

УДК 007.003; 007.008; 65.0; 681.3

## Методика оценки надежности и безопасности систем управления технологическим циклом

В.С. СМОРОДИН, А.В. КЛИМЕНКО, С.П. ЖОГАЛЬ

Определяется актуальность разработки методики оценки надежности и безопасности систем управления технологическим процессом производства с учетом результатов моделирования на основе анализа надежностных характеристик функционирования оборудования для обеспечения максимальной средней производительности системы в единицу времени и снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в процессе функционирования производственных систем. Рассматриваются особенности функционального взаимодействия компонентов модели. Предложена технология оперативного управления надежностью функционирования оборудования.

**Ключевые слова:** система управления, технологический процесс моделей, имитационная модель, вероятностный сетевой график, технологические операции.

The urgency of developing a methodology for assessing the reliability and safety of production process control systems, taking into account the results of modeling, is determined on the basis of the analysis of reliability characteristics of the equipment operation in order to ensure the maximum average system capacity per unit of time and reduce the risks of emergencies during the operation of production systems. Features of functional interaction of model components are considered. The technology of operational control of equipment operation reliability is proposed.

**Keywords:** control system, technological process of models, simulation model, probabilistic network graph, technological operations.

**Введение.** На практике технологические процессы производства представляют собой множество взаимосвязанных входящих в состав технологических операций ( $TXO_{ij}$ , где  $i, j = \overline{1, N}$ ) микротехнологических операций ( $\{MTXO_{ij}\}$ , где  $i, j = \overline{1, n}$ ), характеристики выполнения и порядков следования которых являются вероятностными. Некоторые из связей между  $MTXO_{ij}$  также могут быть случайными. По этой причине в качестве аппарата описания ПС было предложено [1] использовать вероятностные сетевые графики (ВСГР) и сочетать их с имитационным моделированием с применением процедур метода Монте-Карло, заменяя ВСГР последовательностью обычных сетевых графиков ( $\{СГР_l\}$ , где  $l = \overline{1, N}$ ) с постоянными параметрами микротехнологических операций  $MTXO_{ij}$ , где  $N$  – количество реализаций ВСГР по методу Монте-Карло.

С целью повышения надежности потенциально техногенно опасных производственных систем (ПС) и обеспечения требуемого уровня безопасности производства возникла необходимость расширения области применения существующих методов управления такими системами, а также разработки новых для производственных систем с изменяющейся в процессе функционирования структурой с использованием возможностей имитации моделируемых объектов. Отсутствие эффективных средств исследования потенциально техногенно опасных технологических процессов производства в данном случае, а также средств разработки систем управления надежностью ПС, обусловили новизну предлагаемого подхода и определили актуальность выполнения данной разработки.

Целью данной работы является разработка методики управления технологическим процессом производства с учетом результатов моделирования на основе анализа надежностных характеристик функционирования оборудования для обеспечения максимальной средней производительности системы в единицу времени и снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в процессе функционирования ПС с использованием агрегатно-процессного стэнда имитации для контроля реализаций технологии опасного производства [2].

Нами предлагается методика управления работающим в режиме реального времени технологическим производственным процессом на основе системы автоматизации моделирования

агрегатного типа [3] и специализированной имитационной модели, построенной с учетом особенностей применения имитации при моделировании технологии управления процессом производства [4], состоящей из следующих асинхронно работающих компонентов:

- человека-эксперта (*EXPERT*) с низкой скоростью реакции на события, происходящие в ПС в процессе его функционирования;
- относительно медленно (по сравнению со скоростью человеческой реакции) функционирующей в режиме реального времени производственной системы;
- программной системы (*SPRESH*) управления, контроля функционирования оборудования и принятия решений, которая должна упреждать возможные «нештатные» ситуации на основе реализованных алгоритмов, указаний эксперта, результатов предыдущей имитации и анализа операционной обстановки в ПС;
- имитационной модели ВСГР, которая позволяет прогнозировать возможное развитие технологического процесса при реализации ПС.

При решении задачи повышения надежности функционирования оборудования потенциально техногенно опасных производственных систем для обеспечения требуемого уровня безопасности производства, в данной работе положено сочетание идей метода имитационного моделирования, методики сетевого планирования и процедур метода Монте-Карло на базе создания специализированной имитационной модели для управления надежностью функционирования оборудования [1].

**Особенности функционального взаимодействия компонентов модели.** При взаимодействии компонентов имитационной модели (ИМ) и работающего в режиме реального времени замкнутого цикла технологического процесса осуществляется непрерывный мониторинг оборудования и параметров его состояния с помощью регистров-индикаторов и технических средств сопряжения. Имитационная модель, осуществляющая оперативное управление технологическим процессом производства, состоит из следующих компонентов:

- имитационной модели технологического процесса производства, структура которого определяется с помощью вероятностного сетевого графика;
- системы принятия решений *SPRESH*, осуществляющей контроль планового или «нештатного» развития операционной обстановки в имитационной модели ВСГР;
- блока управления *EXPERT*, выполняющего функции посредника между системой принятия решений и группой экспертов-специалистов высокой квалификации.

