



УДК 007; 681.3

О.М. ДЕМИДЕНКО*, В.С. СМОРОДИН*, Е.И. СУКАЧ*, Ю.В. ЖЕРДЕЦКИЙ*

**РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ**

*Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

Анотація. Викладається методика оцінки надійності технологічних процесів виробництва з елементами потенційної небезпеки, що враховує структурну складність технологічного циклу. Методика заснована на застосуванні апарату ймовірнісно-алгебраїчного моделювання і дозволяє визначити надійний варіант реалізації технологічного процесу виробництва з урахуванням динаміки надійності його елементів.

Ключові слова: ймовірнісно-алгебраїчне моделювання, надійність, безпека, технологічні процеси виробництва.

Аннотация. Излагается методика оценки надёжности технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности, учитывающая структурную сложность технологического цикла. Методика основана на применении аппарата вероятностно-алгебраического моделирования и позволяет определить надёжный вариант реализации технологического процесса производства с учётом динамики надёжности его элементов.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическое моделирование, надёжность, безопасность, технологические процессы производства.

Abstract. The technique of evaluating the reliability of production processes with potential hazards elements, taking into account the structural complexity of the technological cycle is stated. The technique is based on the usage of the unit probability-algebraic simulation and allows you to define a reliable embodiment of the production processes, taking into account the dynamics of the reliability of its elements.

Keywords: probability-algebraic simulation, reliability, safety, production processes.

1. Введение

Проблемы оценки надёжности и безопасности технологических процессов производства (ТПП) при наличии в их составе элементов потенциальной опасности обусловлены всё возрастающей сложностью и размерностью структур производственных объектов. Это приводит к тому, что даже незначительные сбои в ходе выполнения технологических операций (ТХО) приводят к аварийным ситуациям, снижающим эффективность работы производственных объектов и затрудняющим выбор профилактических мер по обеспечению их надёжного и безопасного функционирования.

Надёжность ТПП определяется надёжностью выполнения ТХО, как элементарных составляющих ТПП, структурой технологического цикла и своевременностью реализации управляющих воздействий, корректирующих текущие параметры производственного процесса. При выборе вариантов реализации ТПП необходимо учитывать, что их сложность и зависимость от множества случайных факторов не позволит обеспечить абсолютной надёжности реализации технологических циклов. Поэтому важно стремиться к тому, чтобы изменения надёжности отдельных подсистем и элементов исследуемых объектов не приводили к разрушительным последствиям и авариям на системном уровне. Решение такой задачи возможно лишь в рамках системного подхода, обеспечивающего единство

процессов планирования выполнения ТПП и управления, учитывающего вероятностную динамику надёжности элементов объекта в процессе реализации технологического цикла.

Несмотря на многообразие способов организации ТПП, включающих элементы потенциальной опасности, они обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать при выборе расчётных методов и средств исследования их надёжности. К ним можно отнести вероятностные параметры надёжности работы технологического оборудования, задействованного в процессе реализации технологического цикла; наличие ограничений на объем ресурсов, используемых в ходе ТПП; вероятностный характер взаимодействия элементов ТПП с системой управления; необходимость оперативной синхронизации работы элементов системы управления при появлении случайных сбоев и отказов (опасных отказов) в процессе выполнения ТХО.

Поэтому для выбора варианта реализации ТПП, обоснования управленческих решений, обеспечивающих выполнение требований надёжности и безопасности ТПП, в ходе которых могут изменяться как параметры их функционирования, так и структура технологического цикла, представляется актуальным использование метода моделирования, обеспечивающего системный подход к решению поставленной задачи. В ряде случаев имитационное моделирование позволяет решить задачи оптимизации структуры технологического процесса производства с учетом текущих значений используемых ресурсов и состояния системы в режиме реального времени [1]. Однако большая ресурсоемкость этого способа, отсутствие возможности получения вероятностной оценки влияния редких событий (опасных отказов в процессе выполнения ТХО) на надёжность реализации ТПП, а также существенные ограничения в точности получаемого решения, в ряде случаев не позволяют применить имитационное моделирование для оценки надёжности и безопасности ТПП с элементами потенциальной опасности.

