

УДК 004.942

Астаев К.А., Исабекова О.А.

Российский технологический университет, Москва, Россия

Анализ устойчивости технологических процессов к рискам с применением методов имитационного моделирования

Аннотация: В статье исследуется роль имитационного моделирования в повышении устойчивости производственных процессов в условиях неопределённости. Рассмотрены ключевые категории рисков (технические, организационные, внешние, кибер- и финансовые) и методы их анализа (Монте-Карло, дискретно-событийное, агентное моделирование). Показано, что ИМ позволяет прогнозировать сценарии, оптимизировать решения и минимизировать риски без реальных затрат. В данной статье предложены методы оценки устойчивости на основе различных подходов к моделированию, что позволяет повысить эффективность управления рисками на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, Устойчивость производственных процессов, Технологические риски, Управление неопределённостью.

Astaev K.A., Isabekova O.A.

Analysis of technological process resilience to risks using simulation methods

Abstract: The article explores the role of simulation modeling in enhancing the resilience of production processes under uncertainty. Key risk categories (technical, organizational, external, cyber, and financial) and their analysis methods (Monte Carlo, discrete-event, and agent-based modeling) are examined. The study demonstrates that simulation modeling enables scenario forecasting, solution optimization, and risk mitigation without real-world costs. This article proposes methods for assessing resilience based on various modeling approaches, which allows improving risk management efficiency in industrial enterprises.

Key words: Simulation modeling, Production process resilience, Technological risks, Uncertainty management.

Введение

Современная промышленность развивается в условиях высокой неопределённости, быстрой цифровизации, нестабильной экономической и политической обстановки. В таких условиях устойчивость технологических процессов — один из ключевых факторов, обеспечивающих непрерывность производства, безопасность и конкурентоспособность. Устойчивость означает способность процесса сохранять эффективность, функциональность и безопасность при

воздействии неблагоприятных факторов, включая внезапные или долговременные риски. Данная статья призвана обосновать эффективность имитационного моделирования как ключевого инструмента для анализа и управления технологическими рисками в условиях неопределённости. Целью работы является систематизированное рассмотрение методов моделирования в привязке к различным типам производственных рисков.

Сами по себе риски неизбежны — они сопровождают любую человеческую и техническую деятельность. Однако степень их воздействия может существенно отличаться в зависимости от того, насколько грамотно предприятие управляет неопределённостью и насколько эффективно оно прогнозирует возможные сценарии развития событий. Здесь ключевую роль начинает играть имитационное моделирование — современный инструмент, позволяющий не просто предсказать возможные исходы, но и управлять ими с учётом всей сложности системного взаимодействия.

Имитационное моделирование предоставляет возможность провести «виртуальные эксперименты» над производственной системой, не подвергая её риску. Это даёт шанс проанализировать чувствительность процессов к внутренним и внешним воздействиям, протестировать управленческие решения и выработать устойчивые стратегии реагирования.

Технологические риски и их влияние на устойчивость процессов

Для полноценной оценки устойчивости производственного процесса необходимо чётко классифицировать и проанализировать все возможные риски. Они могут быть разделены на следующие категории [1]:

Технические риски

К ним относятся поломки оборудования, износ деталей, сбои в автоматике и программном обеспечении. Часто такие риски накапливаются незаметно — из-за некачественного техобслуживания, использования устаревших систем или ошибок эксплуатации. Результатом может стать выход из строя ключевых узлов, простой, нарушение технологических циклов и снижение качества продукции.

Организационные риски

Сюда входят факторы человеческого и административного характера: ошибки оператора, нехватка инструкций, неэффективное распределение ролей и смен, конфликт интересов, отсутствие должного уровня подготовки персонала. Эти риски могут нести как локальный характер, так и каскадное влияние на всю цепочку процесса.

Внешние риски

Включают факторы, находящиеся вне прямого контроля предприятия: перебои в поставках, изменение стоимости сырья, форс-мажорные события (наводнения, пандемии, геополитические конфликты), изменения

нормативно-правовой базы. Они требуют от системы гибкости и быстрой адаптации.

