

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ

О.М. Демиденко, В.С. Смородин, Е.И. Сукач, Ю.В. Жердецкий

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины*

## AUTOMATION OF PROJECT SIMULATION OF CONTROL SYSTEMS OF THE PROCESS OF PRODUCTION WITH THE ELEMENTS OF POTENTIAL HAZARD

O.M. Demidenko, V.S. Smorodin, E.I. Sukach, Y.V. Zherdetsky

*F. Scorina Gomel State University*

Излагается подход к исследованию надёжности систем управления технологическими процессами производства, включающими элементы потенциальной опасности. Описываются средства автоматизации, позволяющие построить вероятностную модель объекта и оценить в динамике надёжность реализации технологического цикла производства с учётом изменения надёжности его структурных элементов.

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

The approach to the study of reliability of process control systems of production, including the potential danger elements is presented. Automation means, allowing to build a probabilistic model of the object and to evaluate the reliability of the dynamics in the implementation of the manufacturing cycle are described, taking into account the changes in the reliability of its structural elements.

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

### Введение

Поскольку риск принимаемых решений как в процессе проектирования самих систем управления (СУ), так в ходе реализации их управляющих воздействий на ход технологических процессов производства (ТПП) достаточно велик, имеет смысл получение точных ориентиров, в соответствии с которыми будет запланирована и организована работа исследуемых объектов. Единственным способом получения прогнозных оценок надёжности работы СУ ТПП в условиях их небезопасного функционирования является компьютерное моделирование, поскольку проведение натуральных экспериментов для получения подобной информации невозможно осуществить в принципе.

Проблема исследования СУ ТПП состоит в том, что все они функционируют в условиях воздействия случайных факторов, определяющих вероятностный характер происходящих в системах процессов, оказывающих влияние на результирующие характеристики надёжности системы. Рассмотрение процесса функционирования СУ ТПП без учёта влияния случайных воздействий ограничивает возможности расчётных методов при решении практических задач. А учёт вероятностных параметров функционирования СУ ТПП при оценке их надёжности представляет проблему, решение которой возможно лишь путём рассмотрения сложных и трудоёмких математических задач.

Ввиду структурной сложности реальных объектов исследования оценка надёжности и безопасности их функционирования с использованием существующих ручных технологий, как правило, невозможна. Поэтому значительный вклад в разработку этой проблемы предлагается получить посредством создания компьютерных математических моделей СУ ТПП и разработки средств их реализации, включающих методы, методики и программное обеспечение, которые учитывают особенности организации исследуемых объектов, варианты их структурной организации, случайный характер происходящих в них процессов, особенности взаимодействия элементов между собой и с внешней средой [1].

В статье приводится описание программно-технологического комплекса (ПТК) «ControlSys» [2], предназначенного для автоматизации проектного моделирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности и реализующего расчёт вероятностных характеристик надёжности / безопасности СУ ТПП по вероятностным характеристикам их структурных элементов, включая элементы потенциальной опасности. Научную основу этого комплекса составляют методы вероятностно-алгебраического моделирования и методики, выбор которых обусловлен числом элементов (состояний) объекта и видом связей между ними, определяющим в совокупности структурную сложность исследуемого объекта [3].

Главные отличия ПТК «ControlSyst» от ранее разработанных методов, технологий и программных комплексов аналогичного назначения состоят в следующем.

1. Используется универсальный способ формализации СУ ТПП с элементами потенциальной опасности, реализующий единый подход к описанию систем различной структурной организации при оценке их разных вероятностных свойств (надёжности, безопасности, эффективности и др.), поддерживающий однотипное описание элементов, составляющих систему, и всей системы в целом, что делает прозрачным процесс формализации и способствует оперативности построения модели.

2. Введено понятие и определён аппарат вероятностно-алгебраического моделирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности, теоретической основой которого является аппарат стохастических алгебр, порождённых операциями, определёнными на базе симплекса  $P \in R^n$ , позволяющий реализовать расчётные алгоритмы при оценке вероятностных свойств систем различной структурной сложности, исключающих экспоненциальный рост сложности расчётов при увеличении числа элементов и/или состояний исследуемых объектов.

3. В рамках вероятностно-алгебраического аппарата предложена методика решения как прямой задачи, заключающейся в оценке влияния исследуемого свойства (надёжности, безопасности, эффективности и др.) элементов на свойство всей СУ ТПП с элементами потенциальной опасности в целом, так и обратной задачи, состоящей в определении вероятностных характеристик элементов, составляющих СУ, обеспечивающих заданный уровень исследуемого свойства системы.

4. В процессе вероятностно-алгебраического моделирования реализуется способ модификации структуры исследуемой СУ ТПП с элементами потенциальной опасности между итерациями моделирования, снимающий ограничение независимости элементов и позволяющий учесть эволюционное взаимное влияние изменений 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 [4]. При этом пошаговое изменение структуры моделируемой системы реализуется на основе результатов одной итерации моделирования, обеспечивающего точные вероятностные значения исследуемого свойства системы для широкого спектра исходных вероятностных параметров, что отличает его от традиционного метода имитационного моделирования с использованием процедуры Монте-Карло.

