

УДК 681.3

## МЕТОД АДАПТИВНОГО ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ

В.С. СМОРОДИН, Е.И. СУКАЧ, Ю.В. ЖЕРДЕЦКИЙ

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
Советская, 104, Гомель, 246019, Беларусь*

*Поступила в редакцию 11 марта 2016*

Рассматривается метод вероятностно-алгебраического моделирования управляемых технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности, основанный на проведении упреждающего моделирования с использованием одной из параметризованных вероятностно-алгебраических моделей, позволяющий оценить поведение объекта в динамике и тем самым повысить адекватность описания реальных процессов взаимодействия элементов потенциальной опасности в ходе реализации производственного цикла.

*Ключевые слова:* вероятностно-алгебраическое моделирование, система управления, технологический процесс производства, надежность, безопасность.

### Введение

Исследования показывают, что определение стратегии надежной работы систем управления (СУ) технологическими процессами производства (ТПП), функционирующих в условиях влияния большого числа разнообразных факторов, влияющих как на работу самих СУ, так и на реализацию ТПП, сложный и трудоемкий процесс, требующий рассмотрения множества возможных интерпретаций, сравнений и сопоставлений, конечные результаты которого могут иметь достаточно приблизительный характер. С одной стороны, необходимо организовать устойчивое безотказное функционирование СУ, с другой стороны, работа СУ должна обеспечивать генерацию и исполнение команд, позволяющих регулировать и упреждать возникновение опасных ситуаций в ходе реализации ТПП, включающего элементы потенциальной опасности. Такая стратегия может быть сформирована только в результате гармоничного объединения процесса планирования работы СУ и процесса прогнозирования изменений надежности ТПП в ходе многократного его повторения [1].

Для решения такой задачи представляется целесообразным использование математических моделей, учитывающих вероятностную природу функционирования объекта исследования. 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 реструктуризации, который в ряде случаев дает возможность решить классическую задачу синтеза оптимальных систем [3]. Ограничениями применения имитационных моделей является большая ресурсоемкость моделирования и возможность получения лишь приближенного решения, что в ряде случаев не является достаточным при управлении объектами с элементами потенциальной опасности.

В статье предлагается новый подход к решению поставленной задачи, основанный на применении аппарата вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) [4] и средств его реализации в виде программно-технологического комплекса автоматизации моделирования

систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst» [5], обеспечивающих расчет вероятностных характеристик надежности/безопасности управляемых ТПП различной структурной сложности по вероятностно изменяющимся характеристикам составляющих их элементов, включая элементы потенциальной опасности, тем самым формируя оценку риска возникновения опасных ситуаций в ходе реализации производственного технологического процесса и позволяя предупредить возникновение сбоев, аварий и опасных ситуаций в процессе работы СУ ТПП.

### **Формальное описание объекта исследования**

Объектом исследования является ТПП, структуру которого можно представить в виде графа, являющегося аналитически точным и строго формализованным отображением знаний о составе элементов и отношениях между ними, возникающими при реализации производственного процесса.

Предполагается, что элементами управляемых ТПП являются технологические операции (ТХО), часть из которых по ряду признаков может быть отнесена к потенциально опасным. Последовательность выполнения ТХО во времени задается схемой ТПП и определяет структуру графического образа исследуемого объекта, позволяющего применить один из расчетных методов для анализа вероятностных характеристик надежности/безопасности ТПП с учетом надежности/безопасности их элементов.

Рассматриваются два типа управляемых ТПП. К первому типу отнесены ТПП простой графовой структуры (с параллельными и/или последовательными соединениями элементов). ТПП второго типа имеют структурно-сложную организацию, которая описывается сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторяемостью аргументов при их формализации.

Предполагается, что ТПП представляется совокупностью элементов  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ . Число элементов выделяется в соответствии с уровнем детализации изучаемого объекта. Это могут быть как неделимые элементы, представляющие самый высокий уровень детализации ТПП, так и подсистемы, включающие совокупность неделимых элементов, которые рассматриваются как самостоятельные неделимые элементы системы выбранного уровня абстрагирования. При оценке надежности/безопасности ТПП целесообразно разделить все элементы на четыре группы:

- элементы, отказ которых практически не влияет на надежность/безопасность ТПП;
- элементы, характеристики надежности которых за время эксплуатации практически не изменяются и вероятность их безотказной работы близка к единице (малонагруженные элементы);
- элементы, ремонт или регулировка которых возможны при их работе или во время планового технического обслуживания;
- элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к опасному отказу системы.

