

ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ

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

Анотація. Розглядається новий підхід до оцінки ймовірнісних характеристик надійності систем управління технологічними процесами виробництва з елементами потенційної небезпеки, заснований на застосуванні апарата ймовірнісно-алгебраїчного моделювання.

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

Аннотация. Рассматривается новый подход к оценке вероятностных характеристик надёжности систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности, основанный на применении аппарата вероятностно-алгебраического моделирования.

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

Abstract. A new approach to the evaluation of the probability characteristics of the reliability of production process management systems with potential hazard elements based on the use of probability-algebraic simulation is regarded.

Keywords: probability-algebraic simulation, reliability, management system, production process management.

1. Введение

Ошибки при управлении технологическими процессами производства (ТПП), включающими элементы потенциальной опасности, могут приводить к необратимым последствиям, авариям и катастрофическим потерям.

Практическая реализация системы управления (СУ) ТПП с элементами потенциальной опасности предполагает постепенное сближение сложной высокоматематизированной современной управленческой науки с прагматичной инженерной практикой, требующей создания в короткие сроки надёжно работающих автоматизированных систем. Одно из наиболее эффективных направлений такого сближения заключается в применении моделирования при создании систем управления. При этом имеется в виду как моделирование систем на стадии их разработки, проектное моделирование, так и непосредственное использование моделей в составе алгоритмов управления.

Модели СУ ТПП с элементами потенциальной опасности должны воспроизводить наиболее критические режимы их работы, которые не проявляются в обычных условиях функционирования, однако должны быть учтены при их проектировании и эксплуатации. Учитывая сложность и масштабность процессов, подлежащих воссозданию, большое количество параметров, разнородный характер процессов взаимодействия СУ ТПП с внешним окружением, наиболее перспективным для решения задачи оценки надёжности (безопасности) функционирования СУ ТПП является применение программно-технологических средств автоматизации моделирования [1].

Интерес представляют математические модели, учитывающие вероятностную природу функционирования СУ ТПП. Это, в первую очередь, имитационные модели, позволяющие на высоком уровне детализации изучить поведение объекта в динамике, выявить его «узкие места», выбрать рациональный вариант его организации [2]. На их основе для СУ ТПП с переменной структурой возможна реализация метода пошаговой реструктури-

зации, который в ряде случаев позволяет решить классическую задачу синтеза оптимальных систем [3]. Ограничениями применения имитационных моделей являются большая ресурсоемкость моделирования и возможность получения лишь приближённого решения, что в ряде случаев не является достаточным при управлении ТПП с элементами потенциальной опасности.

Аппарат вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) [4] и его реализация в виде программно-технологического комплекса автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst» обеспечивают расчет вероятностных характеристик надежности/безопасности СУ ТПП различной структурной сложности по вероятностным характеристикам составляющих их элементов, включая элементы потенциальной опасности, тем самым формируя оценку риска возникновения подобных ситуаций в ходе реализации производственного технологического процесса и позволяя предупредить возникновение сбоев, аварий и опасных ситуаций в процессе работы СУ ТПП.

2. Формализация объекта исследования

Формализация СУ ТПП с элементами потенциальной опасности реализуется путём декомпозиции объекта исследования с выделением его элементов и связей между ними. На первом этапе декомпозиции выделяются основные подсистемы, играющие ключевую роль в выполнении технологического производственного цикла. Далее каждая из подсистем рассматривается как самостоятельная система и в случае её сложности разделяется на более мелкие подсистемы. Процесс декомпозиции продолжается до тех пор, пока элементы системы не станут достаточно простыми для оценки их потенциальной опасности. В общем случае СУ ТПП представляется как многоуровневая конструкция из взаимодействующих элементов, объединяемых в подсистемы различных уровней иерархии.

