

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Анотація. Запропоновано метод імітаційного моделювання складних технічних систем, представлених графовою структурою, при вирішенні багатокритеріальних задач оптимізації функціонування технологічного циклу виробництва. Наведені теоретичне обґрунтування методу дослідження і технологія його застосування на основі динамічної зміни структури імітаційної моделі у процесі її реалізації. Обґрунтовано можливість використання запропонованого підходу для оцінки нових технічних рішень при побудові оптимальної структури технологічного циклу і наявності елементів потенційної небезпеки.

Ключові слова: технологічний цикл виробництва, багатокритеріальна задача оптимізації, елементи потенційної небезпеки, побудова оптимальної структури.

Аннотация. Предложен метод имитационного моделирования сложных технических систем, представленных графовой структурой, при решении многокритериальных задач оптимизации функционирования технологического цикла производства. Приведены теоретическое обоснование метода исследования и технология его применения на основе динамического изменения структуры имитационной модели в процессе ее реализации. Обоснована возможность использования предложенного подхода для оценки новых технических решений при построении оптимальной структуры технологического цикла и наличии элементов потенциальной опасности.

Ключевые слова: технологический цикл производства, многокритериальная задача оптимизации, элементы потенциальной опасности, построение оптимальной структуры.

Abstract. Simulation modeling method of complex technical systems presented by graph structure for solving multi-objective optimization problems of functioning of production cycle is proposed. The theoretical basis of the research method and its application technology based on dynamic changes in the structure of the simulation model in the implementation process are given. The possibility of using the proposed approach for the study of new technical solutions in the construction of the optimal structure of the technology cycle and the presence of elements of the potential danger is justified.

Keywords: technology cycle of manufacturing, multi-objective optimization problem, elements of the potential danger, construction of the optimal structure.

1. Введение

Проблема моделирования сложных технических систем зачастую состоит в недостаточной результативности некоторых методов их исследования при увеличении количества учитываемых параметров [1]. В частности, это актуально для тех случаев, когда структура таких объектов изменяется в процессе функционирования, что связано с их многообразием и сложностью практических задач, возникающих при оценке уровня надежности и безопасности потенциально опасных промышленных объектов [2].

Учитывая накопленный опыт построения математических моделей из различных отраслей науки, техники, промышленности и экономики и существующую тенденцию к использованию общесистемных принципов и методов исследований, в различных областях знаний возникают определенные трудности моделирования, связанные с целым комплексом причин. К таковым относятся наличие больших объемов разнородной информации в различных областях знаний, использование различных понятийных аппаратов и профессиональная разобщенность исследователей.

Многочисленные попытки унификации системного подхода при решении конкретных задач науки и практики привели к необходимости использования динамической ими-

тации [3] для анализа функционирования сложных технических систем, представленных в качестве многопараметрических объектов конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы. При этом сохраняется возможность выделить классы сложных технических систем со специфическими свойствами, на основании которых разрабатываются методологические принципы построения имитационных моделей, характеризующиеся единой математической терминологией и доступные специалистам различных предметных областей.

В качестве инструмента для реализации предложенного подхода используются метод пошаговой реструктуризации имитационных моделей [4], динамическая имитация сложных технических систем и система оперативного контроля имитации объектов исследования, на основе которых осуществляется синтез оптимальной структуры сложной технической системы в соответствии с решаемой многокритериальной задачей оптимизации ее функционирования.

2. Реструктуризация имитационных моделей сложных систем

В основу описания математического аппарата, используемого при реструктуризации имитационных моделей сложной системы, положена возможность отказов оборудования при выполнении агрегатов-имитаторов технологических операций, что ставит эксперта-технолога перед необходимостью на стадии проектирования предусмотреть выход из состояний, возникших после аварии. На этот случай в имитационной модели (ИМ) предусматриваются «резервные» цепочки $AMTXO_{ij}$, которые активизируются только при появлении аварий [1]. Переключение на «резервную» ветвь $AMTXO_{ij}$ реализуется за счёт использования булевой матрицы коммутации $\|\gamma_{ns}\|$, формируемой экспертом-технологом до начала имитации. Строками этой матрицы (n) являются номера агрегатов $AMTXO_{ij}$ на входе агрегата-события $ASOB_j$, а столбцами (s) являются номера резервных $AMTXO_{ij}$ на выходе $ASOB_j$, которые необходимо инициировать в поставарийной ситуации. Подобное «технологическое резервирование» является динамическим регулятором поставарийной ситуации сложной технической системы (СТС).