## 1 Методика проектного моделирования СУ ТПП

Проектирование СУ ТПП с элементами потенциальной опасности включает последовательное решение взаимосвязанных задач, решение которых позволит выбрать вариант надёжного / безопасного функционирования исследуемых объектов, которые включают в качестве элементов оборудование с вероятностными параметрами реализации своих функций. СУ ТПП представляется как многоуровневая конструкция из взаимодействующих элементов (потенциально опасных элементов), объединяемых в подсистемы различных уровней иерархии.

При формализации все элементы СУ описываются однотипным образом: выделяются состояния объектов (элементов / системы); задаются векторы вероятностей этих состояний:

$$P^{it} = (p_0^{it}, p_1^{it}, \dots, p_n^{it}),$$

$$\sum_{j=0}^n p_j^{it} = 1, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}. \quad (1.1)$$

Связи между единицами технологического оборудования, обеспечивающие передачу актуальной управляющей информации, определяют структурную организацию СУ ТПП. Итогом процесса формализации СУ ТПП является графовая структура, описывающая  $h$ -ый вариант организации объекта исследования с выделением потенциально опасных элементов и их взаимосвязей на выбранном уровне детализации. Результат моделирования  $h$ -го варианта вероятностно-алгебраической модели представляется в виде изменяющегося во времени вектора вероятностей состояний надёжности СУ ТПП:

$$P^{st} = (p_0^{st}, p_1^{st}, \dots, p_n^{st}),$$

$$\sum_{j=0}^n p_j^{st} = 1, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}.$$

Сформированные вектора характеризуют исследуемый показатель надёжности для различного числа и множества терминальных вершин, учитывают динамику происходящих процессов взаимодействия структурных элементов исследуемого объекта, свидетельствуют о доле вероятностей отказов системы, обусловленных разными причинами, в общей оценке вероятности отказа.

Методика заключается в поэтапном использовании одной из схем формализации [5] и последующей автоматизации создания и эксплуатации вероятностно-алгебраических моделей СУ ТПП. Первый этап направлен на формализацию СУ ТПП и проверку её структурной сложности, позволяющей определить метод её исследования. Для этого используются встроенные средства анализа в составе ПТК «ControlSyst». Второй этап заключается в использовании одной из параметризованных заготовок для создания моделей проектируемых СУ ТПП. Для СУ ТПП простой

структурной организации выбирается модель, не имеющая ограничений на число элементов и их состояний. Для СУ ТПП с элементами структурно-сложной организации используется модель, реализующая методику сведения к совокупности бинарных моделей. Для СУ ТПП большой размерности реализуется расчётный метод вероятностно-алгебраического моделирования, базирующийся на представлении исследуемого объекта в виде структуры  $n$ -полюсника и последующего вероятностно-алгебраического умножения его подструктур [6]. Следующий этап методики предполагает эксплуатацию готовой вероятностно-алгебраической модели СУ ТПП, результативность проведения которого гарантируется наличием встроенных средств расчёта сопутствующих статистических характеристик, визуализации результатов моделирования и применения процедур выбора решений.

## 2 Функциональные возможности программно-технологического комплекса «ControlSyst»

Программно-технологический комплекс «ControlSyst» реализует методы вероятностно-алгебраического моделирования СУ ТПП и позволяет:

- проводить построение схемы функционального моделирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности в виде иерархического древовидного графа;
- определять элементы потенциальной опасности в составе СУ ТПП в виде вершин или ребер графа модели;
- выбирать функции взаимодействия элементов СУ 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 технологических процессов производства) из списка элементов СУ ТПП;
- определять число возможных отказов (с классификацией их по типам в зависимости от причины отказа и выделением опасных) для структурных элементов СУ ТПП;
- редактировать схему СУ ТПП с элементами потенциальной опасности и параметры надёжности (безопасности) элементов в процессе моделирования;
- присваивать начальные вероятностные параметры показателей надёжности структурным элементам модели СУ ТПП и редактировать их текущие значения;
- задавать параметры динамического изменения вероятностных показателей надёжности для структурных элементов СУ ТПП;
- выбирать тип моделирования (статическое / динамическое) и задавать время моделирования;
- рассчитывать вероятностные характеристики надёжности (безопасности) для СУ ТПП и

её структурных подсистем с учетом сложности структурной организации объекта исследования, числа элементов СУ ТПП и числа их возможных отказов, количества терминальных вершин;

- сохранять построенные модели и результаты моделирования;
- представлять результаты моделирования в виде отчётов и графиков.

Для задания исходных данных моделирования используется многооконный интерфейс программы «ControlSyst» или один из известных текстовых редакторов. Проект модели сохраняется в формате \*.vtr. Результаты моделирования сохраняются в формате \*.xls и могут быть обработаны и проанализированы с использованием библиотеки (PS.OPTIM) [7].