В статье предлагается методика расчёта надёжности реализации ТПП с элементами потенциальной опасности, основанная на применении вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ), позволяющего получить точные оценки надёжности и безопасности исследуемого объекта с учётом редких событий аварий, возникающих в ходе выполнения ТХО.

2. Методика оценки надёжности технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности

Методика заключается в поэтапном использовании одной из схем формализации и последующей автоматизации создания и эксплуатации вероятностно-алгебраических моделей ТПП.

Первый этап направлен на формализацию ТПП в виде графовой схемы и проверку её структурной сложности, позволяющей определить метод исследования. Для этого используются встроенные средства анализа в составе программно-технологического комплекса автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst» [2].

При формализации ТПП учитывается, что его структурными элементами являются ТХО, упорядоченное выполнение которых обеспечивает его реализацию. ТХО, как правило, имеют случайные параметры выполнения, значительные отклонения от нормы которых могут служить основанием, чтобы отнести ТХО к элементам потенциальной опасности и в процессе моделирования оценить влияние вероятностных параметров каждой из них на надёжность/безопасность реализации ТПП.

С позиций надёжности ТХО могут быть охарактеризованы временем безотказного выполнения, вероятностным образом изменяющимся в каждой реализации технологического цикла. С другой стороны, отказ в реализации ТХО может быть

обусловлен рядом причин, классификация и вероятностный учёт которых позволят оценить степень их влияния на реализацию ТПП.

Очевидно, что сбой в реализации одной из ТХО влечёт за собой последовательные сбои множества других ТХО, и, как следствие, время и стоимость реализации ТПП значительно возрастают. При неконтролируемом снижении надёжности реализации ТПП время и стоимость его выполнения могут значительно превосходить установленные предельные значения и в этом смысле свидетельствовать об аварийном/опасном состоянии системы.

При переходе к моделированию выделенные структурные элементы схемы технологического цикла производственного процесса заменяются абстрактными элементами h -го варианта вероятностно-алгебраической модели $K = \{K_i\}$, $i = \overline{1, m}$, вероятностным образом изменяющими свои параметры надёжности. Для каждого из элементов указывается число возможных состояний $S = \{S_j\}$, $j = \overline{0, n}$, определяющих значения исследуемого свойства (надёжности, времени, стоимости), и задаются значения векторов вероятностей этих состояний для текущего момента времени $t = \overline{1, T}$:

$$P^{it} = (p_0^{it}, p_1^{it}, \dots, p_n^{it}), \sum_{j=0}^n p_j^{it} = 1, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}. \quad (1)$$

Если в качестве характеристики надёжности рассматривается время безотказного выполнения i -ой ТХО в составе ТПП, то j -ый элемент вектора (1) указывает на вероятность функционирования элемента в пределах j -го временного интервала. Второй аспект оценки надёжности организации ТПП предполагает учёт вероятностей возможных отказов с классификацией и ранжированием их по типам в зависимости от степени опасности.

Второй этап заключается в использовании одной из параметризованных моделей с целью настройки её с учётом особенностей исследуемого ТПП. Для ТПП простой структурной организации выбирается модель, не имеющая ограничений на число элементов и их состояний.

Связи между элементами ТПП зависят от решаемой задачи и отличают её от простого набора частей. Они формализуются с учётом отношений между элементами системы, установленными при решении задачи декомпозиции системы и задаются функциями $F = \{F_j\}$, $j = \overline{1, z}$, которые могут быть детерминированными либо вероятностными и могут описывать различные схемы резервирования выделенных элементов.

Для ТПП с фрагментами структурно-сложной организации используется модель, реализующая методику сведения к совокупности бинарных моделей. Для ТПП большой размерности реализуется расчётный метод ВАЛМ, основанный на представлении исследуемого объекта в виде структуры n -полюсника и дальнейшего вероятностно-алгебраического умножения его подструктур.