При формализации предполагается, что элементами СУ ТПП является оборудование, реализующее процесс управления в автоматическом режиме, в ходе выполнения которого могут возникать отказы/опасные отказы под воздействием случайных факторов внешней среды. К устройствам СУ ТПП относятся технические средства контроля, средства аппаратного сопряжения с ТПП, оборудование синхронизации и исполнения команд управления. Технические средства контроля представляют собой приборы индикации $\{IND_k\}$, свидетельствующие о текущем состоянии выполнения технологических операций (ТХО). Устройства аппаратного сопряжения $\{SPR_1\}$ служат для передачи информации о ходе выполнения ТПП в СУ, где она может быть сохранена, обработана и представлена в удобном виде для анализа. Устройства синхронизации отличаются уровнем сложности и реализуют различные варианты объединения сигналов, поступающих с приборов индикации выполнения ТПП, на основе которых формируется результирующий признак надёжности, безопасности выполнения последовательности ТХО. В простейшем случае различают устройства синхронизации, реализующие логические операции вида «И»/«ИЛИ», описывающие одновременное либо взаимоисключающее свершение событий в ходе реализации ТПП. В общем случае устройства синхронизации могут отражать более сложные варианты реализовавшихся событий в виде логических схем, являющихся комбинацией простейших схем синхронизации. Устройства синхронизации обеспечивают запуск исполнительных элементов СУ, которые формируют вид управляющих воздействий, корректирующих параметры ТПП, и активизируют работу устройств синхронизации, обеспечивающих реализацию команд управления. Таким образом, исполнительные элементы СУ (устройства, генерирующие команды управления технологическим процессом) $\{ISP_m\}$, активизируемые устройствами синхронизации i -го вида, после реализации исполнительных функций активизируют устройства синхронизации j -го вида. Поскольку оборудованию соответствуют

реальные физические объекты, между которыми установлены связи, обеспечивающие передачу актуальной управляющей информации, то выбор состава элементов СУ ТПП и определение структурной схемы объекта не составляют труда.

При оценке надёжности СУ ТПП следует учитывать различные аспекты их функционирования. В одних случаях при формализации выделяется множество состояний элементов СУ, характеризующих виды отказов, упорядоченных по степени опасности и в этом смысле классифицированных. В других случаях имеет смысл рассмотрение вероятностного значения продолжительности работы устройств СУ ТПП в часах, указывающего величину наработки эксплуатируемого оборудования на отказ и определяющего состояния/опасные состояния элементов и всей системы. Немаловажным аспектом при исследовании СУ ТПП является рассмотрение состояний как уровней завершенности выполнения оборудованием заданных функций, обеспечивающих надежность и безопасность управления технологическим процессом производства в целом.

В ходе формализации объекта исследования следует учитывать, что основным структурным элементом СУ, обеспечивающим её безопасное функционирование, является сам ТПП, элементами которого являются ТХО, упорядоченное выполнение которых обеспечивает в совокупности его реализацию. ТХО, как правило, имеют случайные параметры выполнения, зависящие от воздействий внешнего окружения, надёжности работы используемого технологического оборудования, наличия используемых материалов и ресурсов. К таким параметрам относятся надёжность, стоимость и время выполнения ТХО, определяющие подобные параметры всей системы. Значительные отклонения от нормы указанных параметров для реализуемых ТХО могут служить основанием, чтобы отнести их к элементам потенциальной опасности, и в процессе моделирования оценить влияние вероятностных параметров каждой из них на надёжность/безопасность реализации производственного процесса и работу СУ в целом.

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.

Моделирование ТПП с элементами потенциальной опасности предполагает использование в качестве исходной информации схемы организации технологического цикла производственного процесса, анализ которой позволяет составить графическую схему, отражающую состав ТХО и связи между ними на выбранном уровне детализации. При переходе к моделированию выделенные структурные элементы объекта заменяются абстрактными элементами модели, вероятностным образом изменяющими свои параметры надёжности.

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. Согласно двум схемам формализации [5] элементам СУ ТПП ставятся в соответствие рёбра или вершины графа. Для каждого из элементов указывается число возможных состояний, определяющих значения исследуемого свойства (надёжности, времени, стоимости), и задаются значения векторов вероятностей этих состояний. Этой информации обычно достаточно, чтобы при-

менить один из автоматизированных методов реализации вероятностно-алгебраического моделирования в составе «ControlSyst».

