

УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

В.С. СМОРОДИН

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины
Советская, 104, Гомель, 246028, Беларусь*

Поступила в редакцию 7 февраля 2012

Предложен новый подход к унификации методов системных исследований в области проектного моделирования сложных систем с вероятностными параметрами их функционирования на основе конечного множества математических моделей. В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей вероятностных производственных систем.

Ключевые слова: классы сложных систем, вероятностные производственные системы, динамические имитационные модели, синтез оптимальной структуры.

Введение

В настоящее время накоплен большой опыт построения математических моделей объектов исследования из различных отраслей науки, техники, промышленности и экономики. Однако проявляющаяся последнее время тенденция к использованию общесистемных принципов и методов исследований [1] в различных областях знаний наталкивается на определенные трудности. Это связано, как известно, с целым комплексом различных причин: наличием больших объемов разнородной информации в различных областях знаний, использованием различных понятийных аппаратов, профессиональной разобщенностью исследователей и других.

Многочисленные попытки унификации системного подхода [2] при решении конкретных задач науки и практики привели к понятию сложной системы как многопараметрического объекта, представимого конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы. При этом появляется возможность выделить классы сложных систем со специфическими свойствами, на основании которых разрабатываются методологические принципы построения математических моделей, которые характеризуются единой математической терминологией и могут быть доступны специалистам различных предметных областей.

Такой подход дает основания рассчитывать в дальнейшем на создание необходимой базы, позволяющей исследователю работать с системами любой степени сложности, вне зависимости от ее физической сущности или ограниченности рамками определенной формализации. В тексте данной статьи к классам сложных систем относятся производственные и экономические системы, вычислительные сети, системы управления, системы энергообеспечения, а также другие системы, призванные обеспечивать безопасность жизнедеятельности и производства.

Системный анализ сложных систем положен в основу исследований производственных систем с вероятностными характеристиками их функционирования (вероятностных производственных систем) как класса сложных систем. При этом под вероятностными характеристиками функционирования могут пониматься характеристики надежности функционирования оборудования, задействованного в ходе реализации технологического цикла производства, харак-

теристики выполнения технологических операций, качественные характеристики используемых в процессе производства материалов и комплектующих изделий и другие.

В качестве инструмента для реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей.

Краткий анализ состояния вопроса

Как показал анализ современного состояния разработок в области исследования и проектирования технологических объектов с вероятностными характеристиками их функционирования [3], проблема моделирования вероятностных производственных систем состоит в недостаточной результативности методов их исследования при увеличении количества учитываемых параметров, в особенности для тех случаев, когда структура технологического цикла изменяется в процессе функционирования объекта исследования.

Это связано, в первую очередь, с многообразием сложных технологических систем, в ходе реализации которых могут изменяться параметры их функционирования и структура технологического цикла; сложностью практических задач при оценке уровня надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов; необходимостью учета человеческого фактора при выполнении работ на потенциально опасных объектах.

В соответствии с вышесказанным является актуальной задача обеспечения надежности и безопасности функционирования производственных систем, а также повышение эффективности их использования. Одним из подходов на пути решения данной проблемы является проектное моделирование рациональной структуры вероятностных производственных систем как на стадии проектирования новых, так и при эксплуатации существующих технологических линий.

Поэтому разработка новых методов, программных средств анализа и синтеза оптимальной структуры наиболее сложных вероятностных технологических процессов, использующихся при организации работ на ответственных объектах при наличии оборудования, которое может отказывать и служить источником возникновения аварий техногенного характера, являются весьма актуальными с научной и практической точек зрения.