## 3 Интерфейс программно-технологического комплекса «ControlSyst»

Комплекс «ControlSyst» реализован в среде Borland Delphi Professional, Version 10.0 на языке программирования Delphi 7.0.

После запуска программы «ControlSyst» автоматически создаётся пустой проект (\*.vtr) и перед пользователем появляется окно создания графической схемы организации СУ ТПП, включающее главное горизонтальное меню, рабочую область для формирования схемы модели и управляющие компоненты, позволяющие настроить интерфейс инструментария (выбрать язык, способ формирования модели и др.) и задать параметры моделирования. С использованием библиотеки процедур TeeChart Pro v7.06, используемой при реализации программно-технологического комплекса «ControlSyst», в автоматическом режиме происходит формирование модели СУ ТПП простой графовой структуры (рисунок 3.1).

Представление СУ ТПП в виде древовидной структуры при автоматизации задач исследования вероятностных характеристик её функционирования позволяет:

- наглядно представить связи между выделенными элементами системы;
- определить параметры терминальных узлов;
- установить уровни иерархии элементов системы;
- обеспечить замещение функциональных связей между элементами системы вероятностными вычислениями;
- при машинной реализации метода использовать эффективные алгоритмы обхода узлов дерева, сложность которых зависит от количества уровней дерева, т. е. приблизительно от  $\log_2 n$  ( $n$  – количество узлов).

В процессе создания модели может быть использована одна из параметризованных заготовок в составе библиотеки (LIB.PALS) [6], с целью настройки которой (указания числа состояний элементов модели, выбора вида функций, описывающих взаимодействие элементов СУ ТПП, задания времени моделирования для случая оценки

