

УДК 007.003; 007.008; 65.0; 681.3

## Проектное моделирование структуры управляющей системы технологическим циклом производства

В.С. СМОРОДИН, А.В. КЛИМЕНКО

Рассматривается новый способ проектирования структуры управляющей системы технологическим циклом производства для вероятностных технологических процессов, в котором временные интервалы выполнения управляющих воздействий являются случайными величинами. Для решения задач исследования управляющей системы предлагается использовать метод динамической имитации сложных технических систем, когда динамику функционирования технической системы можно описать на уровне элементов управления со сложной логикой с использованием процедур Монте-Карло.  
**Ключевые слова:** моделирование, система, метод, исследование, процесс, технологии, операции.

A new way of designing the structure of the control system of technological cycle of production for probabilistic technological processes in which time intervals of the implementation of control actions are random variables is considered. To meet the challenges of research management system it is proposed to use the method of dynamic simulation of complex technical systems, where the dynamics of the technical functioning of the system can be described on the level of control with complex logic using Monte Carlo procedures.

**Keywords:** modeling, system, method, study, process, technologies, operations.

**Введение.** Эффективным средством для обоснования решений по сложным проблемам, возникающим при анализе функционирования сложных технических систем, является системный подход к объекту исследования. К актуальным задачам в данной области можно отнести выбор стратегии реагирования на возникновение отказов функционирования оборудования при реализации систем управления технологическими процессами опасного производства, управление быстротекущими процессами в режиме реального времени, выбор оптимальной стратегии при снятии с эксплуатации объектов с техногенно опасными технологиями. При этом недостаток данных, а также отсутствие достоверной информации для анализа сложных систем и процессов, приводит к необходимости использования математических методов принятия решения в условиях неопределенности и риска. Это связано в первую очередь с уровнем сложности и организованности вероятностных технологических систем [1], а также качественными характеристиками технологических операций и степенью надежности оборудования.

Основной задачей управления технологическим циклом производства является реализация последовательности универсальных механизмов, позволяющих организовать выполнение производственного цикла эффективно и безопасно. Исследования показывают, что определение стратегии надёжной работы системы управления, работающей в условиях воздействия большого числа разнообразных факторов, влияющих как на работу самой системы, так и на реализацию технологического цикла производства, сложный и трудоемкий процесс, требующий рассмотрения множества возможных вариантов структуры управляющей системы. Для определения вариантов устойчивого безотказного функционирования системы управления, обеспечивающего генерацию и исполнение команд, которые позволяют регулировать и упреждать возникновение опасных ситуаций в ходе реализации потенциально опасных производств, успешно применяется метод динамической имитации вероятностных производственных систем [2]. Совершенствование этого метода исследования, как в области его теоретических основ, так и в области средств автоматизации предложенных подходов, несомненно, увеличивает количество инструментальных средств для решения задач проектного моделирования систем управления сложными технологическими объектами и повышает качество решения типовых задач моделирования.

Применение метода динамической имитации в большинстве случаев оправдано отсутствием альтернативных методов исследования, что объясняет его значимость и востребованность при оценке динамики функционирования потенциально опасных объектов на высоком уровне детализации и в дальнейшем может служить основой интеллектуализации анализа процесса управления подобными объектами [3].

Такой подход позволяет также учесть «человеческий фактор» в ходе реализации процедуры управления выполнением технологического цикла производства в условиях воздействия многочисленных факторов внешней среды. Ключевым элементом системного анализа в подобном случае является задача разработки подходящей динамической имитационной модели управляющей системы и выбора совокупности критериев, определяющих качественные характеристики функционирования исследуемого объекта, в качестве цели имитации. Для реально функционирующих технологических объектов, характеризующихся нарушениями выполнения технологического цикла, случайными отклонениями от графика выполнения, возникновением аварийных ситуаций, задача анализа функционирования и оптимального управления еще более усложняется, в связи с чем является актуальной разработка специальных методов их исследования и способов их применения на основе технических средств сопряжения элементов системы управления с технологическим циклом производства.

### **1. Процедура управления технологическим процессом производства на основе сопряженного аппаратно-программного комплекса.**

Устройства оборудования, реализующие средства управления вероятностным технологическим процессом производства, обладают некоторым ресурсом выполнения своих функций, который постепенно уменьшается и зависит от времени активного использования устройства. При достижении значения порогового значения времени активного использования устройства вероятность отказа резко возрастает, поэтому проектное моделирование «оптимальных» в известном смысле систем управления существенно усложняется ввиду наличия отказов оборудования, природа которых вероятностная, и вероятностного характера запросов ресурсов технологического цикла производства множеством технологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$ .