Методика построения компонентов динамической имитационной модели вероятностной производственной системы

Для построения компонентов динамической имитационной модели вероятностных производственных систем использовалась агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства, реализующая агрегатный способ имитации сложных систем, а также способ формализации вероятностных производственных систем на основе вероятностных сетевых графиков (ВСГР) [4]. При этом используется шесть типов агрегатов-имитаторов:

$ATOP_{ij}$ – агрегат-имитатор выполнения технологической операции ($MTXO_{ij}$);

$ASOB_i$ – агрегат-имитатор свершения i -го события в процессе имитации функционирования вероятностной производственной системы (ВПС);

$AOBIN_r$ – агрегат-имитатор функционирования оборудования индивидуального пользования с номером r ;

$AKAN_r$ и $AOBOP_r$ – агрегат-имитатор совместного использования оборудования общего пользования с помощью выделенного канала;

$APROC_k$ – процедура-имитатор с номером k ликвидации аварийной ситуации при выполнении имитационной модели (ИМ) ВПС.

Каждый из этих агрегатов представляет собой реентерабельную программу из конечного множества математических моделей, составляющих математическую модель исходной вероятностной производственной системы. Упомянутые модели агрегатов-имитаторов в базе данных модели имеют свой набор переменных и статистик моделирования в соответствии с версией модели. Количество версий равно числу агрегатов данного типа в ИМ ВПС. Динамика реализации алгоритмов этих агрегатов одинакова для каждого типа агрегатов, но каждая из версий

может находиться в различных состояниях, согласно временной диаграмме реализации агрегатов в модельном времени. Рассмотрим кратко динамику реализации алгоритма одной из версий этих агрегатов.

$AMTXO_{ij}$ представляет собой четырехполюсный агрегат, имитирующий выполнение технологической операции $MTXO_{ij}$ в ИМ ВПС. В режиме прямой имитации приходит сигнал от $ASOB_i$, который по соответствующим функциям распределения формирует значения параметров агрегата (τ_{ijl} ; c_{ijl} ; $\{V_{rij}\}$; $\{mt_{ijl}\}$; $\{ko_{ijl}\}$) в l -ой реализации ИМ. Затем каждый $ATOP_{ij}$ определяет индивидуальные запросы на ресурсы и оборудование в виде списков запросов ($SPINRS_{ijl}$; $SPOBR_{ijl}$; $SPISP_{ijl}$). Далее происходит обращение к системе распределения ресурсов, которая выделяет требуемые ресурсы на время имитации $MTXO_{ij}$. Когда при имитации $ATOP_{ij}$ на выделенном ему оборудовании возникают опасные отказы, то интервал времени выполнения $ATOP_{ij}$ будет увеличиваться до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы на соответствующем агрегате-имитаторе оборудования. При этом проводится анализ возможных последствий случившегося опасного отказа оборудования путем розыгрыша с вероятностью P_{ar} жребия первого типа «произошла авария», который позволяет идентифицировать наличие аварии при работе агрегата на оборудовании с номером r . Если возникла сложная авария, то для ее ликвидации используется «штатная» последовательность процедур ликвидации аварий (агрегатов-имитаторов) $\{APROC_k\}$. Каждый из них обладает своим оборудованием, составом исполнителей и действует по утвержденному алгоритму ликвидации последствий аварийной ситуации. Длительность τ_{prkl} реализации $APROC_k$ также является случайной величиной и формируется по известной до начала имитации функции распределения $\Phi_{4k}(\tau_{pr})$. По окончании реализации этой последовательности агрегатов выполнение операции на отказавшем оборудовании продолжается с прерванного места, формируется признак «была авария» ($\pi_{ak} = 1$), а время выполнения операции на оборудовании увеличивается на величину, равную суммарному времени выполнения всех процедур $APROC_k$. По окончании имитации последовательности $\{APROC_k\}$ инициируется возврат на $ATOP_{ij}$, где и формируется сигнал, поступающий на r -й вход агрегата $ASOB_j$. При этом передается признак $\pi_{ak} = 1$ («была авария» на оборудовании номера k), а агрегат $ATOP_{ij}$ переходит в режим ожидания инверсного сигнала от $ASOB_j$.