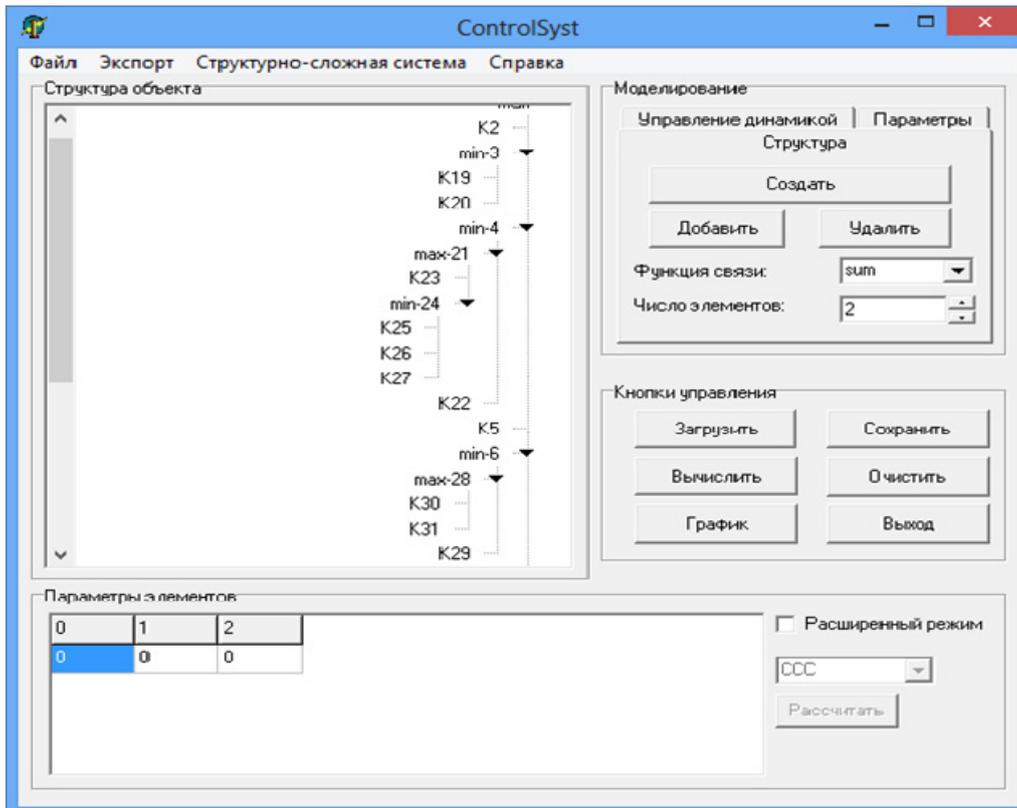


Рисунок 3.1 – Окно отражающее структуру модели СУ ТПП

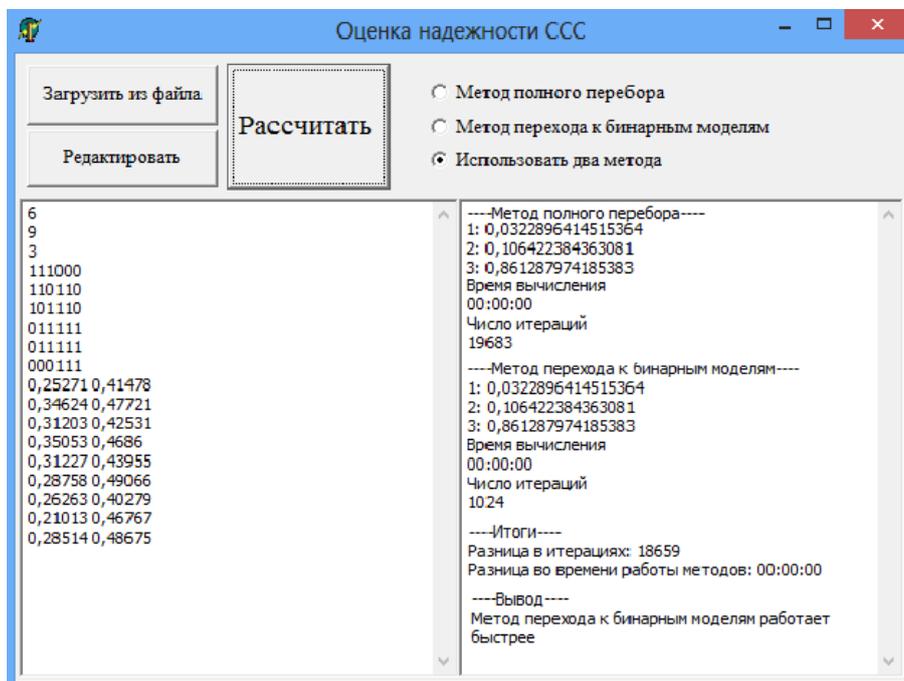


Рисунок 3.2 – Окно расчёта фрагмента СУ ТПП структурно-сложной организации

объекта в динамике) используется набор управляющих компонентов программы, которые размещены в области *Моделирование*, слева от рабочей области инструментария. Для формирования графа модели используются управляющие компоненты области *Структура*, позволяющие редактировать структуру параметризованной

модели. Управляющие компоненты вкладки *Параметры* позволяют задать параметры моделирования (число состояний элементов, число знаков после запятой для вероятностей состояний и др.), которые фиксируются в базе данных инструментария и используются для проведения расчётов.

В составе инструментария реализованы методики, расширяющие возможности аппарата вероятностно-алгебраического моделирования: методика сокращения размерности модели, методика перехода к бинарным моделям, методика интерпретации объекта в виде многосвязной структуры – позволяющие оценить надёжность (безопасность) фрагментов СУ ТПП, имеющих структурно-сложную организацию. Возможность проведения моделирования с использованием оптимизирующих методик реализуется в *Расширенном режиме*, переход в который реализуется путём настройки области *Параметры элементов* либо с использованием команды *Структурно-сложная система* главного меню инструментария (используется в том случае, когда СУ ТПП имеет структурно-сложную организацию).

В окне *Оценка надёжности ССС* (рисунок 3.2) имеется возможность загрузить исходные параметры моделирования из файла. Управляющий компонент *Редактировать* позволяет изменить исходные данные моделирования, задающие структуру фрагмента и вероятностные параметры элементов, сохранить их и далее использовать для проведения модельного эксперимента.

Расчет результирующих вероятностных характеристик фрагмента СУ ТПП структурно-сложной организации реализуется управляющим компонентом *Рассчитать*, запускающим один из расчётных алгоритмов: полного перебора; перехода к бинарным моделям. Результаты расчёта и сравнительные характеристики работы двух алгоритмов отражаются в левой рабочей области.

В очередном окне *Оценка надёжности n-полюсников* (рисунок 3.3) предоставляется возможность использовать одну из схем формализации объекта, указав с использованием групп переключателей способ описания исследуемой

СУ ТПП: *Матрица смежности / Списки смежности; Трёхполюсник / Четырёхполюсник; Элементы-рёбра / Элементы-вершины*. Рабочая область окна *Параметры надёжности элементов* позволяет задать параметры моделирования, отражающие исследуемый вариант структурной организации СУ ТПП и параметры надёжного функционирования её элементов (ТХО) и зафиксировать их в базе данных инструментария.

Рабочее окно *Результаты оценки надёжности системы* предназначено для вывода результирующих значений оценок вероятностей состояний надёжности СУ ТПП для выбранной схемы формализации.

Для организации динамического моделирования СУ ТПП используется область *Моделирование* и вкладка этой области *Управление динамикой* (рисунок 3.1), последовательность диалоговых окон которой позволяют определить опции моделирования. Завершающим звеном цепочки настроек является определение настроек динамического моделирования и корректирующего управления (рисунок 3.4).