В процессе функционирования системы управления (СУ) технологическим циклом производства с использованием средств аппаратного сопряжения может выполняться ряд контрольных функций за изменением значений множества переменных управления  $\{U_s\}$ . При нормальной реализации процесса управления каждый элемент этого множества должен находиться в допустимых диапазонах изменения между минимальным ( $U_s^-$ ) и максимальным ( $U_s^+$ ) значениями  $s$ -го компонента множества переменных управления  $\{U_s\}$ .

При выполнении другой группы технологических операций значения переменных управления могут корректироваться таким образом, чтобы  $U_s$  возвращались в допустимые пределы значений ( $U_s^- \leq U_s \leq U_s^+$ ).

По способу использования управляющие переменные разделяются на следующие функциональные группы:

- индикации состояний системы управления (СУ), которые используют минимальное количество ресурсов;
- исполнительные элементы (не контролируют и не меняют компоненты  $\{U_s\}$ );
- контролирующие выход  $U_s$  за допустимые диапазоны;
- восстанавливающие значения компонентов  $U_s$  в заданных диапазонах их изменения.

В составе системы управления количество контролируемых элементов может изменяться случайным образом: выход параметров технологической операции за допустимые пределы значений осуществляется с вероятностью  $P_{\text{ВЫХ}}$  на величину  $\Delta U_s$ .

Цель управляющих воздействий состоит в том, чтобы не допустить отказов устройств, обеспечивающих процесс управления технологическим циклом производства, которые могут привести к аварии техногенного характера, за счет своевременного резервирования наиболее важных устройств оборудования и изменения структуры управляющих воздействий. Обычно это достигается упреждением моментов отказа путем своевременного переключения устройств оборудования на резервные устройства и корректировки значений компонентов управления  $\{U_j\}$ . Упреждение конфликтных ситуаций при функционировании системы управления достигается с помощью аппаратно-программного комплекса, состоящего из средств аппаратного

сопряжения технологического цикла производства с параллельно действующей на ЭВМ динамической имитационной моделью процесса управления.

На основе результатов адаптации и отладки в динамике функций реализованной имитационной модели фиксируется статистика имитации, которая используется далее для принятия управленческих решений. В результате обработки статистики в реальном режиме времени удастся своевременно переключаться на резервные устройства и минимизировать потери времени и стоимости реализации процесса управления при выходе контролируемых значений за допустимые диапазоны изменения.

В приведенной схеме управления технологическим циклом производства с помощью сопряженного аппаратно-программного комплекса за счет включения схем резервирования на этапе проектирования СУ удастся исключить потери времени и увеличение общей стоимости функционирования технологического цикла производства из-за отказов оборудования и выхода значений переменных  $U_j$  за допустимые диапазоны их изменений.

Основную сложность реализации подобного рода упреждений составляет разработка алгоритмов и отработка динамики взаимодействия построенной модели с аппаратными средствами сопряжения, фиксирующими запуск и останов задействованного оборудования реального технологического процесса.

## 2. Алгоритм динамической имитации при автоматизации проектного моделирования систем управления.

При автоматизации проектного моделирования систем управления динамическая имитация осуществляется на основе построения компонентов динамической имитационной модели. При этом исходная структура управления технологическим объектом представляется конечным набором взаимосвязанных математических моделей. Связь между компонентами математических моделей системы управления осуществляется посредством синхронизации взаимодействия агрегатов-имитаторов, входящих в состав компонентов-моделей.

Для построения компонентов динамической имитационной модели системы управления используется агрегатная система автоматизации моделирования, реализующая агрегатный способ имитации сложных систем, в связи с чем используется шесть типов агрегатов-имитаторов:

$ATOP_{ij}$  – агрегаты-имитаторы выполнения технологических операций;

$ASOB_i$  – агрегаты-имитаторы свершения  $i$ -го события в процессе имитации функционирования системы управления;

$AOBIN_r$  – агрегаты-имитаторы функционирования оборудования;

$AKAN_r$  и  $AOBOP_r$  – агрегаты-имитаторы совместного использования оборудования общего пользования с помощью выделенных каналов;

$APROC_k$  – процедуры-имитаторы с номером  $k$  ликвидации аварийной ситуации при выполнении имитационной модели.

Агрегаты-имитаторы  $AMTXO_{ij}$  представляют собой четырехполюсные агрегаты, которые имитируют выполнение технологической операции  $MTXO_{ij}$ . В режиме прямой имитации сигнал приходит от агрегата  $ASOB_i$ , который по соответствующим функциям распределения формирует значения параметров агрегата ( $\tau_{ijl}$ ;  $c_{ijl}$ ;  $\{V_{rij}\}$ ;  $\{mt_{ijl}\}$ ;  $\{ko_{ijl}\}$ ) в  $l$ -ой реализации имитационной модели системы управления. Затем каждый агрегат  $ATOP_{ij}$  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  $MTXO_{ij}$ .