Результат моделирования h -го варианта вероятностно-алгебраической модели представляется в виде изменяющегося во времени вектора вероятностей надёжности ТПП, имеющего вид

$$P^{st} = (p_0^{st}, p_1^{st}, \dots, p_n^{st}), \sum_{j=0}^n p_j^{st} = 1, t = \overline{1, T}. \quad (2)$$

Третий этап представляет собой эксплуатацию готовой вероятностно-алгебраической модели ТПП, результативность проведения которого гарантируется наличием встроенных средств расчёта сопутствующих статистических характеристик, визуализации результатов моделирования и применения процедур выбора решений.

При переходе к рассмотрению ТПП в динамике возможен контроль результатов реализации вероятностно-алгебраической модели в пошаговом режиме через фиксированные интервалы времени на соответствие допустимым значениям вероятностей состояний надёжности реализации циклов ТПП. В случае полного соответствия результатов моделирования допустимым значениям вероятностных характеристик надёжности выполнения ТПП работа вероятностно-алгебраической модели продолжается. При обнаружении несоответствия полученных результатов моделирования заданным предельным значениям вероятностей состояний надёжности реализации ТПП происходит корректировка/обновление параметров моделирования или вносятся изменения в структуру модели, после чего реализуется переход на следующую итерацию моделирования. В результате для заданного периода моделирования в базе данных комплекса «ControlSyst» накапливаются варианты изменения структурной организации ТПП и параметры его реализации на каждой итерации моделирования, определяющие стратегию управления ТПП на заданном временном интервале.

3. Средства автоматизации расчёта надёжности и безопасности реализации технологического процесса производства с элементами потенциальной опасности

Для автоматизации проектного моделирования ТПП с элементами потенциальной опасности путём реализации расчета вероятностных характеристик надёжности/безопасности ТПП по вероятностным характеристикам их структурных элементов, включая элементы потенциальной опасности, используется программно-технологический комплекс «ControlSyst» [2].

«ControlSyst» реализует методы вероятностно-алгебраического моделирования ТПП и позволяет рассчитывать вероятностные характеристики надёжности/безопасности для ТПП и его подсистем с учетом сложности структурной организации объекта исследования, числа элементов ТПП, числа состояний элементов и количества терминальных вершин. В ходе создания и эксплуатации моделей ТПП пользователю предоставляются следующие возможности:

- проводить построение схемы функционирования ТПП с элементами потенциальной опасности в виде иерархического древовидного графа;
- выбирать функции взаимодействия элементов ТПП, описывающие различные варианты их временных или пространственных связей, включая логические схемы резервирования потенциально опасных элементов;
- задавать число терминальных вершин (список точек начала и завершения ТПП) из списка элементов ТПП;
- определять число возможных отказов (с классификацией их по типам в зависимости от причины отказа и выделением опасных) для выделенных структурных элементов в составе ТПП;
- редактировать схему ТПП с элементами потенциальной опасности и параметры надёжности/безопасности элементов в процессе моделирования;
- назначать структурным элементам модели ТПП начальные вероятностные параметры показателей надёжности и редактировать их;
- задавать параметры динамического изменения вероятностных показателей надёжности для выделенных структурных элементов в составе ТПП;
- выбирать тип моделирования (статическое/динамическое) и задавать время моделирования;
- представлять результаты моделирования в виде отчётов и графиков.

Для задания исходных данных моделирования можно использовать многооконный интерфейс программы «ControlSyst» (рис. 1) или один из известных текстовых редакторов.