В этом окне можно выбрать виды изменения вероятностных параметров надёжности элементов СУ ТПП, используя управляющие компоненты области *Виды моделирования* и подобласти *Параметры динамики*. В области *Виды моделирования* реализованы возможности редактирования шага изменения вероятностных параметров надёжности элементов (вкладка *Статический*), функции изменения параметров надёжности элементов (вкладка *Функциональный*), параметров изменения вероятностных параметров элементов в соответствии со статистическими данными, полученными в результате наблюдения за объектом исследования на протяжении установленного интервала времени (вкладка

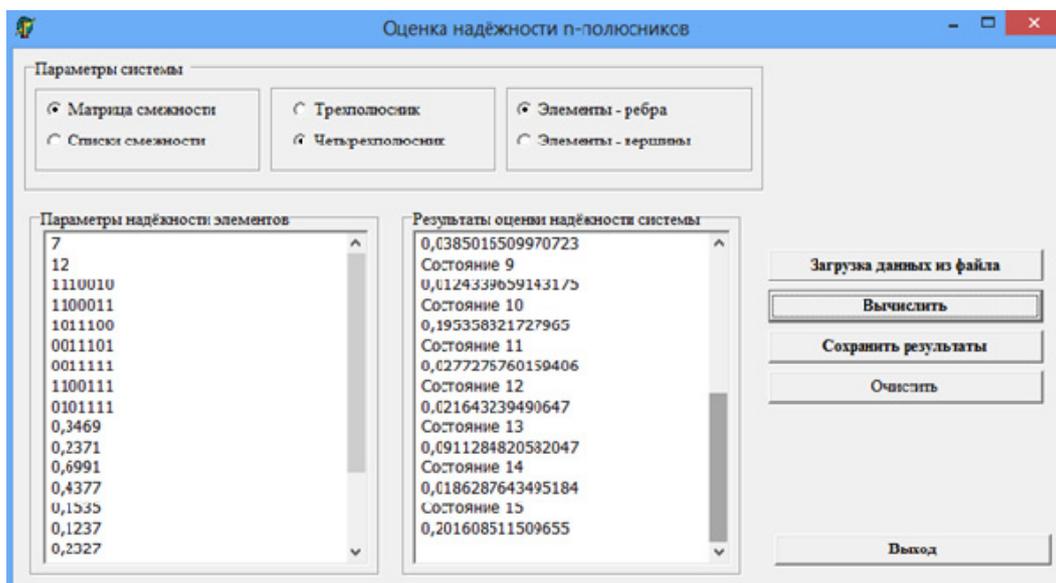


Рисунок 3.3 – Окно для выполнения расчёта надёжности СУ ТПП n-полюсника

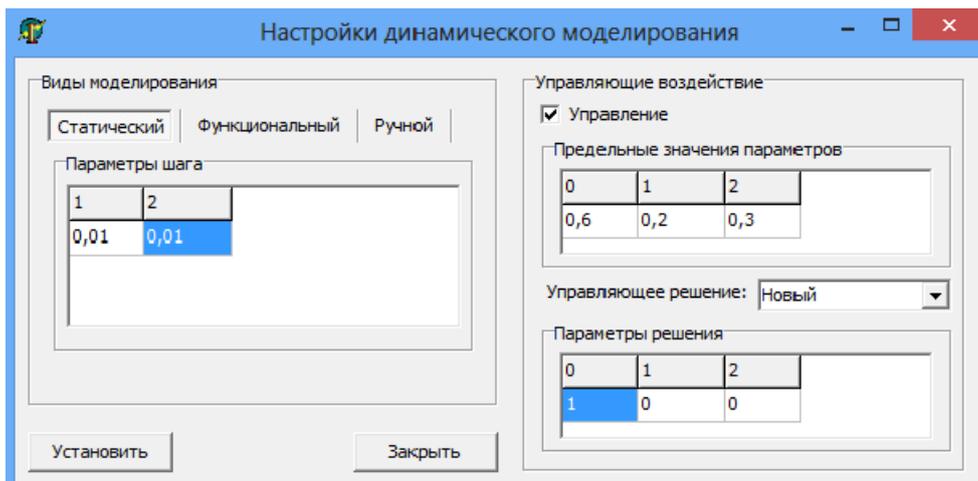


Рисунок 3.4 – Окно установок динамического моделирования СУ ТПП

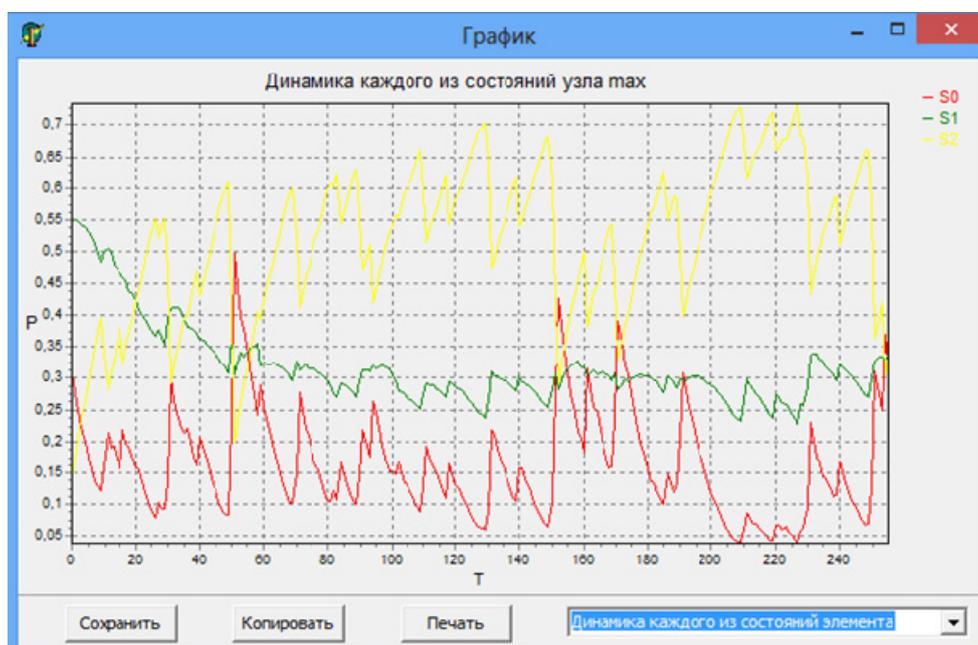


Рисунок 3.5 – Окно графической интерпретации результатов динамического моделирования СУ ТПП

*Ручной*). Для организации корректирующих управляющих воздействий используется область *Управляющее воздействие*, в которой ставится флажок в поле *Управление* для его активизации. После чего предоставляется возможность установить параметры предельных значений в области *Предельные значения параметров* для каждого из состояний элемента. Наконец, последним шагом в цепочке задания параметров динамического управляющего моделирования является указание управляющего воздействия, вид которого выбирается из выпадающего списка поля *Управляющее решение*: вектор вероятностей заменяется на новый (*Новый*), вектор вероятностей остаётся исходным (*Исходный*), пользователю предоставляется возможность изменить вектор вероятностей состояний надёжности потенциально опасного элемента (*Пользовательский*).

При этом в области *Параметры решения* отображаются изменённые значения вектора вероятностей. Кнопка *Установить* в нижней части экрана проверяет корректность установки параметров в окне *Настройки динамического моделирования* и завершает задание параметров динамического моделирования для выбранного элемента дерева.

Результаты моделирования отображаются в нижней части экрана главного окна программы *Параметры элементов* и отображаются в окне графической интерпретации результатов (рисунок 3.5) при нажатии кнопки *График* в области *Кнопки управления* главного окна программы.