Кибер-риски

С учётом роста внедрения цифровых систем управления (SCADA, MES, ERP) и Интернета вещей, уязвимость ИТ-инфраструктуры становится критичной. Кибератаки, сбои в передаче данных, вирусы или хакерские вторжения могут парализовать работу всего предприятия.

Финансово-экономические риски

Связаны с изменениями на макроуровне: колебания валют, рост цен на энергоносители, изменения в налоговой политике. Эти риски напрямую влияют на себестоимость продукции и рентабельность бизнеса.

Каждому риску соответствует свой «вес» в системе, а также временная и пространственная структура воздействия. Некоторые риски кратковременны, но мощны (например, авария), другие развиваются медленно, но влияют кумулятивно (износ, недофинансирование). Поэтому управление устойчивостью требует системного подхода и инструментов, способных учитывать сложные связи между факторами.

Имитационное моделирование как инструмент анализа рисков

Имитационное моделирование (ИМ) — это метод, позволяющий исследовать поведение системы путём построения её математического или логического представления и последующего проигрывания различных сценариев развития событий. Суть заключается в создании цифровой модели, максимально приближённой к реальному объекту, и оценке её реакции на различные воздействия [2].

В отличие от традиционных методов анализа, имитационное моделирование предоставляет следующие преимущества:

Динамичность: имитационные модели показывают, как процессы развиваются во времени. Это особенно полезно для производств, где действия повторяются или идут непрерывно — можно проследить, как изменения в одном моменте повлияют на всё остальное.

Гибкость: в таких моделях легко менять параметры: количество ресурсов, расписание, порядок операций и многое другое. Это позволяет проверять разные варианты и находить оптимальные решения.

Безопасность: моделирование помогает заранее проверить, что произойдёт при сбоях, авариях или других нестандартных ситуациях. Всё это можно сделать без риска для оборудования, людей или бизнеса.

Визуализация: современные программы для моделирования показывают процессы на экране — в виде схем, графиков, а иногда и анимации. Это делает модель более понятной и наглядной даже для тех, кто не специалист.

Внедрение ИМ позволяет не только оценить вероятность и последствия рисков, но и выработать превентивные меры, выявить точки уязвимости, спрогнозировать эффективность антикризисных стратегий [3].

Методологическая база имитационного моделирования

Разнообразие систем и задач требует применения различных методов моделирования. Ниже представлены наиболее распространённые из них с углублённым объяснением:

Метод Монте-Карло

Этот стохастический метод основан на использовании случайных чисел для генерации большого количества сценариев. Сценарии формируются с учётом заданных вероятностных распределений входных параметров, после чего проводится многократное проигрывание модели.

Например, если вероятность отказа оборудования составляет 5% в сутки, метод Монте-Карло позволит определить, как часто и с какими последствиями это приведёт к простоям за год. Метод особенно полезен в инвестиционном анализе, оценке экономической устойчивости и планировании рисков при запуске новых производств [4].

Дискретно-событийное моделирование (DES)

Подходит для описания процессов, где действия происходят в результате дискретных событий: поступление заказа, завершение операции, отказ узла. Модели DES построены на очередях, событиях и ресурсах. С помощью таких моделей можно оценить загрузку производственных мощностей, выявить узкие места, рассчитать время выполнения заказа.

Этот метод нашёл широкое применение в логистике, производственном планировании, управлении складами и цепочками поставок.

Системная динамика

Это метод на основе дифференциальных уравнений, отражающих взаимодействие переменных во времени. Он особенно эффективен для стратегического анализа — например, как изменения в структуре спроса повлияют на запасы, производство, прибыль в течение нескольких лет [5].

Системная динамика используется в моделировании макропроцессов, таких как трансформация бизнес-моделей, экологическое влияние производств, инвестиционная устойчивость.

Агентное моделирование

Один из наиболее продвинутых методов, позволяющий моделировать поведение индивидуальных объектов (агентов), взаимодействующих друг с другом. Агенты могут быть машинами, людьми, складскими единицами, логистическими узлами — и каждый обладает собственным набором правил.

