

МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА

Ю.В. Жердецкий

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

THE METHOD OF PROBABILISTIC-ALGEBRAIC SIMULATION OF POTENTIALLY HAZARDOUS TECHNOLOGICAL PRODUCTION SYSTEMS

Y.V. Zherdetsky

F. Scorina Gomel State University

Рассматривается новый подход к оценке вероятностных характеристик надёжности (безопасности) технологического процесса производства, включающего элементы потенциальной опасности, основанный на применении аппарата вероятностно-алгебраического моделирования.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическое моделирование, надёжность, технологические процессы производства, стохастические алгебры, графы.

A new approach to assessing the probabilistic characteristics of the reliability (safety) of the production process, including elements of potential danger, based on the use of probabilistic-algebraic simulating is considered.

Keywords: probabilistic-algebraic simulation, reliability, technological processes of production, stochastic algebras, graphs.

Введение

Исследования показывают, что 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. Поэтому 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 [1].

При выборе вариантов реализации ТПП необходимо учитывать сложность и масштабы процессов, подлежащих воспроизведению, большое число случайных факторов, затрудняющих надёжную реализацию технологических циклов. Поэтому самым перспективным для решения задачи оценки надёжности / безопасности технологической системы является использование метода моделирования и программно-технологических средств его автоматизации, обеспечивающих системный подход к решению поставленной задачи.

Модели технологических систем производства с элементами потенциальной опасности должны воссоздавать самые опасные режимы их работы, которые редко проявляются в повседневных условиях эксплуатации, но должны быть изучены при их разработке на стадии проектирования и производственной эксплуатации [2].

Вероятностную природу функционирования ТПП позволяет учесть имитационное моделирование, обеспечивающее высокий уровень детализации объекта, возможность рассмотрения его в динамике, определение его «узких мест» и выбор рационального варианта организации. Для ТПП с переменной структурой возможна реализация метода пошаговой реструктуризации, базирующегося на имитационном моделировании и позволяющего решить классическую задачу синтеза оптимальных систем [3].

Однако большая ресурсоемкость этого способа, невозможность оценки влияния редких событий на надёжность реализации технологического цикла, ограничения в точности получаемого решения не позволяют использовать имитационное моделирование для оценки надёжности и безопасности ТПП с элементами потенциальной опасности.

В статье описывается новый метод вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) потенциально опасных технологических систем производства (ТСП), который подразумевает поэтапное сближение сложной современной технической науки с опытом, полученным на практике, позволяющее в сжатые сроки обеспечить надёжное функционирование технологических систем производства. Высокоэффективное направление такого взаимодействия подразумевает применение моделирования ТСП, как на стадии их первоначальной разработки, проектное моделирование, так и использование моделей в составе алгоритмов в процессе работы ТСП [4].

Для автоматизации всех этапов вероятностно-алгебраического моделирования ТПП с элементами потенциальной опасности используется программно-технологический комплекс «Control-Syst» [5], реализующий расчет вероятностных характеристик надежности/безопасности ТПП по вероятностным характеристикам их структурных элементов, включая элементы потенциальной опасности, тем самым формируя оценку риска возникновения опасных ситуаций и позволяя предупредить возникновение сбоев, аварий в работе ТСП с учетом сложности её структурной организации.

1 Идея метода

Идея метода заключается в разложении исследуемой ТСП с элементами потенциальной опасности на элементарные части, создании моделей, соответствующих структуре и особенностям функционирования, выделенных при разложении частей, объединении полученных моделей, представляющих объект исследования, с элементами потенциальной опасности, и расчитанных значений в общую модель для всей системы и значения с использованием аппарата вероятностно-алгебраического моделирования [6].

Серьезным отличием вероятностно-алгебраического подхода от популярных логико-вероятностных методов является возможность рассмотрения ТСП с элементами потенциальной опасности со множеством состояний и применение разнообразных операций, позволяющие описать сложные функциональные связи между всеми элементами системы [7].

Метод моделирования ТСП с элементами потенциальной опасности базируется на двух положениях:

1. Всем элементам изучаемой системы, отобраным в процессе её разложения на элементарные части, соотносится набор состояний, каждое состояние описывается совокупностью значений параметров надёжности системы и изменяется вероятностным образом. Вектору состояний элемента ставится в соответствие вектор вероятностей надёжности элемента.

2. Между элементами ТСП с элементами потенциальной опасности устанавливаются связи, которые представляются в виде функций, описывающих взаимодействие элементов и определённым образом влияющих на надёжность реализации ТПП. Набор функций устанавливается с учётом особенностей исследуемых систем и решаемых задач.