В диалоговом окне отображения предусмотрена возможность графического отображения вероятностей состояний надёжности системы (элемента) в динамике (рисунок 3.5) и статического

представления вероятностей результирующих состояний надёжности в виде круговой диаграммы.

Пункт меню *Экспорт* главного окна программы позволяет сохранить результаты моделирования для всех элементов модели СУ ТПП в формате MS Excel.

#### 4 Динамическое моделирование надёжности реализации технологического цикла производства

Для иллюстрации работы ПТК «Control-Syst» использовалась модель ТПП (рисунок 4.1), включающая совокупность технологических операций (ТХО), последовательное выполнение которых обеспечивало реализацию технологического цикла производства с элементами потенциальной опасности.

Характеристиками надёжности элементов при оценке надёжности организации ТПП служили вероятности отказов, возникающие в ходе выполнения ТХО. Рассматривались три состояния надёжности элементов:  $S_1$  – надёжное выполнение операции;  $S_2$  – отказы при выполнении ТХО;  $S_3$  – опасные отказы при выполнении ТХО. Первые элементы векторов (1.1) определяли вероятность безотказного выполнения  $i$ -ой ТХО, вторые указывали на вероятность отказов при выполнении ТХО, не влияющие на надёжность выполнения последующих ТХО; третьи составляющие

вектора (1.1) задавали вероятность опасного отказа, возникающего при выполнении ТХО.

В виду того, что модель служила лишь примером, позволяющим продемонстрировать решение типовой задачи, то исходные данные (значения векторов (1.1)) были выбраны произвольным образом.

В процессе моделирования требовалось получить значения векторов вероятностей ТПП с учетом изменения структуры технологического цикла. Предполагалось, что участки цепочки технологического процесса производства ТХО<sub>22</sub> и ТХО<sub>36</sub> при достижении предельных значений вектора вероятностей их состояний (0,999; 0,0007; 0,0003) замещались в процессе моделирования на допустимые схемы резервирования (рисунок 4.2), после чего моделирование продолжалось.

В результате моделирования было зафиксировано, что на 91 шаге произошло замещение участка ТХО<sub>36</sub>, а на 101 шаге изменилась структура участка ТХО<sub>22</sub>. Далее структура ТПП не изменялась.

Значения вероятностей надёжной реализации цикла ТПП представлены на рисунке 4.3, а значения вероятностей возникновения опасного отказа в процессе реализации ТПП – на рисунке 4.4.