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 так называемое «технологическое резервирование», что позволяет на стадии автоматизации проектирования предоставлять возможность динамического регулирования выполнения множества  $\{ATOP_{ij}\}$  в зависимости от текущей структуры системы управления с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания соответствующего количества их разветвлений.

На основе анализа статистической информации, собранной в процессе функционирования динамической имитационной модели объекта исследования, принимается окончательный вариант оптимизации структуры системы управления.

### 3. Способ формализации технологического цикла процесса производства.

Описание процесса реализации технологического цикла основано на использовании в структуре соответствующей модели агрегатов-имитаторов со стандартными элементами и сигналами, которые формируют управляющие воздействия путем их логической комбинации в зависимости от особенностей реализации вероятностного технологического процесса.

Типы элементов различаются между собой степенью сложности алгоритма их выполнения, составом используемых ресурсов и оборудования. Связь между элементами осуществляется с помощью управляющих сигналов двух типов: действительных ( $Sgd$ ), инициирующих алгоритм выполнения исполнительных элементов, и фиктивных ( $Sgf$ ), которые минуют основной алгоритм функционирования элемента без его исполнения. Сигналы также имеют сложную структуру и состоят из трёх частей: типа сигнала ( $\pi_s$ ), адресной части ( $ad$ ) и информационной части ( $in$ ). У действительного сигнала  $Sgd_{ij}$  значение  $\pi_s = 1$ , а у фиктивного сигнала  $Sgf_{ij}$  значение индикатора  $\pi_s = 0$ . В адресной части ( $ad = (i, k, l, j, r)$ , где  $i$  – номер элемента синхронизации на  $l$ -м разветвлении кустового выхода номера  $k$ ) содержится информация откуда и куда направляется сигнал. Формируется поступающий через исполнительный элемент на  $r$ -й вход  $j$ -го элемента сигнал в момент срабатывания спусковой функции  $i$ -го элемента синхронизации. Информационная часть  $Sgd_{ij}$  имеет вид:  $in = (ps, so)$ , где  $ps$  – последствие выполнения элемента,  $so$  – состояние системы управления после выполнения исполнительного элемента в момент срабатывания «спусковой» функции. Если при выполнении исполнительного элемента произошла авария оборудования, то формируется признак аварии  $ps = '1'$ , а при отсутствии аварийной обстановки этот признак равен нулю ( $ps = '0'$ ).

Каждый исполнительный элемент системы управления является двухполюсным и инициируется только действительными сигналами  $Sgd_{ij}$ . В случае прихода фиктивного сигнала  $Sgf_{ij}$  на вход исполнительного элемента, его алгоритм не выполняется, а сигнал поступает непосредственно на один из входов  $j$ -го элемента синхронизации.

В общем случае параметры выполнения алгоритма агрегатов-имитаторов ( $\tau_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $\{ko_{r8ij}\}$ ,  $\{mt_{r7ij}\}$ ,  $V''_{r4}$ ,  $V'_{r2}$ ) являются случайными величинами. Списки номеров оборудования, ресурсов, индивидуальных исполнителей и бригад исполнителей являются детерминированными характеристиками для исполнительного элемента с индексом  $ij$ . Параметры функционирования оборудования ( $\tau_{vor}$ ,  $\tau_{bor}$ ,  $\tau_{avr}$ ) также являются случайными величинами. Все перечисленные ранее случайные величины перед имитацией должны быть заданы в виде соответствующих функций распределения, которые имеют следующие целевые назначения:

- определяют расход ресурсов исполнительным элементом с индексом  $ij$

$$F_{1ij}(\tau), F_{2ij}(C), F_{3rij}(ko), F_{4rij}(mt), F_{5rij}(V') \quad (1)$$

– задают надежность характеристики устройств ВТПП номера  $r$

$$F_{7r}(\tau_{BO}), F_{8r}(\tau_{VO}), F_{9r}(\tau_{AV}), F_{10r}(\Delta C_1), F_{11r}(\Delta C_2), P_{avr}. \quad (2)$$

Таким образом, с помощью функций распределений (1) и (2) описываются вероятностные характеристики поведения соответственно исполнительных элементов при изменении технологического цикла производства. Детерминированные запросы ресурсов каждым исполнителем задаются перед имитацией с помощью множества списков

$$\{r_{1ij}\}, \{r_{2ij}\}, \{r_{3ij}\}, \{r_{4ij}\}, \{r_{5ij}\}, \{r_{6ij}\} \quad (3)$$

и определяют индивидуальность каждого исполнительного элемента системы управления.