2 Этапы метода

Использование метода вероятностно-алгебраического моделирования ТСП с элементами потенциальной опасности предполагает последовательное выполнение следующих этапов.

На *этапе 1* решаются задачи сбора и подготовки исходных данных для проведения ВАЛМ надёжности системы. Этап включает три взаимосвязанные части.

1. На основе содержательного описания ТСП формируется множество её элементов $K = \{K_i\}$ и функциональных отношений (пространственных или временных) между этими элементами $F = \{F_j\}$. Выделяются элементы ТСП, характеристики которых наиболее существенным образом влияют на функционирование системы, изменяя вероятностные значения надёжности и определяя некоторый уровень нарушения выполнения предписанных системе функций.

Разрабатывается графическая схема $G(F, K)$, определяющая структуру вероятностно-алгебраической модели исследуемой системы, где F обозначает множество вершин (детерминированные / вероятностные, бинарные / n -арные функции), определяющих связи между элементами системы, K – множество рёбер, соответствующих элементам исследуемой системы и промежуточным результатам моделирования. Графическая схема имеет вид дерева, что обосновывается компактностью задания модели и ее широким практическим использованием для исследования надёжности ТСП. Она представляет собой строго формализованное отображение знаний о том, какие элементы включает система и какие отношения между ними возникают в процессе её функционирования.

2. Для совокупности выделенных элементов ТСП разрабатываются вероятностные модели, отражающие особенности их функционирования. При этом выбирается вид модели, определяются её параметры и реализуется первичное вероятностное моделирование. Для описания вероятностного изменения надёжности отдельными элементами используются различные параметрические функции, параметром которых может быть время, состояния элементов и системы в целом.

В ряде случаев описание особенностей стохастического процесса изменения характеристик надёжности элементов возможно с использованием различных видов Марковских моделей, для задания параметров которых используются стохастические матрицы, являющиеся элементами представлений стохастических алгебр, определяющих процесс вероятностно-алгебраического моделирования. Значения стохастических матриц, описывающих случайные Марковские процессы изменения надёжности элементов ТСП и однозначно определяющих Марковский граф переходов в пространстве состояний, определяются путём проведения натурных экспериментов с элементами исследуемых ТСП и последующей обработки полученных статистических данных.

При использовании Марковских моделей определённого вида [7] имеется возможность нахождения матрицы M'_{\max} , сохраняющей структуру

модели и свойства её параметров при уменьшении шага моделирования, что соответствует более детальному рассмотрению процесса функционирования элемента и изменения параметров его надёжности.

Первичное моделирование вероятностного процесса изменения надёжности элементов реализуется с использованием выбранных видов моделей, позволяющих определить значения совокупности векторов вероятностей, характеризующих непрерывное изменение надёжности выделенными элементами системы.

3. Исходя из анализа влияния надёжности элементов друг на друга и ТСП в целом устанавливаются управляющие правила вида «если..., то...». Содержание условных частей правил и их заключений формируется на основе оценок экспертов в исследуемой предметной области, полученных в результате опытных наблюдений за процессом реализации технологического цикла производственной системы и выявляющих закономерности изменения надёжности элементов и объекта в целом. К ним можно отнести следующие виды зависимостей:

- изменение параметров работы одних элементов в зависимости от произошедших изменений с другими элементами и всей системой;
- изменение состава функций, задающих связи между элементами в зависимости от текущего состояния элементов и всей системы;
- изменение состава элементов, функционирующих одинаково.

Примером может служить правило, регулирующее ситуацию критического изменения состояния надёжности элемента ТСП. В условной части такого правила анализируется математическое ожидание величины надёжности элемента. При выходе контролируемого статистического показателя за установленные границы запускается механизм реализации корректирующих воздействий, обновляющие параметры контрольного элемента системы либо изменяющие параметры функционирования элементов, зависимых от него во времени.

4. С учётом целей исследования задаётся критерий надёжности функционирования ТСП, который определяет допустимые границы изменения контролируемых параметров системы, определяющих состояния надёжности системы. Для сложных ТСП, включающих многофункциональные технологические процессы, задается несколько критериев надёжности и используются различные виды моделей. По результатам вероятностно-алгебраического моделирования объекта исследования реализуется процедура выбора решения с учётом многих критериев установленных для совокупности математических моделей. Сформированное решение определяет надёжный вариант организации ТСП с элементами потенциальной опасности.