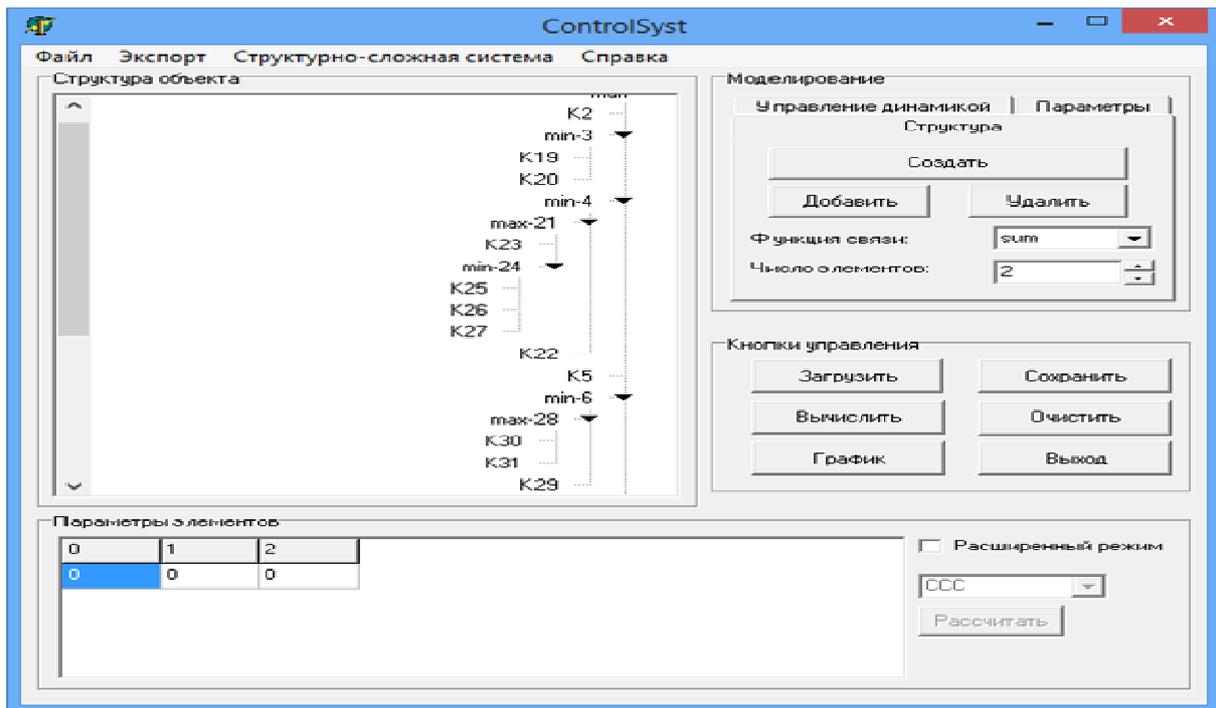


Рис. 1. Окно, отражающее структуру модели ТПП

Программно-технологический комплекс «ControlSyst» может быть использован в ходе проектного моделирования надежности/безопасности функционирования ТПП с элементами потенциальной опасности для решения следующих классов задач:

- проектного моделирования надежных и безопасных ТПП с учетом рассмотрения различных схем резервирования и ликвидации последствий сбоев и аварий в ходе выполнения ТХО;
- синтеза оптимальной структуры ТПП с учетом надежностных характеристик их элементов и их взаимодействия;
- оценки изменения надёжности и безопасности организации ТПП в результате изменения их структурной организации и параметров надёжности их элементов;
- расчёта вероятностных параметров надёжности элементов, обеспечивающих заданный уровень надёжности и безопасности ТПП установленной структурной организации;
- оценки эффективности организации функционирования ТПП.

Применение ПТК «ControlSyst» как инструмента оперативного контроля и управления самим процессом функционирования ТПП возможно также в ходе реализации цикла технологического процесса производства, при котором моделирование позволяет корректировать ТПП с учётом особенностей его протекания путём формирования единственно правильного решения для текущего момента времени.

4. Пример расчёта надёжности/безопасности технологического процесса переработки транзитного вагонопотока сортировочной станции

Для демонстрации работы предложенной методики была рассмотрена схема ТПП [3], включающая совокупность ТХО, однотипным образом представленных в модели элементами K_1 – K_{33} (рис. 2), упорядоченная последовательность которых описывает процесс переработки транзитного вагонопотока на сортировочной железнодорожной станции.