Очевидно, при анализе надежности/безопасности ТПП имеет смысл включать в рассмотрение только элементы двух последних групп.

Практика показывает, что при анализе вероятностных характеристик ТПП с элементами потенциальной опасности не всегда достаточно рассмотрения двух состояний (работа и отказ). Рассмотрение множества состояний элементов является более информативным, дает целую линейку значений и их вероятностей для выбранного показателя, характеризующего надежность работы ТПП. Предполагается, что элементы характеризуются численными значениями совокупности параметров, которые изменяются в процессе выполнения ТПП и определяют несовместные состояния надежности/безопасности элементов  $S = \{S_j\}, j = \overline{0, n-1}$  на выбранном уровне детализации объекта исследования. При этом состояние элемента определяется перечнем (обычно статическим) параметров данного объекта и текущими (обычно динамическими) значениями каждого из этих параметров.

Состояния структурных элементов ТПП при проведении анализа их надежности могут иметь различную семантическую окраску. Во-первых, при оценке свойства надежности выполнения ТПП может быть выбран один из расчетных показателей надежности: вероятность

безотказного выполнения ТХО, время наработки на отказ при выполнении ТХО и др. Во-вторых, состояния могут описывать вид отказа в ходе выполнения ТХО, часть из которых может быть отнесена к опасным. В-третьих, немаловажным аспектом при исследовании надежности реализации ТПП является рассмотрение состояний ТХО как уровней завершенности их реализации, обеспечивающих надежность и безопасность организации ТПП в целом. Наконец, с надежностью/безопасностью ТПП напрямую связана эффективность его организации, критерием которой может являться время и/или стоимость выполнения взаимосвязанных ТХО. Поскольку сбой в реализации одной из ТХО влечет за собой последовательные сбои множества других ТХО, то время и стоимость реализации ТПП значительно возрастают, а эффективность реализации ТПП снижается. При снижении надежности ТПП время и стоимость его реализации могут значительно превосходить установленные предельные значения и в этом смысле свидетельствовать об аварийной работе производственного объекта. Для оценки эффективности ТПП выделяются состояния, характеризующие время и/или стоимость выполнения ТХО, а по эмпирическим данным, накопленным в ходе натурных экспериментов, устанавливаются вероятности выделенных состояний, являющиеся параметрами моделирования.

В текущий момент времени элемент с заданной вероятностью может находиться в одном из выделенных состояний:

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

Для ТПП первого типа связи между элементами формализуются с учетом отношений, установленных при решении задачи декомпозиции системы, и задаются функциями  $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$ , которые могут быть как детерминированными, так и вероятностными. Функции позволяют не только определить связи между элементами ТПП, но и рассмотреть различные схемы резервирования его участков. В случае детерминированных функций состояния системы однозначно определяются состояниями ее исходных элементов. При случайном характере взаимодействия элементов используются вероятностные функции, позволяющие по установившимся состояниям исходных элементов определить вектор возможных состояний системы и их вероятности. Выделенные элементы  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$  и функциональные связи между ними  $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$  задают структуру графа  $G(F, K)$  исследуемого ТПП.

Для управляемых ТПП второго типа предлагается использовать одну из двух возможных схем формализации [4]. В схеме формализации «элементы-ребра» выделенным элементам сопоставляются ребра  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$  графа  $G(N, K)$ , а вершины  $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$  определяют места связи элементов. В случае применения схемы формализации «элементы-вершины» элементам системы ставятся в соответствие вершины  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$  графа  $G(K, N)$ , а ребра  $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$  определяют связи между ними.