На *этапе 2* формируется алгебраическая форма модели ТСП. С использованием средств автоматизации процесса моделирования происходит объединение моделей элементов ТСП и рассчитанных с их помощью показателей надёжности элементов в итоговую вероятностно-алгебраическую модель и вероятностные показатели. Алгебраическая форма модели строится с использованием графической схемы системы $G(F,K)$ и совокупности установленных функций. В символьном виде она записывается следующим образом:

$$Z = F_1(F_2(Y_1, Y_2, F_3(Y_3, Y_5), \dots, F_z(Y_{m-1}, Y_m))),$$

где $F = \{F_j\}$, $j = \overline{1, z}$ – множество функций, определяющих отношения между элементарными устройствами модели $Y = \{Y_i\}$, $i = \overline{1, m}$. Аргументами функций, описывающих взаимодействие элементов являются состояния элементов, вероятностные значения которых задаются векторами вероятностей $P = \{P^i\}$, $i = \overline{1, n}$.

Последовательность преобразований, символично представленная в виде алгебраической формы модели ТСП, позволяет сформировать вектор вероятностей состояний надёжности исследуемого объекта с учётом структурной вложенности используемых функций ВАЛМ.

На *этапе 3* строится и используется вероятностная форма модели ТСП. Эта форма определяет последовательность расчётов вероятностных показателей надёжности исследуемой ТСП, которая реализуется путём автоматического преобразования алгебраической формы модели в вероятностную:

$$P^{st} = P(\{P^{it}, Z\}, i = \overline{1, m}, t = \overline{1, T}), \quad (2.1)$$

где $P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, \dots, p_n^{it})$ – векторы вероятностей состояний надёжности элементов системы, $P^{st} = (p_1^{st}, p_2^{st}, \dots, p_n^{st})$ – вектор вероятностей состояний надёжности ТСП,

$$Z = F_1(F_2(Y_1, Y_2, F_3(Y_3, Y_5), \dots, F_z(Y_{m-1}, Y_m)))$$

– алгебраическая модель исследуемой ТСП.

Статически ВАЛМ реализуется путём последовательного вероятностно-алгебраического умножения векторов вероятностей устройств модели с учётом уровня вложенности функций и коэффициентов вероятностно-алгебраического моделирования по формуле

$$p_k^3 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij}^k p_i^1 p_j^2, \quad i, j, k = \overline{1, n},$$

где $P^1 = (p_1^1, p_2^1, \dots, p_n^1)$, $P^2 = (p_1^2, p_2^2, \dots, p_n^2)$ и $P^3 = (p_1^3, p_2^3, \dots, p_n^3)$ вектора вероятностей состояний устройств Y_1 , Y_2 и Y_3 , $Z = F(Y_1, Y_2)$.

Коэффициенты a_{ij}^k называются коэффициентами вероятностно-алгебраического моделирования. Они задаются с учётом функции,

определяющей отношения между устройствами алгебраической модели, и удовлетворяют условию

$$\forall i, j, k \quad a_{ij}^k \geq 0 \text{ и } \sum_{k=1}^n a_{ij}^k = 1.$$

Если отношение между устройствами модели определяется детерминированной функцией, коэффициенты вероятностно-алгебраического моделирования определяются следующим образом

$$\begin{cases} a_{ij}^k = 1, & \text{если } k = F(i, j), \\ a_{ij}^k = 0, & \text{если } k \neq F(i, j). \end{cases}$$

Повысить уровень адекватного описания объекта исследования позволяет динамическое ВАЛМ, которое предполагает многократную реализацию статического вероятностно-алгебраического моделирования на каждой итерации многошагового процесса исследования объекта в динамике с учетом взаимодействия независимых элементов и корректирующего управления. В соответствии с выбранным шагом моделирования элементы изменяют свои параметры в дискретные моменты времени между итерациями статического моделирования, а в ходе одномоментного моделирования рассматриваются как независимые.

На каждой итерации динамического ВАЛМ контролируются текущие вероятностные характеристики надёжности системы. Считается, что соответствие их значений допустимым границам изменения обеспечивает необходимый уровень надёжной организации ТСП. Использование управляющих правил, которые автоматически просматриваются и срабатывают в процессе динамического вероятностно-алгебраического моделирования, позволяет учесть эволюционную зависимость элементов объекта исследования.