Представленный объект исследования при незначительном упрощении (исключении участков ki_1 – ki_3) может быть отнесён к классу систем простой графовой структуры, и

для оценки его вероятностных характеристик использовался метод ВАЛМ простой графовой структуры, реализованный в составе комплекса «ControlSyst».

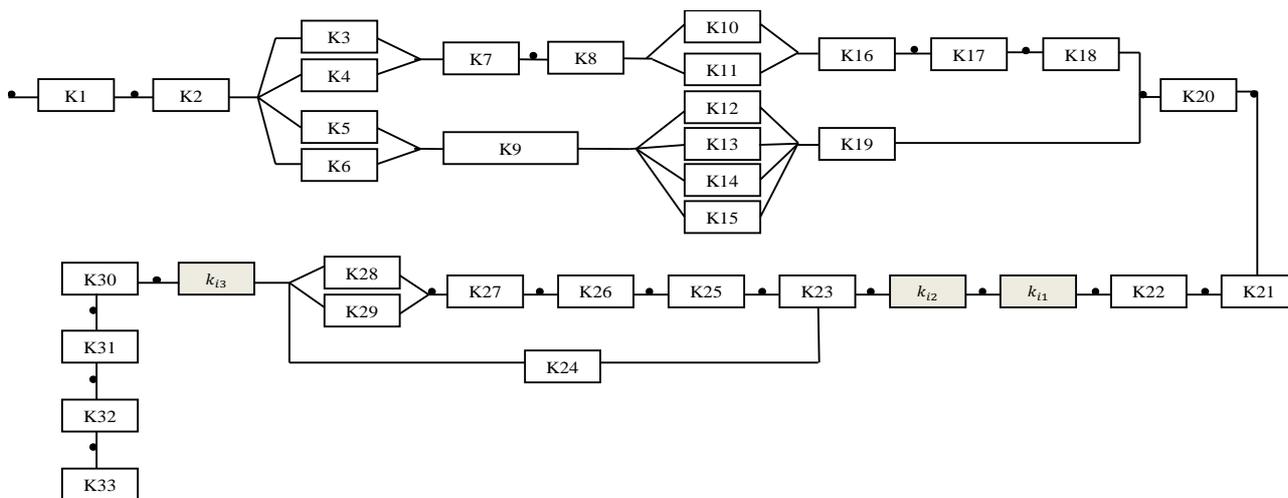


Рис. 2. Схема технологического процесса переработки транзитного вагонопотока

Средства автоматизации «ControlSyst» поддерживают многоступенчатое моделирование. Для схемы, представленной на рис. 1, были детально рассмотрены участки k_{i1} – k_{i3} (рис. 3), для оценки надёжности которых использовалась методика расчёта надёжности структурно сложной системы со многими состояниями.

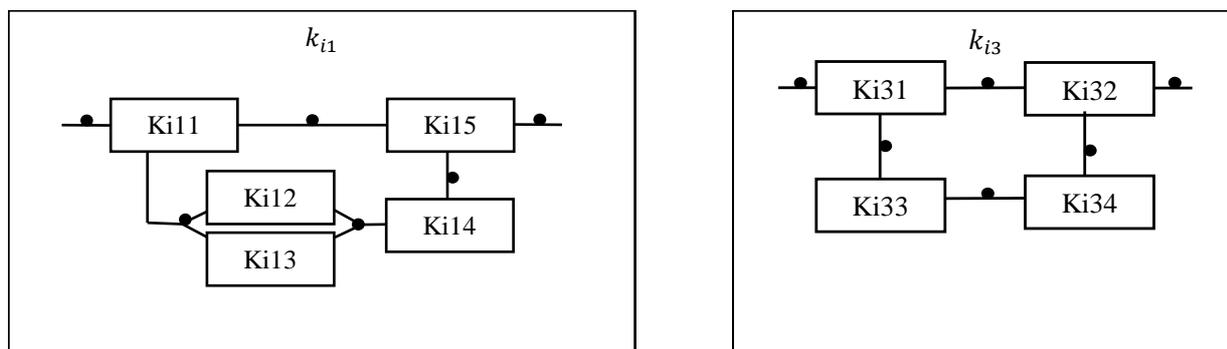


Рис. 3. Подсистемы технологической линии переработки транзитного вагонопотока

При оценке надёжности организации ТПП параметрами модели являлись векторы вероятностей вида (1) состояний надёжности $S = \{S_j\}$, $j = \overline{0,2}$ выделенных элементов ТПП (ТХО $_i$).

