается из ее номинальной длительности.

В режиме отказа второго типа отказ наступает во время текущей смены, но подключение резерва не успевает завершиться до конца смены, т. е. завершение подключения происходит уже в следующей смене. Такая ситуация для случая, когда основным является ГПА1, а после его отказа подключается и используется резервный ГПА2, приведена на рис. 4. В этом случае для текущей смены, во время которой наступает отказ, фиксируется реальная дли-

тельность, имевшая место на момент наступления отказа, а реальная длительность следующей смены определяется вычитанием из номинальной длительности времени завершения подключения резерва.

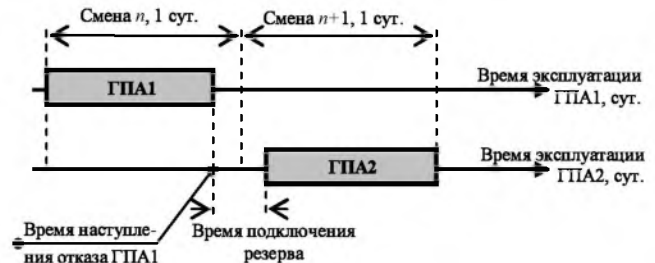


Рис. 4. Эксплуатация газокomppressorной установки в режиме отказа второго типа

**Результаты оценки вероятности неблагоприятных событий.** Расчет величины вероятности неблагоприятных событий при эксплуатации газоперекачивающего оборудования осуществлялся по формуле  $R = n/N$ , где  $n$  – число случаев возникновения неблагоприятных событий;  $N$  – общее число рабочих смен, в течение которых могло возникнуть неблагоприятное событие. Одной из основных задач оценки вероятности возникновения неблагоприятных событий являлось определение возможности увеличения вероятности простоя из-за отсутствия готового к использованию (отремонтированного) резерва на момент отказа ГПА. По результатам вероятностного моделирования, полученным в режиме статистических испытаний модели в системе GPSS World, можно утверждать, что такая возможность ничтожно мала. В имитационных экспериментах она в первый раз возникла в течение 11685 смены, т. е. через 32 расчетных года непрерывной эксплуатации системы в заданных условиях. Очевидно, что в реальных условиях длительность эксплуатации ГПА будет гораздо меньше, следовательно, принимать какие-либо меры к уменьшению этого события не требуется.

Остальные показатели риска рассчитывались для интервала времени, соответствующего периоду непрерывного функционирования газоперекачивающего агрегата до наступления первого одновременного отказа ГПА1 и ГПА2, т. е. равного 11684 рабочим сменам.

Анализ результатов имитационного моделирования, полученных в GPSS World, также показал, что из 11684 смен в течение 5258 смен

эксплуатировался ГПА1, из них 5215 смены оказались сменами нормального режима. В течение 40 смен возникал отказ первого типа и в течение одной смены – отказ второго типа. Еще две смены начались с задержкой на время завершения подключения ГПА1 после отказа ГПА2. На момент завершения моделирования ГПА1 был исправен и находится в эксплуатации. В остальное время, т. е. в течение 6426 смен, эксплуатировался ГПА2, из них 6384 оказались сменами нормального режима. В течение 40 смен возникал отказ первого типа и в течение одной смены – отказ второго типа. Еще одна смена началась с задержкой на время завершения подключения ГПА2 после отказа ГПА1. На момент завершения моделирования ГПА2 находится на восстановлении после очередного отказа. Тот факт, что полученное число отказов второго типа для ГПА2 не равно числу смен, начавшихся с задержки на время подключения ГПА1 после отказа ГПА2 (1 и 2 соответствен-

но), позволяет утверждать, что один момент наступления одного из отказов за все время моделирования пришелся строго конец текущей и начало следующей рабочей смены.

Общая вероятность простоя газоперекачивающего оборудования в течение рабочей смены из-за затрат времени на подключение резервного ГПА взамен отказавшего составляет, таким образом,  $(43 + 42)/11684 = 0,0072$ . Результат расчета вероятностей отказа ГПА1 и ГПА2 приведен в табл. 1.