#### 4. Синхронизация взаимодействия агрегатов-имитаторов технологических операций.

Принимая во внимание особенности взаимодействия агрегатов-имитаторов, планируется работа исполнительных элементов синхронизации во время реализации алгоритма имитации в зависимости от операционной обстановки (наличия отказов оборудования и выхода контролируемой переменной  $U_k$  за пределы допустимых диапазонов изменения её компонентов). Первый тип синхронизатора  $SLAST_i$  функционирует по алгоритму логической схемы «и». Допускается любое число входов ( $a_i$ ), которые нумеруются ( $r \leq a_i$ ). После прихода самого позднего сигнала на один из входов элемента  $SLAST_i$ : срабатывает «спусковая» функция. В этот момент одновременно формируются все сигналы на разветвлениях выходов элемента. Второй тип синхронизатора  $SFIRST_i$  функционирует по алгоритму логической схемы «или». Этот элемент также ожидает прихода сигналов на его входы, и число его входов  $r \leq b_i$ . С приходом самого раннего сигнала  $Sgd_{ij}$  на любой из входов элемента срабатывает «спусковая» функция синхронизатора  $SFIRST_i$  и формируются сигналы на выходах элемента. С этого момента остальные сигналы  $Sgd_{ij}$  на  $SFIRST_i$  игнорируются алгоритмом элемента формирования выходных сигналов. Обработка сигналов элементами  $SLAST_i$  и  $SFIRST_i$  осуществляется одинаковым образом в момент срабатывания «спусковой» функции элемента.

У элементов синхронизации  $SLAST_i$  и  $SFIRST_i$  структура выходов одинакова. В общем случае все выходы элементов синхронизации могут быть кустовыми с различным числом разветвлений  $L_k$ , где  $k$  – порядковый номер выхода ( $k \leq l_k$ ), номер разветвления  $l_k = \overline{1, L_k}$ . Если  $L_k = 1$ , то выход номера  $k$  называют одиночным. На каждом  $l_k$ -м разветвлении выхода номера  $k$  в момент срабатывания спусковой функции формируются действительные или фиктивные сигналы ( $Sgd_{ij}$  и  $Sgf_{ij}$ ) от  $i$ -го элемента синхронизации на вход исполнителя с индексом  $ij$ . Действительные сигналы  $Sgd_{ij}$  на  $l_k$ -х разветвлениях формируется только в том случае, когда истиной становится булева функция  $Z = ps \wedge \gamma_{rs}$ . Поэтому в случае поставарийной обстановки во входном сигнале в состоянии  $ps = '1'$  активизируется  $h$ -е разветвление  $k$ -го выхода третьего типа путем посылки  $Sgd_{ij}$  на элемент  $LICV_{ij}$ , ликвидирующий последствия аварии на оборудовании. Изменяя содержимое  $r$ -х строк в матрице  $\|\gamma_{rh}\|$ , регулируется либо активизация элементов  $LICV_{ih}$  для ликвидации последствий аварии на оборудовании, либо активизация  $UNIV_{ih}$  для ликвидации аварийной ситуации и корректировки значений компонентов вектора  $\{U_k\}$ . Выходы четвертого типа используются для активизации исполнительных элементов  $CORF_{ih}$ , которые корректируют значения компонентов вектора  $\{U_k\}$  при их выходе за границы допустимых диапазонов значений. Для этого используется матрица  $\|\alpha_{rh}\|$ , в которой также имеется  $r$  строк и  $h$  столбцов ( $r < h$ ).

**Заключение.** В работе рассматривается новый способ проектирования структуры управляющей системы технологическим циклом производства для вероятностных технологических процессов, в котором временные интервалы выполнения управляющих воздействий

являются случайными величинами. Для решения задач исследования управляющей системы предлагается использовать метод динамической имитации [4] сложных технических систем.

Данный метод, реализованный на основе новой версии агрегатной системы автоматизации имитационного моделирования, ориентирован на случаи, когда динамику функционирования технической системы можно описать на уровне элементов управления со сложной логикой с использованием процедур Монте-Карло. Предложенный подход позволяет рассчитывать на перспективу дальнейшего его применения при проектном моделировании структуры управляющей системы сложных технологических объектов.

### Литература

1. Максимей, И.В. Проблемы теории и практики моделирования сложных систем / И.В. Максимей, В.С. Смородин, О.М. Демиденко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 263 с.
2. Смородин, В.С. Метод динамической имитации вероятностных производственных систем / В.С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2012. – № 2. – С. 96–101.
3. Смородин, В.С. Интеллектуальный анализ систем управления потенциально опасными процессами производства / В.С. Смородин // Интеллектуальный анализ информации. ИАИ-2015 : сб. трудов международной научной конференции им. Т.А. Таран; Киев, 20–22 мая 2015 г. – С. 212–219.
4. Смородин, В.С. Реструктуризация имитационных моделей управляемых систем при автоматизации проектного моделирования / В.С. Смородин, А.В. Клименко, Е.И. Сукач, О.А. Шимчик // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 1 (26). – С. 80–84.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 25.01.2016