Независимо от выбранной схемы формализации, из множества вершин графа выделяется две вершины, определяющие вход в систему (начало реализации ТПП) и выход из нее (завершение выполнения ТПП). Ставится задача определения вектора вероятностей состояний надежности/безопасности ТПП:

$$P^s = (p_0^s, p_1^s, \dots, p_{n-1}^s), \sum_{j=0}^{n-1} p_j^s = 1. \quad (2)$$

При рассмотрении ТПП в динамике учитываются его особенности: динамическое изменение состояний элементов; взаимное влияние элементов; изменение параметров элементов, определяющее их предельные состояния и требующее реализации корректирующих управляющих воздействий на уровне схемы технологического цикла.

Для учета в модели особенностей изменения параметров надежности элементов используются эвристические правила вида:

**If** [[X1 log\_op D1] log\_svz [X2 log\_op D2], ... ,

$$\log\_svz[Xn \log\_op Dn]] \text{ then } [Y], \quad (3)$$

где  $X_i$  – значения вектора вероятностей или его статистических характеристик для контролируемого элемента;  $D_i$  – константа, определяющая допустимые значения вектора (1) либо его статистических характеристик;  $Y$  – вид корректирующего воздействия;  $\log\_op$  – логический оператор из множества  $\{=, <, >, \leq, \geq, \neq\}$ ;  $\log\_svz$  – логическая связка из множества  $\{\wedge, \vee\}$ .

В соответствии с предпочтениями эксперта, определяющего вид управляющих воздействий ( $Y$ ), правила указывают на изменение: параметров структурных элементов модели вида (1); структурной организации графа модели, адаптируя графовую структуру модели под текущие изменения параметров надежности/безопасности элементов и всей системы; режима эксплуатации элементов, который описывается с использованием одной из форм Марковских моделей.

На вход динамического моделирования подаются вектора вида:

$$P^{it} = (p_0^{it}, p_1^{it}, \dots, p_{n-1}^{it}), \sum_{j=0}^{n-1} p_j^{it} = 1, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}. \quad (4)$$

Результатом динамического моделирования являются вектора вероятностей состояний, характеризующие изменения надежности/безопасности ТПП во времени:

$$P^{st} = (p_0^{st}, p_1^{st}, \dots, p_{n-1}^{st}), \sum_{j=0}^{n-1} p_j^{st} = 1, t = \overline{1, T}. \quad (5)$$

Они позволяют судить об изменении надежности/безопасности выполнения ТПП, определять режим его функционирования и стратегию динамического управления параметрами элементов потенциальной опасности.

Таким образом, формализация динамически изменяющегося управляемого ТПП с целью проведения вероятностного анализа включает следующие действия: выделение его элементов  $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ , построение графовой схемы, отражающей связи его вероятностно-изменяющихся структурных составляющих, задание множества функций  $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$ , описывающих отношения между выделенными элементами и определяющих структурные коэффициенты вероятностно-алгебраического моделирования, выбор способа вероятностного изменения элементов и задание специфической функции управления процессом моделирования ( $U$ ) в виде совокупности продукционных правил, позволяющей реализовать во времени корректирующие воздействия на процесс моделирования.

### **Метод адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования управляемых технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности**

Главной задачей адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования управляемых 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 надежности выполнения ТХО. Вид управляющего воздействия выбирается с использованием одной из параметризованных моделей в составе комплекса «ControlSyst», позволяющего рассмотреть объект на разных уровнях детализации, определив состав элементов и указав семантику состояний этих элементов.

Метод адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования управляемых ТПП с элементами потенциальной опасности, как основного элемента СУ, генерирующей управляющие воздействия на основе предварительного расчета вероятностных характеристик надежности/безопасности реализации ТПП включает последовательность следующих этапов.

*Этап 1. Формирование статистической информации об отказах в ходе выполнения ТХО на очередном временном интервале.* В ходе многократной реализации цикла ТПП на очередном временном интервале из множества  $\{\Delta t, i = \overline{1, n}\}$ , в совокупности покрывающего временной интервал  $T$  реализации производственных циклов, выбирается величина временных

интервалов  $\Delta t_i$  таким образом, чтобы максимально полно учесть частоту случайных событий, оказывающих влияние на результат выполнения ТХО. Каждый из интервалов  $\Delta t_i$  является образом реального временного интервала реализации циклов ТПП, на котором фиксируется статистика по различным типам отказов в ходе выполнения ТХО.