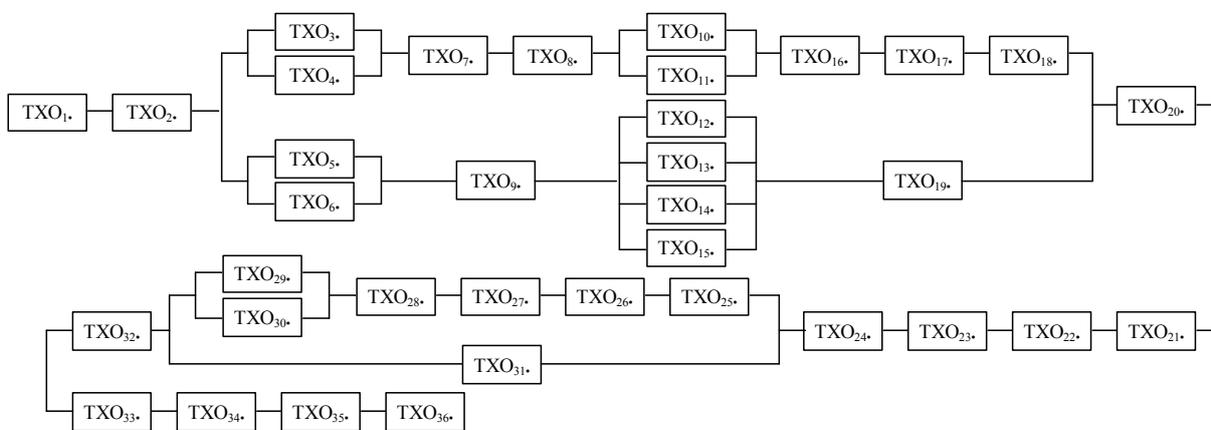


Рисунок 4.1 – Схема технологического цикла производства

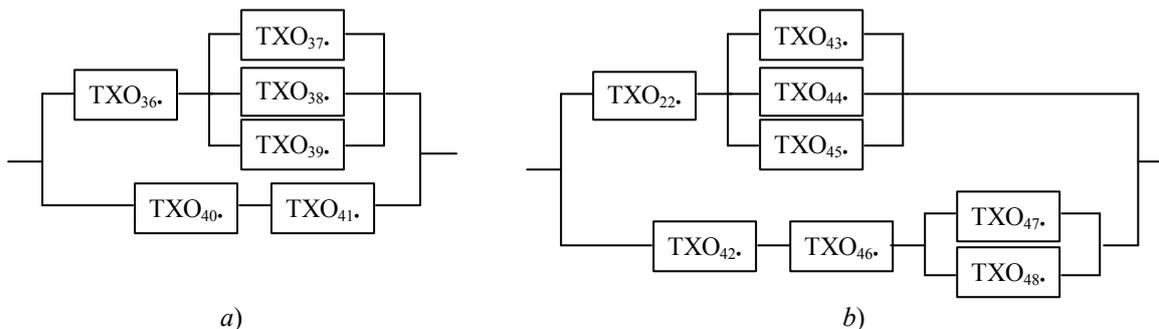


Рисунок 4.2 – Схемы резервирования участков технологического процесса производства (ТХО<sub>22</sub> – схема а); ТХО<sub>36</sub> – схема б))

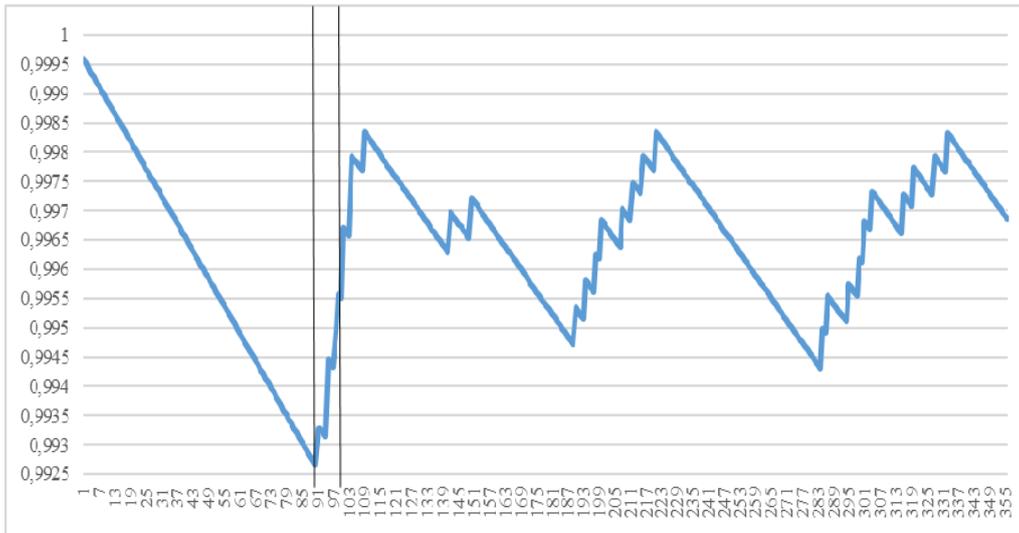


Рисунок 4.3 – Изменение вероятностей надёжной реализации цикла технологического процесса производства