Агрегаты $ASOB_i$ являются многополюсными с различным числом входов и выходов. Выходы у $ASOB_i$ могут быть одиночными и «кустовыми». Из «кустовых» выходов агрегата формируются сигналы двух типов: действительный Sg_d , разыгрываемый по вектору вероятностей $\{P_{ijkl}\}$ и $(k-1)$ фиктивных сигналов Sg_f . Выходы $ASOB_i$ нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события i и номер входа r в агрегат $ASOB_j$. Только действительные сигналы Sg_d , поступающие в режиме прямой имитации на вход $ATOP_{ij}$, инициируют его работу по изложенному алгоритму. Фиктивные сигналы Sg_f обходят алгоритм выполнения $ATOP_{ij}$. При этом у агрегатов $ASOB_j$ используется еще один тип выходных «кустовых» сигналов, называемых резервными выходами $ASOB_j$. С их помощью реализуется «технологическое резервирование» в ИМ ВПС. При появлении отказов оборудования во время выполнения $ATOP_{ij}$, которые посылают сигналы на входы $ASOB_j$, внутри сигнала устанавливается признак аварии ($\pi_{ав}$). Если $\pi_{ав} = 1$ (это означает, что $ASOB_j$ инициируется в ситуации, когда на предыдущем $ATOP_{ij}$ была авария), то в этих случаях инициируются «резервные» вы-

ходы. С этих выходов может формироваться любая комбинация сигналов Sg_d и Sg_f . Если $\pi_{ав} = 0$ на всех входах $ASOB_j$, то это означает, что аварий до активизации агрегата не было, поэтому активизируются «штатные» $АТОР_{js}$.

Если хотя бы на один из входов $ASOB_j$ приходят сигналы от $АТОР_{ij}$, во время выполнения которых была авария, то это означает активизацию резервного кустового выхода. Механизм формирования действительных сигналов у «кустовых» выходов третьего типа основан на использовании булевой матрицы $\|\gamma_{nr}\|$, которую составляет технолог-эксперт до начала имитации. Наличие единицы на пересечении n -й строки с r -м столбцом в этой матрице означает необходимость включения резервных $АТОР_{jr}$ в том случае, когда во время выполнения $АТОР_{nj}$ произошла авария ($\pi_{авн} = 1$). С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных $АТОР_{jr}$, если на входы $ASOB_j$ поступают сигналы от $АТОР_{ij}$, во время выполнения которых на оборудовании, используемом ими, происходили аварии.

Имитация функций оборудования инициируется запусками $АТОР_{ij}$, который может использовать любое число имитаторов оборудования. За каждым $АТОР_{ij}$ закрепляется два типа оборудования: индивидуального пользования с номером r , имитируемого агрегатами $АОВИ_{r}$; общего пользования, имитируемого агрегатами $АОВОР_r$. На агрегатах оборудования общего пользования $АТОР_{ij}$ использует некоторый объем общего ресурса V_{r2ij} на время его имитации. По окончании имитации занятый объем ресурса возвращается агрегату оборудования общего пользования $АОВОР_r$. Поскольку общим оборудованием могут пользоваться несколько $АТОР_{ij}$, то синхронизация их доступа реализуется следующим образом: работа оборудования общего пользования имитируется одним агрегатом $АОВОР_r$ и множеством агрегатов-имитаторов каналов общего пользования $АКАН_r$, число которых равно числу агрегатов $АТОР_{ij}$, использующих совместно ресурсы $АОВОР_r$. Агрегат $АОВОР_r$ функционирует непрерывно (последовательно переходит из состояния S_1 в состояние S_2 , а затем снова в состояние S_1) в течении l -й реализации ИМ ВПС. Длительность нахождения оборудования в этих состояниях определяется при их смене соответственно функциям распределения: k -й интервал безотказного функционирования $\tau_{бокl}$ находится по функции распределения $\Phi_{1r}(\tau_{бо})$, определяя длительность нахождения общего оборудования в состоянии S_1 ; k -й интервал восстановления работоспособности оборудования $\tau_{бокl}$ также находится по функции распределения $\Phi_{2r}(\tau_{бо})$, определяя таким образом длительность нахождения общего оборудования в состоянии S_2 . Это чередование состояний агрегата продолжается до окончания l -й реализации ИМ. Далее весь процесс имитации $АОВОР_r$ продолжается аналогичным образом, но уже в $(l+1)$ -й реализации имитационной модели.