Первые элементы p_0^i векторов (1) определяли вероятность надёжного выполнения i -ых ТХО, p_1^i указывали на вероятность безопасных отказов i -ых элементов, а p_2^i задавали вероятность опасных отказов при выполнении ТХО $_i$. Результаты моделирования ТПП на каждой итерации имели вид (2).

Схема вероятностно-алгебраической модели технологического процесса переработки транзитного вагонопотока сортировочной станции представлена на рис. 4.

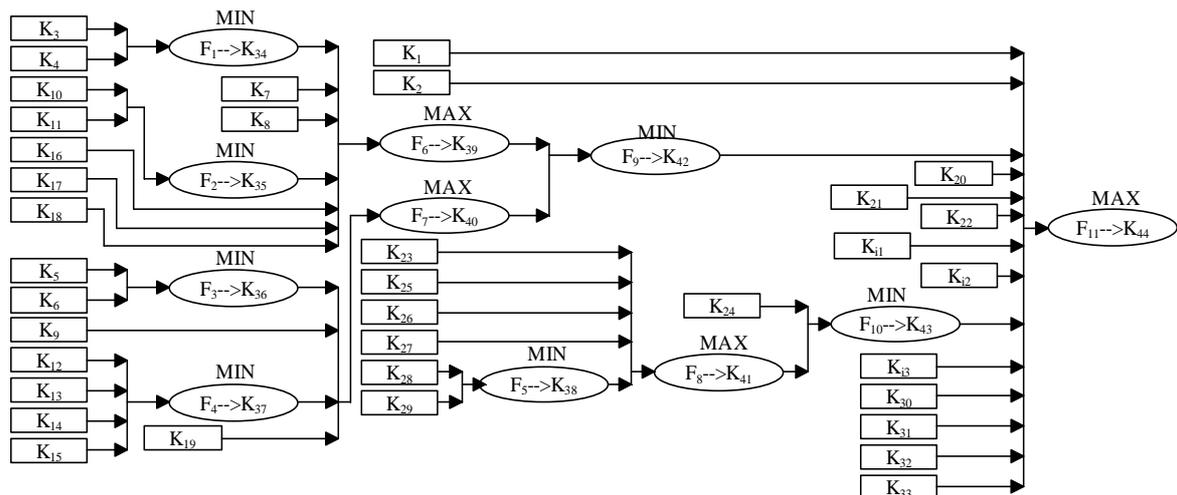
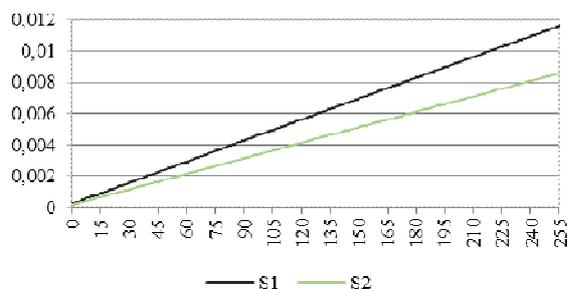


Рис. 4. Схема вероятностно-алгебраической модели технологического процесса переработки транзитного вагонопотока сортировочной станции