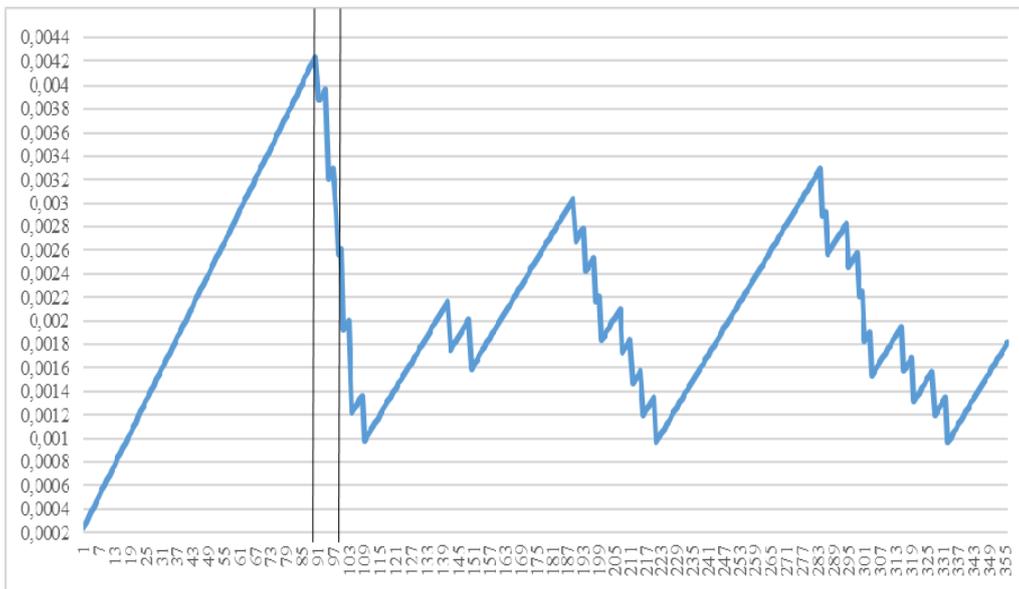


Рисунок 4.4 – Изменение вероятностей возникновения опасного отказа в процессе реализации цикла технологического процесса производства

Как видно из рисунков вероятность надёжной реализации ТПП линейно уменьшается на интервале [1; 91], после этого на интервале [91, 101] наблюдается значительный рост вероятности надёжной реализации цикла (до значения 0,9985). Обратная картина наблюдается для состояния опасного отказа в процессе реализации ТПП: вероятность его линейно возрастает на интервале [1; 91] и резко снижается при переходе к схемам резервирования. На интервале [101; 355] наблюдается неоднократные поступательное снижение значения вероятности надёжной реализации ТПП (до значения 0,994), обусловленное снижением надёжности реализации совокупности ТХО. По достижении локальных минимумов реализуется обновление параметров

ТХО, значения вероятностей надёжного выполнения которых достигли предельных значений, что приводит к возрастанию значений вероятностей надёжной реализации цикла ТПП в целом.

#### Заключение

Программно-технологический комплекс «ControlSys» может быть использован в ходе проектного моделирования надёжности (безопасности) функционирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности для решения следующих классов задач:

- проектного моделирования надёжных / безопасных СУ ТПП, включающего рассмотрение различных схем резервирования и ликвидации последствий сбоев и аварий, возможных в ходе

выполнения ТХО с использованием технологического оборудования;

– синтеза оптимальной структуры СУ ТПП с учетом характеристик надёжности / безопасности их элементов и их взаимодействия;

– оценки изменения надёжности / безопасности организации СУ ТПП в результате изменения их структурной организации и параметров надёжности элементов;

– расчёта вероятностных параметров надёжности элементов, обеспечивающих заданный уровень надёжности / безопасности СУ ТПП установленной структурной организации;

– оценки эффективности организации функционирования СУ ТПП.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Максимей, И.В.* Проблемы теории и практики моделирования сложных систем / И.В. Максимей, О.М. Демиденко, В.С. Смородин; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 263 с.

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.* Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е.И. Сукач; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.

4. *Сукач, Е.И.* Методика анализа надёжности систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности / Е.И. Сукач // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, 17 июня 2015 года. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины. – 2015. – Ч. 4. – С. 165–168.

5. *Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования* / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, Ю.В. Жердецкий, Г.А. Мальцева // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 5 (74). – С. 195–202.

6. *Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования* / О.М. Демиденко, Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, Ю.В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.

7. *Система вероятностно-алгебраического моделирования «Probability Algebraic Simulation (PALS)»:* свидетельство о регистрации компьютерной программы № 450 / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская. – Минск: НЦИС, 2012. – Заявка № С20120049. – Дата подачи: 25.06.2012.

Поступила в редакцию 06.05.16.