Кроме показателей риска по результатам имитационного моделирования был произведен статистический анализ длительности рабочих смен. Гистограмма распределения реальной длительности рабочих смен, в течение которых имел место простой из-за затрат времени на подключение резерва, с таблицей частотности попадания значения табулируемого параметра в заданные интервалы, полученная встроенными средствами GPSS World, приведена на рис. 5.

Таблица 1

Величины вероятностей отказа ГПА1 и ГПА2

Характеристика	ГПА1	ГПА2
1. Вероятность отказа ГПА в течение рабочей смены	$41/5258 = 0,0078$	$41/6426 = 0,0064$
2. Вероятность отказа ГПА с завершением подключения резерва в течение текущей рабочей смены (отказ первого типа)	$40/5258 = 0,0076$	$40/6426 = 0,0062$
3. Вероятность отказа ГПА с завершением подключения резерва в течение следующей рабочей смены (отказ второго типа)	$1/5258 = 1,9019 \cdot 10^{-4}$	$1/6426 = 1,556 \cdot 10^{-4}$
4. Вероятность начала смены с задержкой на время остаточной работы по подключению резерва после отказа ГПА в предыдущей смене	$2/5258 = 3,8037 \cdot 10^{-4}$	$1/6426 = 1,556 \cdot 10^{-4}$

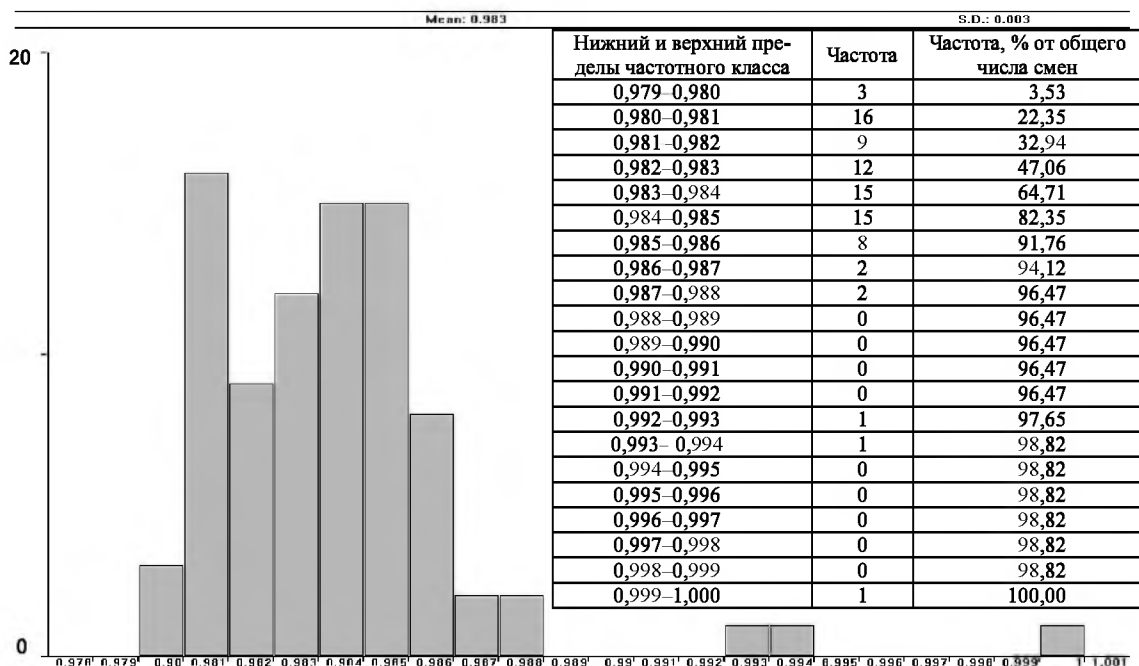


Рис. 5. Гистограмма распределения реальной длительности рабочих смен режима отказа

Как видно из таблицы, приведенной на рис. 5, реальная длительность смены, равная сумме времени безотказной работы оборудования, для трех смен режима отказа оказалась в пределах 0,979–0,98 сут., что составляет 3,53 % от общего числа смен режима отказа. Для 16 смен это значение составило от 0,98 до 0,981 сут. ( $22,35 - 3,53 = 18,82$  % соответственно) и т. д. Среднее значение реальной длительности смен режима отказа оказалось равно 0,983 сут. (значение Mean на рис. 5), а среднее квадратическое отклонение этой величины – 0,003 сут. (значение S.D. на рис. 5).