Другим способом недопущения аварий оборудования является автоматический переход на резервные устройства, когда хотя бы для одного из устройств оборудования фактическая «наработка» превышает пороговые значения из множества $\{ind_r\}$. Элементы этого множества $\{ind_r\}$ поступают в подсистему $PS.OPEREX$, которая проверяет близость к пороговому значению наработки всех устройств оборудования. При достижении близости к пороговым значениям у нескольких устройств формируются следующие воздействия на ИМ: групповой переход на резервирование тех устройств, у которых наработка близка к критической (α_1); переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств (α_2); допускается возможность аварии в тех случаях, когда процесс производства останавливать нельзя и состояния индикаторов игнорируются (α_3); если оборудование изношено и общая профилактика будет неэффективна, принимается решение о досрочном завершении имитации n -го варианта ИМ СТС, поскольку появление аварии для данного технологического процесса недопустимо (α_4).

$PS.ANALEX$ использует статистику имитаций $\{ST_k\}$ и множество откликов модели $\{Y_{0j}\}$. Откликами Y_{0j} являются усреднённые по числу реализаций N их интегральные

значения для h -го варианта УПС: критическое время выполнения (T_{KPh}) технологического цикла производства, стоимость его реализации (C_{Oh}), интегральный расход материалов и комплектующих изделий (mt_{oh}), количество использованных ресурсов r -го номера ($v_{\Sigma rh}$), суммарная стоимость ликвидации аварий (C_{ABh}), общие потери времени на профилактику (T_{OPh}). Интегральные отклики модели составляют многомерный вектор откликов V_{OH} варианта структуры СТС, у которого все компоненты требуют минимизации, но имеют различную размерность и диапазоны изменения. Поэтому необходима нормировка компонентов этого вектора максимальными их значениями из всех вариантов организации структуры технологического цикла. Для сравнения вариантов структуры осуществляется «свёртка» этого вектора к скалярному показателю W_h способом весовых коэффициентов важности ($\sum_j \delta_j = 1; 0 \leq \delta_j \leq 1$) откликов с номером j . Вариантам организации структуры УПС соответствуют значения вектора параметров $\{X_{0jh}\}$ и постоянных параметров имитации множества $\{G_h\}$. Каждая из составляющих векторов параметров может меняться на различных уровнях. Поэтому общее количество вариантов $N_h (h = \overline{1, K_0})$ определяется стратегией изменения каждого уровня параметров. Выбор оптимальной стратегии осуществляется на основе классических методов планирования экспериментов. Эксперт с помощью воздействия θ_5 инициирует подсистему *PS.ANALEX* и последующий запуск h -го варианта ИМ УПС. Минимальное значение W_h по всему множеству вариантов с номером h и будет решением задачи построения оптимального варианта организации структуры СТС.

Важной статикой реализации имитационной модели является граф критических путей ($GRKRP_h$), который получен после наложения всех реализовавшихся критических путей. С помощью сообщений θ_4 подсистема *PS.ANALEX* выдаёт эксперту графики расхода (в модельном времени t_0) ресурсов r -го типа $Z_{1rh}(t_0)$, финансовых средств $Z_{2rh}(t_0)$, а также временные диаграммы использования оборудования и исполнителей ($DIAGR_{rh}$). Оперативная статистика реализации ИМ в виде сообщения θ_4 предоставляется эксперту-технологу для принятия решений на основе классической теории принятия решений. В результате эксперт формирует набор управляющих воздействий ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и θ_5), которые затем через подсистему принятия решений *SPRESH* обеспечивают возможность досрочной остановки l -й реализации имитационной модели, перевод всех устройств оборудования на профилактику, оперативное изменение характеристик надёжности функционирования оборудования.