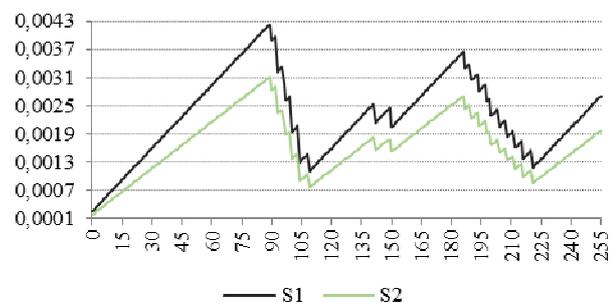
Кроме параметров моделирования вида (1), для реализации динамического моделирования указывался шаг изменения вероятностей состояний простых отказов (S_1) и состояний опасных отказов (S_2) ТХО i . Для заданных значений параметров, определяющих вероятностные значения надёжности/безопасности выполнения ТХО i , рассматривались две стратегии управления ТПП. При первой стратегии на протяжении всего периода моделирования изменения в модель не вносились. При второй стратегии были реализованы управляющие воздействия, определяющие новые параметры моделирования при достижении предельных параметров надёжности/безопасности выполнения последовательности ТХО.

На рис. 5 представлены результаты моделирования (вероятности состояний опасных (S_2) и простых (S_1) отказов в ходе реализации циклов ТПП) при двух указанных стратегиях моделирования для заданных параметров моделирования, выбранных в рабочей точке параметров реализации ТПП.

Переход к оценке времени и стоимости выполнения технологического цикла работ ТПП осуществляется путём изменения функций, определяющих коэффициенты ВАЛМ, и обновлением значений векторов вероятностей (1) в соответствии с выбранной семантикой. Этот переход в «ControlSyst» полностью автоматизирован. Как результат, формализация ТПП и построение его графического образа позволяют провести моделирование по трём направлениям: оценить надёжность объекта, выбрав один из вариантов интерпретации состояний надёжности; рассчитать время выполнения технологического цикла работ с выделением интервалов времени и их вероятностей, превышающих нормативные значения; определить вероятностные характеристики стоимости организации ТПП.



Результаты моделирования при стратегии 1



Результаты моделирования при стратегии 2

Рис. 5. Результаты моделирования для двух стратегий моделирования системы переработки транзитного вагонопотока сортировочной станции

Предложенный подход обеспечивает прогнозирование поведения объекта на заданном временном интервале и сравнительный анализ совокупности альтернативных вариантов организации ТПП, что в совокупности позволяет выбрать и обосновать стратегию управления циклами технологического процесса с учётом временных изменений характеристик надёжности реализации совокупности ТХО.

5. Заключение

Для решения задачи исследования и управления ТПП с элементами потенциальной опасности предложена методика оценки их надёжности и безопасности, которая реализует способ модификации структуры исследуемого ТПП между итерациями моделирования, тем самым снимая ограничение независимости элементов и позволяя учесть эволюционное взаимное влияние элементов друг на друга и на систему в целом, которое организуется путём добавления и исключения элементов модели, изменения структурных связей между элементами и изменения их текущих параметров. При этом пошаговое изменение структуры моделируемой системы реализуется на основе результатов одной итерации моделирования, обеспечивающей точные вероятностные значения надёжности системы для широкого спектра исходных вероятностных параметров, что отличает ВАЛМ от метода имитационного моделирования с использованием процедуры Монте-Карло. Предложенный подход дает возможность его использования при проектном моделировании ТПП, выполнении научных исследований на объектах повышенной опасности и проектировании высоконадежных технологических комплексов для различных областей производственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология имитационного моделирования вероятностных технологических процессов производства / И.В. Максимей, Е.О. Попова, А.М. Поташенко [и др.] // Весник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серія 2. – 2006. – № 3 (46). – С. 51 – 55.
2. Программно-технологический комплекс автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 773 / Е.И. Сукач, Ю.В. Жердецкий. – Минск: НЦИС, 2015. – Заявка № С20150031. – Дата подачи: 15.04.15.
3. Сукач Е.И. Стенд имитационного моделирования сортировочной станции железнодорожной сети / Е.И. Сукач // Проблемы программирования. – 2009. – № 3. – С. 81 – 89.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2016