Как следует из полученных характеристик эксплуатации оборудования, за время моделирования три рабочие смены начались с выполнения работ по завершению подключения резервного оборудования. Табулирование реальной длительности этих смен позволило установить, что для одной из таких смен эта характеристика имеет значение в пределах 0,992–0,993 сут.; для второй – 0,993–0,994 сут. и для третьей – больше либо равно 0,999 сут. Также уже отмечалось, что один отказ за время моделирования наступил непосредственно в момент завершения очередной и начала следующей рабочей смены. Риск такой ситуации равен  $1/82 = 0,0122$ , где 82 – общее число отказов. Реальная длительность обеих рабочих смен, в течение которых наступал отказ второго типа, составила от 0,987 до 0,988 сут.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, осуществленный с применением выбранной методологии имитационного моделирования анализ функционирования объекта МТТ – газоперекачивающего агрегата – позволил количественно оценить вероятности неблагоприятных событий (отказов). Для получения численных значений риска отказов необходимо провести дополнительный анализ значимости негативных последствий отказов (финансовые потери). Полученные в дальнейшем значения риска дают возможность выработать рекомендации по снижению риска путем уменьшения вероятности неблагоприятных событий либо величины последствий данных событий, что позволит повысить качество предоставляемой услуги транспортирования энергоносителей. Необходимо отметить, что рассмотренную имитационную модель функционирования газоперекачивающего агрегата следует считать базовой. Так, в реализации не учитывалась повышенная интенсивность отка-

зов газоперекачивающего агрегата на этапе приработки, поскольку на момент реализации модели этот период реальной эксплуатации агрегатов уже завершился. Помимо отказов с полной потерей работоспособности агрегата в системе имеют место периодические отклонения режимных параметров от допустимых значений, которые в большинстве случаев удается ликвидировать оперативными действиями персонала, т. е. предотвратить отказ. Однако сочетание отклонений ряда режимных параметров приводит к неустраняемому отказу. Подсчет вероятностей и оценка риска таких ситуаций являются задачей модификации рассмотренной модели и предметом дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов: РД 03-418-01. Стройконсультант [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (2,5Гб). – М.: Госстрой РФ., 2002. – 4 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Воронин, А. Н. Оценка безопасности магистрального трубопроводного транспорта при техническом регулировании / А. Н. Воронин, П. С. Серенков, В. К. Липский // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – Новополоцк, 2008. – № 6. – С. 145–151.
3. Марка, Д. А. Методология структурного системного анализа и проектирования SADT: Д. А. Марка, К. Мак-Гоун [Электронный ресурс] – 2007. – Режим доступа: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=1852> – Дата доступа: 15.09.2007.
4. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов [Электронный ресурс] – 2008. – Режим доступа: [http://www.financepro.ru/2007/08/25/processnyj\\_podkhod\\_k\\_upravleniju\\_model.html](http://www.financepro.ru/2007/08/25/processnyj_podkhod_k_upravleniju_model.html) – Дата доступа: 20.04.2008.
5. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Методология описания сети процессов / П. С. Серенков, А. Г. Курьян, В. Л. Соломахо. – Минск: БНТУ, 2006. – 484 с.
6. IDEF0. “FIPS Integration Definition for Function Modeling (IDEF0),” Federal Information Processing Standards Publication 183, Computer Systems Laboratory, National Institute of Standards and Technology. – 1993. – P. 123
7. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержания жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Госстандарт России, Москва, введены пост: Р 50.1.028–2001. Госстандарта России от 02.07.2001. № 256.
8. Методические рекомендации «Методика и порядок работ по определению, классификации и идентификации процессов. Описание процессов на базе методологии IDEF0»: ТК РБ 4.2-МР-05–2002. – Минск: БелГИСС, 2002. – 45 с.
9. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем / В. П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
10. Боев, В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World: учеб. пособие / В. Д. Боев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.

Поступила 18.08.2009