Информация об отказах при выполнении ТХО, поступающая с приборов индикации, с использованием устройств сопряжения СУ фиксируется в информационной базе данных (БД) комплекса моделирования «ControlSyst» и представляет собой исходные данные для расчета начальных параметров моделирования.

*Этап 2. Классификация отказов в ходе выполнения ТХО.* В процессе анализа статистической информации, поступившей в БД, выделяются опасные отказы, приводящие к авариям и чрезвычайным ситуациям на уровне всей системы, и отказы, когда возможно проведение профилактических ремонтных работ по восстановлению надежности выполнения ТХО путем 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 надежного выполнения ТХО  $\{S_n\}$ ; состояния выполнения ТХО, обусловленные простыми отказами  $\{S_o\}$ ; аварийные состояния выполнения ТХО  $\{S_a\}$ .

*Этап 3. Расчет текущих параметров моделирования ТПП.* По имеющимся статистическим данным рассчитываются вероятности состояний надежности реализации ТХО в виде векторов (1) для текущего временного интервала  $\Delta t_i$ , а именно: состояний надежного выполнения ТХО; состояний, характеризующихся простыми отказами в ходе выполнения ТХО; состояний, отражающих возникновение опасных отказов в процессе выполнения ТХО.

*Этап 4. Реализация  $i$ -ой итерации вероятностно-алгебраического моделирования.* 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 вектора вида (2), которые вместе с исходными параметрами  $i$ -ой итерации моделирования поступают в БД комплекса моделирования и анализируются блоком управления динамикой моделирования.

*Этап 5. Анализ результатов  $i$ -ой итерации вероятностно-алгебраического моделирования ТПП.* В результате анализа векторов вероятностей состояний надежности выполнения 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  $\alpha_s$ . Значение признака  $\alpha_{ij}=0$  определяет надежное выполнение ТХО $_j$  на временном интервале  $\Delta t_i$ . При  $\alpha_{ij}=1$  выполнение ТХО $_j$  сопровождается простыми отказами и возможно восстановление надежности выполнения ТХО $_j$  путем изменения параметров выполнения ТХО $_j$ , перехода на одну из схем одиночного или группового резервирования, обновления состава оборудования и размеров ресурсов (материалов и комплектующих). При  $\alpha_{ij}=2$  считается, что велика вероятность возникновения опасной аварии при выполнении ТХО $_j$ , имеющей разрушительные последствия на уровне всей системы.

На основе полученных значений признаков  $\alpha_{ij}$  аварийности выполнения последовательности ТХО $_j$  для очередного временного интервала  $\Delta t_i$  определяется признак аварийности всего ТПП  $\alpha_s$ , значение которого определяет возможность реализации ТПП на следующем интервале  $\Delta t_{i+1}$  в установленном режиме либо о необходимости генерации управляющих воздействий.

С учетом эвристических правил, установленных экспертом-технологом для исследуемого ТПП в блоке управления динамикой моделирования комплекса «ControlSyst», в процессе анализа результатов моделирования для  $\Delta t_i$  интервала моделирования ТПП формируется набор корректирующих мер, определяющих те управляющие воздействия, которые обеспечат последующее надежное функционирование ТПП и позволят предупредить возникновение аварий в процессе выполнения циклов производственного процесса на следующем временном интервале  $\Delta t_{i+1}$ . Корректирующие меры включают три вида воздействий: обновление/изменение параметров выполнения ТХО; переход к одному из

вариантов резервирования ТХО (частичное изменение структурной организации ТПП); 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 ( $\alpha_{ij} = 2$ ) по функции распределения разыгрывается время ( $t_b$ ), необходимое для проведения работ по ликвидации последствий отказов и аварий, возникших в ходе выполнения ТХО<sub>j</sub> и направленных на восстановление надежности/безопасности выполнения ТХО<sub>j</sub>, определяющее число итераций моделирования, на которых соответствующий элемент модели исключается из ее структурного состава, таким образом приводя в соответствие организацию ТПП с полученными оценками надежности выполнения ТХО и ТПП в целом. В случае признака аварийности  $\alpha_{ij} = 1$ , корректируются параметры элемента модели и генерируются схемы его возможного резервирования. Если удастся описать процесс изменения надежности реализации ТХО<sub>j</sub> Марковской моделью, корректирующее воздействие может означать, например, переход к описанию процесса изменения надежности выполнения ТХО<sub>j</sub> моделью с восстановлениями. При  $\alpha_s = 2$  генерируются возможные варианты модификации всего ТПП.