Поскольку $АТОР_{ij}$ и $АОВОР_r$ функционируют независимо, каждый согласно своим алгоритмам, то для синхронизации совместного использования несколькими $АТОР_{ij}$ одного и того же $АОВОР_r$ (когда он находится именно в состоянии S_1) введено использование агрегата-канала $АКАН_r$, имитирующего использование общего ресурса V_{rjl} . Количество таких $АКАН_r$ определяется числом использований $АОВОР_r$ всеми агрегатами $АТОР_{ij}$.

Таким образом, с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа разветвлений каждого кустового выхода, эксперту-технологу на стадии проектирования

предоставляется возможность динамического регулирования выполнения множества $\{ATOP_{ij}\}$ в зависимости от сложившейся операционной обстановки.

Синтез динамической структуры технологического цикла на имитационной модели вероятностной производственной системы

Как видно из методики построения компонентов динамической имитационной модели, исходная вероятностная производственная система представляется в виде конечного набора взаимосвязанных математических моделей. Связь между компонентами математической модели исходной ВПС осуществляется посредством синхронизации взаимодействия агрегатов-имитаторов, входящих в состав моделей-компонентов.

На основании значений множества $\{\pi_{авij}\}$, агрегат события $ASOB_j$ осуществляет технологическое резервирование по изложенной выше методике. Кроме технологического резервирования, в ИМ ВПС предусмотрено автоматическое индивидуальное резервирование оборудования, которое включается при достижении фактической наработки оборудования его критического значения. До начала имитации эксперт-технолог устанавливает для каждого устройства порог Q_{0r} этой наработки. Фактическая наработка $Q_{\Phi r}$ накапливается на индикаторе Ind_r путем добавления к значению этого индикатора при каждом использовании устройства некоторого приращения $\Delta Q_{\Phi r}$. С интервалом Δt_{Γ} значения этих индикаторов посылаются системе принятия решений $SPRESH$ для обеспечения оперативного управления процессом имитации.

Окончательный вариант организации рациональной структуры технологического цикла, который соответствует текущему состоянию оборудования, принимается на основе анализа статистической информации, собранной в процессе функционирования имитационной модели.

Важной статистикой реализации ВСГР, лежащего в основе формализации вероятностной производственной системы, является граф критических путей (GR_KRP_h) в N реализациях h -го варианта ВПС, который получен следующим образом. Каждый элемент l -й реализации ВСГР критический путь KRP_{hl} представляет собой последовательность чередования статистик выполнения агрегатов ($ASOB_i, ATOP_{ij}, ASOB_j$). При этом статистиками выполнения $ASOB_i$ являются четверки значений $(i, t_{pil}, t_{nil}, R_{il} = 0)$, а статистиками $ATOP_{ij}$ служат тройки значений $(ij, \tau_{vijl}, c_{ijl})$. Используя исходную структуру ВСГР, эти последовательности накладываются, а в итоге формируется вероятностный граф критических путей GR_KRP_h . На выходе $ASOB_i$ подсчитывается количество запусков $ATOP_{ij}$ (v_{ij}) во всех N реализациях исходного ВСГР. Затем происходит формирование вероятностей P_{ij} запусков $ATOP_{ij}$ с выходов $ASOB_i$ графа GR_KRP_h . Таким образом, кроме четверки статистик $ASOB_i$ $(i, \bar{t}_{pi}, \bar{t}_{ni}, \bar{R}_i)$, на каждом выходе этого агрегата формируется вектор $\{P_{ks}\}$ вероятностей запусков $ATOP_{ij}$, где s – номера компонентов этого вектора вероятностей.