3. Динамическая имитация сложных технических систем

Динамическая имитация объекта исследования осуществляется на основе построения компонентов динамической имитационной модели. При этом исходная сложная техническая система представляется конечным набором взаимосвязанных математических моделей. Связь между компонентами математической модели сложной системы осуществляется посредством синхронизации взаимодействия агрегатов-имитаторов, входящих в состав моделей-компонентов.

Для построения компонентов динамической имитационной модели СТС используется агрегатная система автоматизации моделирования, реализующая агрегатный способ

имитации сложных систем, а также способ формализации объектов исследования на основе графовых структур [5], в связи с чем используется шесть типов агрегатов-имитаторов:

$АТОР_{ij}$ – агрегат-имитатор выполнения технологической операции ($МТХО_{ij}$);

$АSOB_i$ – агрегат-имитатор свершения i -го события в процессе имитации функционирования СТС;

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

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

$АPROC_k$ – процедура-имитатор с номером k ликвидации аварийной ситуации при выполнении имитационной модели,

где каждый агрегат представляет собой реентерабельную программу из конечного множества математических моделей, составляющих математическую модель исходной сложной системы.

$АМТХО_{ij}$ представляет собой четырехполюсный агрегат, имитирующий выполнение технологической операции $МТХО_{ij}$. В режиме прямой имитации приходит сигнал от $АSOB_i$, 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 $АТОР_{ij}$ 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 $МТХО_{ij}$.

Агрегаты $АSOB_i$ являются многополюсными с различным числом входов и выходов. Выходы у $АSOB_i$ 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 $АSOB_i$ нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события i и номер входа r в агрегат $АSOB_j$. Только действительные сигналы Sg_d , поступающие в режиме прямой имитации на вход $АТОР_{ij}$, инициируют его работу по изложенному алгоритму. Фиктивные сигналы Sg_f обходят алгоритм выполнения $АТОР_{ij}$. При этом у агрегатов $АSOB_j$ используется еще один тип выходных «кустовых» сигналов, называемых резервными выходами $АSOB_j$. С их помощью реализуется «технологическое резервирование».

Если хотя бы на один из входов $АSOB_j$ 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 $АТОР_{ij}$ произошла авария ($\pi_{avn} = 1$). С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подклю-

чения резервных $АТОР_{jr}$, если на входы $АSOB_j$ 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. Для синхронизации совместного использования несколькими $АТОР_{ij}$ одного и того же $АОВОР_r$ (когда он находится именно в состоянии S_1) был введен агрегат-канал $АKAN_r$, имитирующий использование общего ресурса V_{rjl} . Количество таких $АKAN_r$ определяется числом использований $АОВОР_r$ всеми агрегатами $АТОР_{ij}$.

Таким образом, на стадии проектирования сложной системы эксперту-технологу предоставляется возможность динамического регулирования выполнения множества $\{АТОР_{ij}\}$ в зависимости от сложившейся операционной обстановки с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания количества их разветвлений.

Окончательный вариант оптимизации структуры сложной системы принимается на основе анализа статистической информации, собранной в процессе функционирования динамической имитационной модели.

4. Оперативный контроль динамической имитации

Возникновение понятия сложной системы как многопараметрического образа объекта исследования, представленного конечным множеством математических моделей, накладывает дополнительные требования на контроль имитации в процессе решения конкретных задач.

Система контроля имитации при этом должна обеспечивать возможность принятия управляющих воздействий на основе текущей операционной обстановки в процессе функционирования сложной системы. Отметим, что под управлением понимается упреждение конфликтных ситуаций в функционировании объекта исследования, которое достигается с помощью аппаратно-программного комплекса, состоящего из средств аппаратного сопряжения СТС с параллельно действующей ЭВМ.