*Этап 6. Реализация упреждающего адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования вариантов модификации ТПП.* Оценки вероятностно-алгебраического моделирования ТПП на очередной  $i$ -ой итерации представляют собой исходную информацию для генерации блоком управления системы моделирования вариантов модификации ТПП, включающих изменение параметров выполнения отдельных элементов модели (ТХО) и модификацию структурной организации всего ТПП с учетом установленного типа отказа.

Для каждого из вариантов модификации ТПП реализуются модельные эксперименты, исходные параметры (1) и результаты (2) которых поступают в БД моделирования и анализируются в соответствии с заданным обобщенным критерием надежности/безопасности, позволяющим выбрать максимально надежный вариант модификации ТПП, требующим минимума материальных затрат для его реализации:

$$\max(W_h = \delta_{1h} \cdot P_h + \delta_{2h} \cdot 1/Q_h^*), \sum_{i=1}^2 \delta_{ih} = 1, h = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где  $0 \leq \delta_{1h} \leq 1$  – весовые коэффициенты важности значений вероятности надежного/безопасного  $h$ -ого варианта ТПП ( $P_h$ ) и нормированного показателя материальных затрат ( $Q_h$ ) на ликвидацию последствий отказов и техническое обслуживание  $h$ -го варианта организации ТПП.

*Этап 7. Реализация оптимального варианта модификации ТПП.* С использованием устройств синхронизации СУ реализуются изменения параметров и структурной организации в самом объекте моделирования. Выполнение ТПП на временном интервале  $\Delta t_{i+1}$  происходит с учетом внесенных изменений (обновления технологического оборудования, использования схем резервирования, выполнения ТХО в режиме профилактического ремонта оборудования, изменения структуры ТПП и др.), которые обеспечивают надежность выполнения отдельных ТХО и безопасность реализации управляемого ТПП. Для обновленного варианта организации ТПП реализуется переход на этап 1.

По завершении адаптивного моделирования на выбранном временном интервале  $T$  в базе данных комплекса моделирования «ControlSyst» содержится значения векторов (4) и (5), а также варианты структурной организации управляемого ТПП на каждой из последовательности итераций.

### Заключение

Для надежной и безопасной реализации управляемых ТПП был предложен подход, основанный на использовании динамического вероятностно-алгебраического моделирования, оптимизирующий выполнение ТПП за счет реализации управляющих воздействий, способствующих предупреждению аварий в ходе выполнения ТПП. Подход не требует больших объемов ресурсов для проведения моделирования и обеспечивает получение точного решения, что гарантирует исключение ошибок в ходе управления ТПП с элементами потенциальной опасности.

# THE ADAPTIVE METHOD OF PROBABILISTIC-ALGEBRAIC SIMULATION CONTROLLED PROCESSES WITH POTENTIAL HAZARDS ELEMENTS

V.S. SMORODIN, E.I. SUKACH, Y.V. ZHERDETSKY

## Abstract

The method of probabilistic-algebraic simulation driven technological production processes with the potential danger elements, based on the conduct of proactive modeling using parameterized probabilistic-algebraic models is described, which is used for assessing the behavior of the object in the dynamics and thus improving the description adequacy of real processes of potential danger elements interaction during realization of the production cycle.

*Keywords:* probabilistic-algebraic simulation, control system, technological production process, reliability, safety.

## Список литературы

1. Сукач Е.И., Жердецкий Ю.В. // Математичні машини і системи. 2015. № 3. С. 213–219.
2. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. 2005. № 3. С. 73–87.
3. Смородин В.С. // Докл. БГУИР. 2012. № 2 (64). С. 77–82.
4. Сукач Е.И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры. Гомель, 2012.
5. Сукач Е.И., Жердецкий Ю.В. Программно-технологический комплекс автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности «ControlSyst» / Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 773.