Другой группой статистик $\{ST_{hl}\}$ являются графики расхода ресурсов в модельном времени при l -й реализации ИМ ВСГР: ресурсов (GR_{1rl}) с номером r , материалов и комплектующих изделий (GR_{2rl}) с номером r , суммарного расхода финансовых средств (GR_{3l}). Фиксируются также временные диаграммы использования: оборудования ($DIAG_{1l}$), исполнителей ($DIAG_{2l}$), бригад исполнителей ($DIAG_{3l}$).

Таким образом, в конце l -й реализации имитационной модели ВПС множество статистик $\{ST_{hl}\}$ включает в себя следующие графики и диаграммы: $\{GR_{1rl}\}, \{GR_{2rl}\}, \{GR_{3l}\}, \{DIAG_{1l}\}, \{DIAG_{2l}\}, \{DIAG_{3l}\}$. Эти статистики запоминаются в виде файлов графиков и диаграмм в базе данных имитационной модели и, по решению эксперта-технолога, могут направляться в систему принятия решений ($SPRESH$) для выполнения анализа в цикле каждой l -й реализации имитационной модели. По завершении реализаций ИМ графики и диаграммы (в

модельном времени t_0) накладываются друг на друга системой *SPRESH* и в виде набора параметров (θ_6) передаются эксперту для выбора окончательного варианта структуры ВПС.

Обсуждение результатов

Новизна класса формализуемых систем производственных систем состоит в том, что в процессе функционирования технологического цикла может произойти изменение его структуры в результате управляющих воздействий аппаратуры управления или оператора технологического цикла вследствие сбоев или отказов функционирования задействованного оборудования. При этом предложенный подход позволяет решать следующие задачи:

- проектного моделирования надежных и безопасных производственных систем с учетом операций резервирования и ликвидации последствий сбоев и аварий оборудования;
- синтеза оптимальной структуры технологического цикла с учетом надежностных характеристик используемого оборудования на стадии проектирования;
- обеспечения динамической имитации класса производственных систем с вероятностными параметрами их функционирования на стадии проектного моделирования с использованием конечного множества математических моделей.

Все вышеперечисленное в совокупности дает возможность ускорения разработки новых проектов технологических комплексов и снижения себестоимости проектирования их оптимальной структуры при наличии элементов потенциальной опасности.

Заключение

Разработанный подход и программное обеспечение проектного моделирования производственных систем с вероятностными характеристиками позволяют: повысить надежность и безопасность производства существующих технологических систем за счет резервирования цепочек технологических операций при возникновении аварийных ситуаций; снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на производстве, на основе построения рациональной структуры технологического цикла на стадии проектирования; обеспечить резервирование потенциально опасных технологических операций при проведении пуско-наладочных работ и монтаж технологических линий, имеющих определенный срок предварительной эксплуатации.

SYNTHESIS OF DYNAMIC STRUCTURE FOR PROBABILISTIC PRODUCTIVE SYSTEMS

V.S. SMORODIN

Abstract

The new direction is offered near the unitization of methods of system researches in area of project design of the difficult systems with the probabilistic parameters of their functioning on the basis of finite set of mathematical models. As an instrument of realization offered approach a dynamic imitation design being based on development of dynamic simulation models of the probabilistic productive systems is used.

Список литературы

1. Бусленко Н.П. Лекции по теории больших систем. М., 1973.
2. Клир Дж. Системология. М., 1990.
3. Смородин В.С. // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). 2007. №1. С. 105–110.
4. Смородин В.С. // Проблемы управления и информатики. 2006. №5. С. 79–91.