Система оперативного контроля имитации СТС состоит из следующих компонентов: имитационной модели управляемой сложной системы; подсистемы планирования имитационных экспериментов (*PS.PLANEX*); подсистемы оперативного контроля имитации (*PS.CONTROL*); подсистемы анализа результатов (*PS.ANALIS*); подсистемы-эксперта (*PS.EXPERT*), контролирующей ход имитации и управляющей изменением параметров модели.

Функционирование компонентов системы оперативного контроля осуществляется с помощью управляющих воздействий:

- взаимодействия подсистем с «экспертом» θ_k ($k = \overline{1,5}$): чтения информации о состоянии технологического цикла $(\theta_1, \theta_2, \theta_4)$; оперативного воздействия «эксперта» (θ_3) по текущему варианту реализации структуры ВТП в имитационной модели; установки начальных значений состава ресурсов в h -м варианте организации структуры СТС (θ_5) ;
- взаимодействия подсистем с ИМ (выдача оперативной информации о ходе имитации СТС с помощью множества индикаторов состояния оборудования $\{ind_r\}$; формирование множества статистик $\{ST_{kl}\}$ и откликов $\{Y_{0jl}\}$ в l -й реализации ИМ по методу Монте-Карло);

- множества постоянных характеристик модели $\{G_h\}$ и параметров $\{X_{0jh}\}$ моделирования СТС, задаваемых для «запитки» модели при запуске на имитацию h -го варианта состава ресурсов и структуры объекта.

Основным компонентом системы является агрегатная имитационная модель, реализующая имитацию объекта исследования на основе графовой структуры и построенная с помощью системы автоматизации имитационного моделирования [1].

В процессе реализации прогона имитационной модели осуществляются следующие виды внутреннего управления динамикой имитации:

- автоматическое одиночное резервирование оборудования в тех случаях, когда наработка на отказ r -го устройства оборудования (Q_r) достигает критической величины;
- ликвидация последствий аварий при опасных отказах функционирования r -го устройства последовательностью процедур $\{PROC_k\}$;
- технологическое резервирование, означающее изменение состава и последовательности выполнения технологических операций $\{MTXO_{ij}\}$ после возникновения аварии.

Возможность возникновения аварии оборудования СТС при выполнении $AMTXO_{ij}$ требует предусмотреть выход из ситуации, возникшей после аварии, хотя она уже ликвидирована последовательностью $\{APROC_k\}$. На этот случай в ИМ предусмотрены «резервные» цепочки $AMTXO_{ij}$, которые активизируются только при появлении аварий.

Переключение на «резервную» ветвь $AMTXO_{ij}$ реализуется за счёт использования булевой матрицы коммутации $\|\gamma_{ns}\|$, формируемой экспертом-технологом до начала имитации. Строками матрицы являются номера $AMTXO_{ij}$ на входе $ASOB_i$, а столбцами являются номера резервных $AMTXO_{ij}$ на выходе $ASOB_j$, которые необходимо инициировать после аварии. Таким образом, подобное «технологическое» резервирование является динамическим регулятором поставарийной ситуации.

Ещё одним способом недопущения аварий оборудования является автоматический переход на резервное устройство, когда хотя бы для одного из устройств оборудования фактическая наработка на отказ превышает пороговые значения в ind_r . В этом случае множество $\{ind_r\}$ поступает в $PS.OPEREX$, которая проверяет близость к пороговому значению наработки всех устройств оборудования.

При достижении близости к пороговым значениям у нескольких устройств формируются следующие воздействия на ИМ: групповой переход на резервирование тех устройств, у которых наработка близка к критической (α_1); переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств (α_2); допускается возможность аварии в тех случаях, когда состояния индикаторов игнорируются (α_3); если оборудование изношено, а общая профилактика неэффективна, принимается решение о досрочном завершении имитации h -го варианта ИМ, поскольку появление аварии в данном случае недопустимо (α_4).