В случае выхода вероятностных параметров надёжности элементов или всей ТСП за допустимые границы их изменения запускается процесс генерации корректирующих управляющих воздействий. В рамках описанного аппарата различают следующие виды воздействий: изменение параметров элементов ТСП, изменение структуры модели; завершение процесса моделирования. После реализации управляющих воздействий, запущенных в результате срабатывания правил моделирования, процесс вероятностно-алгебраического моделирования продолжается.

Процесс моделирования продолжается и в случае нахождения вероятностных характеристик в допустимых границах. Результаты моделирования для каждой итерации рассмотрения объекта в динамике сохраняются в информационной базе данных модели.

На этапе 4 анализируются полученные результаты моделирования. К этому моменту в базе данных модели находится вариант рациональной структуры исследуемой системы с параметрами отдельных компонентов и всей ТСП,

а также варианты его изменения в процессе функционирования, позволяющие обеспечить необходимый уровень надёжности функционирования системы с учетом реализовавшихся изменений вероятностных параметров надёжности элементов.

Результирующие векторы вероятностей надёжности системы (2.1) позволяют судить об изменении надёжности системы во времени. В процессе моделирования отслеживаются нарушения в функционировании системы, требующие определенных мер, корректирующих как работу отдельных элементов, так и параметров их взаимодействия. При регистрации нарушения допустимых границ изменения надёжности системы определяется элемент системы, вероятностные характеристики которого привели к общему нарушению работы ТСП. В случае наличия множества таких элементов устанавливается степень влияния каждого на надёжность ТСП в целом. Таким образом реализуется возможность установления причин снижения надёжности функционирования ТСП.

Своевременное выявление нарушений в работе элементов и реагирование на них путём изменения режима их работы, замены элементов, корректирующих воздействий на работу остальных элементов, значительно повысит уровень доверия к моделям ТСП и обеспечит получение более точных результатов моделирования.

Заключение

Описанный метод направлен на теоретическое развитие и обобщение важной практической задачи моделирования и вероятностной оценки надёжности (безопасности) потенциально опасных систем производства с различными особенностями функционирования при рассмотрении случайных процессов, приводящих к отказам.

Использование метода позволяет оценить надёжность и безопасность ТПП, оценить изменение вероятностных характеристик системы во времени с учётом управляющих воздействий на каждом шаге моделирования. Формализация ТПП в виде древовидной структуры обеспечивает ряд преимуществ, используемых при автоматизации процесса моделирования вероятностных характеристик надёжности объекта, а именно:

- наглядное представление отношений между элементами системы;
- изменение параметров терминальных узлов;
- установление уровней иерархии элементов системы;
- замещение функциональных связей между элементами системы вероятностными расчётами;
- использование эффективных алгоритмов обхода узлов дерева, сложность которых зависит от количества уровней дерева, т. е. приблизительно от $\log_2 n$ (n – количество узлов).

Метод вероятностно-алгебраического моделирования ориентирован на определение интегральных вероятностных показателей надежности/безопасности ТПП, увеличение числа элементов которых и их состояний не приводит к экспоненциальному усложнению расчетов. К положительным особенностям данного метода можно отнести следующие: возможность оперировать вероятностными состояниями элементов, для описания отношений между которыми используются произвольные функции; наличие алгебраической основы, позволяющей единым образом описать детерминированные и вероятностные связи между элементами; возможность учитывать в динамике эволюционную зависимость элементов. Новизна метода проявляется в новых возможностях, позволяющих решать обратные задачи, получать решение в символьном виде, переходить к непрерывному времени моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Расчёт надёжности и безопасности технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности* / О.М. Демиденко, В.С. Смородин Е.И. Сукач Ю.В. Жердецкий // Математические машины и системы. – 2016. – № 2. – С. 148–155.
2. *Жердецкий, Ю.В.* Вероятностно-алгебраические модели технологических систем производства с элементами потенциальной опасности / Ю.В. Жердецкий // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2014. – № 6 (87). – С. 123–128.

3. *Смородин, В.С.* Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В.С. Смородин, И.В. Максимей. – М-во образования РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.

4. *Сукач, Е.И.* Метод адаптивного вероятностно-алгебраического моделирования управляемых технологических процессов производства с элементами потенциальной опасности / В.С. Смородин, Е.И. Сукач, Ю.В. Жердецкий // Доклады БГУИР. – 2016. – № 3 (26). – С.80–84.

5. *Жердецкий, Ю.В.* Вероятностно-алгебраическое моделирование как средство оценки надёжности при проектировании электроэнергетических систем / Е.И. Сукач, М.А. Бужан, Ю.В. Жердецкий // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 77–82.

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

7. *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.

Поступила в редакцию 05.06.19.