При оценке надёжности организации СУ ТПП, представленной в модели элементами $K = \{K_i\}$, $i = \overline{1, m}$, параметрами модели являются изменяющиеся во времени векторы вероятностей состояний надёжности $S = \{S_j\}$, $j = \overline{0, n}$ выделенных элементов:

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

Если в качестве характеристики надёжности рассматривается время безотказного функционирования i -го элемента (работы i -го оборудования СУ, 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 СУ ТПП предполагает учёт вероятностей возможных отказов (с классификацией и ранжированием их по типам в зависимости от степени опасности). Первые элементы p_0^i векторов (1) определяют вероятность надёжного функционирования i -ых элементов, остальные указывают на вероятности отказов j -ых типов соответствующих i -ых элементов, упорядоченных по степени возрастания опасности отказов. В этом смысле n -ый элемент вектора (1) задаёт вероятность наиболее опасного отказа.

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

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

Связи между элементами СУ 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 как детерминированными, так и вероятностными. В случае детерминированных функций состояния СУ ТПП однозначно определяются состояниями её исходных элементов. При случайном характере взаимодействия элементов используются вероятностные функции, позволяющие по установившимся состояниям исходных элементов определить вектор возможных состояний СУ ТПП и их вероятности. Функциональные связи определяют условия функционирования системы, при которых различные сочетания уровней исследуемого свойства элементов обеспечивают определённый уровень исследуемого свойства всей системы.

3. Динамика реализации управляющего вероятностно-алгебраического моделирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности

Проектное моделирование СУ ТПП позволяет рассмотреть совокупность вариантов её организации, определив параметры надёжности выполнения ТПП в виде вектора (1) и задав его значения для очередного временного интервала с учётом оценок эксперта-технолога. В этом случае исследуется надёжность/безопасность организации СУ для заданного состава оборудования и возможных информационных связей между его единицами. Предполагается, что параметры надёжной работы элементов СУ изменяются вероятностным образом, определяя тем самым надёжность/безопасность работы всей СУ.

Главной задачей динамического вероятностно-алгебраического моделирования СУ ТПП с элементами потенциальной опасности является выбор такой последовательности управляющих воздействий, при которой изменения в организации ТПП реализуются в нужные моменты времени согласно опережающим результатам вероятностно-

алгебраического моделирования. В этом смысле моделирование позволяет адаптировать ТПП к вероятностным изменениям надёжности выполнения ТХО. Вид управляющего воздействия выбирается с использованием одной из параметризованных моделей в составе комплекса автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst», позволяющего рассмотреть объект на разных уровнях детализации, определив состав элементов и указав семантику состояний этих элементов. Рассмотрим реализацию адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования для ТПП как основного элемента СУ, генерирующей управляющие воздействия на основе предварительного расчёта вероятностных характеристик надёжности/безопасности реализации ТПП.

Адаптивное моделирование на временном интервале T учитывает изменения, происходящие в ходе многократной реализации технологического цикла ТПП. При этом весь интервал моделирования представляется в виде временных интервалов $\{\Delta t_i, i = \overline{1, n}\}$, в совокупности покрывающих временной интервал T . Величина временных интервалов Δt_i выбирается таким образом, чтобы максимально полно учесть частоту случайных событий, оказывающих влияние на результат выполнения ТХО. Каждый из интервалов Δt_i является образом реального временного интервала реализации циклов ТПП, на котором фиксируется статистика по различным типам отказов в ходе выполнения ТХО. Выделяются опасные отказы, приводящие к авариям и чрезвычайным ситуациям на уровне всей системы, и отказы, когда возможно проведение профилактических ремонтных работ по восстановлению надёжности выполнения ТХО путём ремонта технологического оборудования, использования резервного оборудования, восполнения запасов материалов и комплектующих, необходимых для выполнения ТХО. Согласно выделенным типам отказов множество всех состояний ТХО разбивается на следующие группы: состояния надёжного выполнения ТХО $\{S_n\}$; состояния выполнения ТХО, обусловленные простыми отказами $\{S_o\}$; аварийные состояния выполнения ТХО $\{S_a\}$. Информация об отказах, поступающая с приборов индикации $\{INDk\}, k = \overline{1, m}$ с использованием устройств сопряжения $\{SPR_1\}$, фиксируется в информационной базе данных (БД) системы моделирования и представляет собой исходные данные для расчёта начальных параметров моделирования. По имеющимся статистическим данным рассчитываются вероятности состояний надёжной реализации ТХО в виде векторов (1) для текущего временного интервала Δt_i , а именно: состояний надёжного выполнения ТХО; состояний, характеризующихся отказами в ходе выполнения ТХО; состояний, отражающих возникновение опасных отказов в процессе выполнения ТХО.