$PS.ANALEX$ использует статистику имитации $\{ST_k\}$ и множество откликов модели $\{Y_{0j}\}$. Откликами Y_{0j} являются усреднённые по числу реализаций их интегральные значения для h -го варианта структуры технологического цикла: критическое время выполнения технологического цикла (T_{KPh}), стоимость реализации процесса управления (C_{0h}), инте-

гральный расход материалов и комплектующих изделий (mt_{0h}), количество использований ресурсов r -го номера ($\nu_{\Sigma rh}$), суммарная стоимость ликвидации аварий ($C_{\Sigma ABh}$), общие потери на профилактику ($T_{ОППh}$).

Интегральные отклики модели составляют многомерный вектор откликов VO_h , у которого все компоненты требуют минимизации, но имеют различную размерность и свои диапазоны изменения. Поэтому необходимо нормирование компонентов этого вектора их максимальными значениями для всех возможных вариантов структуры СТС. С помощью сообщения θ_4 *PS.ANALEX* выдаёт эксперту графики расхода ресурсов r -го типа $Z_{1rh}(t_0)$, финансовых средств $Z_{2rh}(t_0)$, а также временные диаграммы использования оборудования и исполнителей ($DIAG_{rh}$).

Оперативная статистика реализации ИМ в виде сообщения θ_4 предоставляется эксперту-технологу для принятия решений на основе классической теории принятия решений. В результате эксперт формирует набор управляющих воздействий ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и θ_5), которые через подсистему принятия решений обеспечивают возможность досрочной остановки l -й реализации ИМ, перевод всех устройств оборудования на профилактику, оперативное изменение характеристик надёжности функционирования оборудования.

Для сравнения вариантов структуры СТС осуществляется «свёртка» этого вектора к скалярному показателю W_h способом весовых коэффициентов.

Вариантам организации структуры сложной системы соответствуют значения вектора $\{X_{oih}\}$ параметров СТС и постоянных параметров имитации $\{G_h\}$. Каждая из составляющих векторов параметров может изменяться на различных уровнях. Поэтому количество вариантов K_0 ($h = \overline{1, K_0}$) определяется стратегией изменения каждого уровня параметров.

Выбор оптимальной стратегии осуществляется на основе классических методов планирования экспериментов. Эксперт с помощью воздействия θ_5 инициирует *PS.ANALEX* и последующий запуск h -го варианта ИМ. Минимальное значение W_h по всему множеству вариантов с номером h_0 и будет решением задачи определения оптимального варианта организации структуры сложной системы.

5. Заключение

1. В настоящей работе предложен новый подход, основанный на методе динамической имитации, для сложных технических систем при решении многокритериальных задач оптимизации их функционирования.
2. Новизна данного подхода состоит в построении оптимизированной интегральной структуры сложной системы в рамках выбранных критериев качества функционирования, что позволяет использовать разработанные имитационные модели в качестве составных элементов систем анализа функционирования сложных технических объектов.
3. Представленный подход дает основания рассчитывать на создание необходимой базы знаний [6], позволяющей работать с техническими системами любой степени сложности, вне зависимости от ее физической сущности и рамок формализации.
4. Предложенный метод анализа позволяет выделить классы сложных систем со специфическими свойствами, что дает возможность разработки методологических принципов по-

строения математических моделей, которые характеризуются единой математической терминологией и могут быть доступны специалистам различных предметных областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смородин В.С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В.С. Смородин, И.В. Максимей. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.
2. Смородин В.С. Проектное моделирование управляемых производственных систем с резервированием схем управления / В.С. Смородин, А.В. Клименко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3 (84). – С. 150 – 156.
3. Смородин В.С. Метод динамической имитации вероятностных производственных систем / В.С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2012. – № 2. – С. 96 – 101.
4. Смородин В.С. Метод пошаговой реструктуризации имитационных моделей для исследования вероятностных технологических процессов / В.С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2008. – № 3. – С. 108 – 114.
5. Смородин В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В.С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 105 – 110.
6. Интеллектуальное имитационное моделирование динамических систем / В.С. Смородин [и др.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2011): материалы Междунар. науч.-техн. конф., (Минск, 10-12 февраля 2011 г.) / редкол.: В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 247 – 255.

Стаття надійшла до редакції 22.10.2014