Применяется для анализа поведенческих сценариев (например, эвакуация персонала при аварии, реакции цепочки поставок на сбой, поведение сотрудников в условиях перегрузки).

Смешанные подходы

Комбинирование вышеперечисленных методов позволяет строить модели «полного цикла», охватывающие как поведенческие аспекты, так и технические. Например, можно объединить агентную модель поведения персонала с дискретно-событийной моделью работы оборудования и стохастическим моделированием поступления сырья.

Примеры практического применения ИМ в управлении рисками

Рассмотрим несколько примеров, демонстрирующих практическую пользу имитационного моделирования:

Металлургия: моделирование последовательных отказов на доменной печи позволило заблаговременно разработать меры реагирования и изменить график технического обслуживания [6, 7].

Химическая промышленность: с помощью метода Монте-Карло оценивались риски загрязнения при аварийном выбросе. Это дало возможность перераспределить ресурсы системы аварийной защиты.

Логистика: DES-модели позволили оптимизировать движение транспортных средств между складами, сократив задержки поставок на 15%.

IT-инфраструктура: моделирование кибератак с различными сценариями проникновения помогло усилить слабые звенья в системах безопасности.

Энергетика: агентное моделирование поведения потребителей в ответ на аварии в сетях помогло понять, как лучше распределить нагрузки в условиях перебоев.

Заключение

Имитационное моделирование становится стратегически важным инструментом в управлении устойчивостью технологических процессов. Его использование позволяет:

- переходить от реактивного управления к проактивному;
- учитывать сложные взаимосвязи между компонентами системы;
- минимизировать влияние случайных и катастрофических событий;
- адаптировать систему к новым вызовам и требованиям рынка;
- обучать персонал на базе виртуальных моделей.

В условиях возрастающей сложности производственных систем и их цифровизации отказ от использования имитационного моделирования равносителен отказу от прогнозирования в пользу догадок. Поэтому современные предприятия, ориентированные на устойчивое развитие и долгосрочную эффективность, всё чаще внедряют ИМ в свои системы управления.

Список литературы

1. Вяцкова Н.А. Классификация методов анализа и оценки рисков. — 2014. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-metodov-analiza-i-otsenki-riskov.pdf>

2. Петрова Л.В. и др. Методологические аспекты имитационного моделирования экологических систем. — 2014. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-aspekty-imitatsionnogo-modelirovaniya-ekologicheskikh-sistem.pdf>
3. Байрамукова Е. Применение методов имитационного моделирования при оценке рисков и оптимизации процессов управления на промышленных предприятиях. — 2008. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-pri-otsenke-riskov-i-optimizatsii-protseessov-upravleniya-na-promyshlennyh.pdf>
4. Ольгаренко В.И. и др. Обоснование эффективности планирования технологических процессов водопользования и оперативное управление водораспределением на базе использования метода Монте-Карло. — 2018. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-effektivnosti-planirovaniya-tehnologicheskikh-protseessov-vodopolzovaniya-i-operativnoe-upravlenie-vodoraspredeleniem-na.pdf>
5. Мальков М.В. и др. Моделирование технологических процессов: методы и опыт. — 2010. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tehnologicheskikh-protseessov-metody-i-opyt.pdf>
6. Краснов А.Е. и др. Оценивание устойчивости критических информационных инфраструктур к угрозам информационной безопасности. — 2021. — URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/viewFile/1328/1223>
7. Цопа Н.В. О необходимости применения риск-ориентированных методов для обеспечения устойчивости инвестиционно-строительного проекта. — 2017. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-neobhodimosti-primeneniya-risk-orientirovannyh-metodov-dlya-obespecheniya-ustoychivosti-investitsionno-stroitelnogo-proekta.pdf>

Сведения об авторах:

Астаев К.А., магистр, Российский технологический университет, Москва, Россия

Исабекова О.А., кандидат технических наук, доцент, Российский технологический университет, Москва, Россия

Astaev K.A., Master's degree, student, Russian Technological University. Moscow, Russia,

Isabekova O.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Russian Technological University. Moscow, Russia,