В ряде случаев по статистическим данным удаётся подобрать законы изменения параметров надёжности выполнения ТХО во времени и представить их в виде аналитических зависимостей или подобрать параметры марковских моделей, описывающих процессы изменения надёжности выполнения ТХО. В обоих случаях такое задание начальных данных позволяет получить оценку надёжности функционирования ТПП в символьном виде [6] и использовать полученные зависимости для прогнозирования изменений в надёжности реализации ТПП при изменении параметров надёжности выполнения ТХО без учёта управляющих воздействий.

Параметры моделирования в виде векторов вида (1) поступают на вход параметризованной модели ТПП, структурно отражающей последовательность выполнения ТХО. Для заданных параметров моделирования реализуется i -ый цикл моделирования, результатом которого являются векторы вида (2), которые вместе с исходными параметрами i -ой итерации моделирования поступают в БД системы моделирования и анализируются блоком управления. В результате анализа наиболее вероятных состояний надёжности выпол-

нения ТХО и реализации технологического цикла в целом устанавливаются значения признаков аварийности для всех ТХО $\alpha_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ и ТПП в целом α_s . Значение признака $\alpha_s = 0$ определяет надёжное выполнение ТХО_j на временном интервале Δt_i . При $\alpha_s = 1$ выполнение ТХО_j сопровождается простыми отказами и возможно восстановление надёжности выполнения ТХО_j путём реализации операций замены или упреждающего перехода на одну из схем одиночного или группового резервирования, обновления состава оборудования, изменения параметров выполнения ТХО_j. При $\alpha_s = 2$ считается, что велика вероятность возникновения опасной аварии при выполнении ТХО_j, имеющей разрушительные последствия на уровне всей системы.

На основе полученных значений признаков α_{ij} аварийности выполнения последовательности ТХО_j для очередного временного интервала Δt_i определяется признак аварийности всего ТПП α_s , на основе которого делаются выводы о возможности реализации ТПП на очередном интервале Δt_{i+1} в установленном режиме либо о необходимости генерации управляющих воздействий.

С учётом эвристических правил, установленных экспертом-технологом для исследуемого ТПП в блоке управления динамикой моделирования, в процессе анализа результатов моделирования для Δt_i интервала моделирования ТПП формируется набор корректирующих мер, определяющих те управляющие воздействия, которые обеспечат последующее надёжное функционирование ТПП и позволят предупредить возникновение аварий в процессе выполнения циклов производственного процесса на очередном временном интервале Δt_{i+1} . Корректирующие меры включают три вида воздействий: обновление/изменение параметров выполнения ТХО; переход к одному из вариантов резервирования ТХО (частичное изменение структурной организации ТСП); изменение структурной организации ТПП.

В том случае, если значение признака аварийности $\alpha_{ij} \neq 0$, в соответствии с правилами моделирования принимаются решения по модификации структурной организации ТПП и корректировке нагрузки. При аварийном выполнении ТХО ($\alpha_s = 2$) по функции распределения разыгрывается время (t_e), необходимое для проведения работ по ликвидации последствий отказов и аварий, возникших в ходе выполнения ТХО_j и направленных на восстановление надёжности/безопасности выполнения ТХО_j, определяющее число итераций моделирования, на которых соответствующий элемент модели исключается из её структурного состава, таким образом приводя в соответствие организацию ТПП с полученными оценками надёжности выполнения ТХО и ТПП в целом. Аналогичные изменения реализуются с использованием устройств синхронизации СУ и в самом объекте моделирования.

В случае признака аварийности $\alpha_{ij} = 1$, корректируются параметры элемента модели, описывающей выполнение ТХО_j. Если удаётся описать процесс изменения надёжности реализации ТХО_j марковской моделью, корректирующее воздействие может означать, например, переход к описанию процесса изменения надёжности выполнения ТХО_j моделью с восстановлением, с одновременной корректировкой параметров выполнения ТХО_j в действующем ТПП, что может быть физически реализовано путём перевода выполнения ТХО_j в режиме периодических профилактических ремонтов. При $\alpha_s = 2$ генерируются возможные варианты модификации всего ТПП, среди которых выбирается лучший с учётом установленного критерия сопоставления.

Таким образом, результаты вероятностно-алгебраического моделирования ТПП на очередной i -ой итерации представляют оценку надёжности выполнения технологического производственного цикла для временного интервала Δt_i , полученную в результате аналитической обработки вероятностных параметров надёжности выполнения совокупности ТХО на временном интервале Δt . Оценки служат исходными данными для генерации блоком управления системы моделирования корректирующего воздействия, направленного на изменение параметров выполнения отдельных ТХО и модификацию структурной организации всего ТПП с учётом преобладающего вида отказов. Выполнение ТПП на временном интервале Δt_{i+1} реализуется с учётом внесённых изменений, которые влияют на надёжность выполнения отдельных ТХО и результирующие характеристики надёжности ТПП.

4. Заключение

Сочетание проектного вероятностно-алгебраического моделирования СУ ТПП и динамического вероятностно-алгебраического моделирования для оптимизации выполнения ТПП обеспечит создание на научной основе безопасных автоматизированных производств и надёжных СУ ТПП. Последовательное распределение элементов СУ ТПП по иерархическим уровням и интеграция их в единую систему сбора, обработки данных и оперативного управления позволит повысить эффективность всех звеньев производства и исключить риск возникновения опасных ситуаций и крупных аварий в процессе реализации технологического цикла производственной системы. При этом предполагается решение ряда задач, позволяющих предупредить опасную ситуацию:

- организация и автоматизация оперативного мониторинга за состоянием надёжности структурных элементов СУ ТПП для различных вариантов нагрузки;
- классификация и формирование вероятностных оценок возможных отказов как отдельных элементов, так и всей СУ ТПП;
- определение оптимального сочетания параметров надёжности структурных элементов СУ ТПП, обеспечивающих заданный уровень надёжности и эффективности организации системы без изменения её структурной организации;
- повышение уровня и, как следствие, скорости надёжной реализации технологического цикла;
- оценка вариантов модификации СУ ТПП по критерию надёжности организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология имитационного моделирования вероятностных технологических процессов производства / И.В. Максимей, Е.О. Попова, А.М. Поташенко [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. – 2006. – № 3 (46). – С. 51 – 55.
2. Сукач Е.И. Применение имитационного моделирования для исследования динамики транспортных потоков региона / Е.И. Сукач // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2006. – № 4 (37). – С. 96 – 99.
3. Смородин В.С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства / В.С. Смородин, И.В. Максимей. – Гомель: М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.
4. Сукач Е.И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е.И. Сукач. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.
5. Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, Ю.В. Жердецкий [и др.] // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 5 (74). – С. 195 – 202.
6. Сукач Е.И. Метод исследования функционально-сложных систем с использованием вероятностно-алгебраического моделирования / Е.И. Сукач // Математичні машини і системи. – 2010. – № 3. – С. 116 – 123.

Стаття надійшла до редакції 05.05.2015