Оперативное управление основными компонентами модели реализуется с помощью следующих глобальных переменных:

- надежностных характеристик  $G_{rh}^*$  функционирования оборудования;
- индикаторов  $ind_{rh}^*$  текущего состояния оборудования, в которых накапливается суммарное время наработки на отказ соответствующих устройств ПС;
- указателей  $\pi_{abr}^*$  появления аварий, влияющих на конфигурацию соответствующего варианта моделируемого технологического процесса производства;
- текущих значений  $U_{fh}^*$  переменных управления технологическим процессом;
- значений корректирующих воздействий  $\Delta U_{fh}^*$  на переменные управления;
- параметров функционального состояния  $Z_{fh}^*$  технологического процесса;
- значений статистик  $ST_{kh}^*$ ,  $k = \overline{1, N}$ , характеризующих динамику развития текущего варианта контролируемого технологического процесса производства;
- значений откликов  $Y_{mh}^*$  управляемого технологического процесса.

Система принятия решений *SPRESH* взаимодействует с оборудованием и регистрами управления технологическим процессом, используя три типа воздействий:

- корректирующие воздействия  $\Delta U_{fh}^*$  на переменные управления технологическим процессом производства;

– сигналы  $\alpha_{rh}^*$  переключения устройства оборудования на резервное или перевода соответствующих устройств на профилактику.

С имитационной моделью вероятностного сетевого графика, который является аналогом реального технологического процесса производства, система принятия решений *SPRESH* связана аналогичным набором переменных, параметров управления и индикаторов. На входы и выходы системы *SPRESH* через соответствующие средства сопряжения от имитационной модели поступают множества индикаторов, глобальных переменных и параметров моделирования  $\{G_{rh}\}$ ,  $\{ind_{rh}\}$ ,  $\{\pi_{abrh}\}$ ,  $\{Z_{fh}\}$ ,  $\{U_{fh}\}$ ,  $\{ST_{kh}\}$ ,  $\{Y_{mh}\}$ , которые имеют тот же смысл, что и рассмотренные выше.

От системы *SPRESH* на имитационную модель вероятностного сетевого графика поступают корректирующие воздействия  $\Delta U_{fh}$  на переменные управления технологическим процессом, сигналы  $\alpha_{rh}$  переключения оборудования на резервное или перевода соответствующих устройств на общую профилактику, а также значения  $X_{nh}$ , где  $n = \overline{1, N_h}$ ,  $n$ -го параметра описания процесса в  $h$ -м варианте его реализации.

Для связи системы *SPRESH* с блоком управления *EXPERT* используется множество воздействий  $\{\theta_{q_i}\}$ , где  $q_i = \overline{1, l}$ , с одной стороны понятных эксперту, а с другой стороны преобразующихся системой *SPRESH* во внутреннее представление для использования в имитационной модели вероятностного сетевого графика. Для обеспечения этой функции в составе *SPRESH* имеется системный модуль связи с блоком управления *EXPERT*, который является переводчиком информации между системой *SPRESH*, блоком управления *EXPERT*, имитационной моделью ВСГР и реальным технологическим процессом производства.

Перечисленные выше глобальные переменные комплекса имитации, управляющие воздействия и индикаторы формируются специальными схемами контроля за функционированием оборудования и запоминаются в информационной базе данных имитационной модели (ИБД).

**Организация оперативного управления надежностью функционирования оборудования.** Особенностью использования ИМ ВСГР является наличие блока управления *EXPERT*, который осуществляет непосредственное взаимодействие с системой принятия решений *SPRESH*. При этом учитывается, что скорость реакции человека значительно ниже скорости обработки управляющей информации системой *SPRESH*. Поэтому в качестве буфера обмена между ними используется информационная база данных модели, а информация о состояниях технологического процесса передается в блок управления *EXPERT* в виде, удобном для ее восприятия специалиста-эксперта.

В качестве входной информации через блок управления эксперт получает отображение индикаторов состояния оборудования ( $\theta_1$ ), график использования ресурсов и диаграммы работы оборудования ( $\theta_2$ ), а также таблицы интегральных откликов и статистик моделирования ( $\theta_3$ ). Отметим, что на динамику имитации ВСГР влияют следующие управляющие воздействия эксперта: немедленная остановка имитации ( $\theta_4$ ), переход на профилактику или групповое резервирование оборудования ( $\theta_5$ ), установка новых начальных значений ( $\theta_6$ ) компонентов вектора параметров  $\{X_{nh}\}$  или модификация диапазонов изменения индикаторов состояния ПС  $TGZ = (Z_{fh}^-, Z_{fh}^+)$ , а также модификация содержимого таблицы корректировки вектора  $U_{fh}$  переменных управления технологическим процессом.

Перед каждой реализацией ВСГР эксперт может изменять значения множества  $\{X_{hs}\}$  и характеристики  $G_{rh}$  надежности устройств  $MTXO_{ij}$ . Такой подход к заданию исходных данных превращает специализированную модель в инструмент управления динамикой реализации тех-

нологических процессов производства. Это тем более важно, когда имитация на модели происходит с упреждением  $\tau_{upr}$  функционирования реального технологического процесса, и результаты имитационного моделирования можно учесть при модификации переменных управления технологическим процессом производства для контроля за состоянием оборудования.

Особенно эффективно использование специализированной модели в тех случаях, когда интервалы времени  $\tau_{SOB_j}$  между чрезвычайными событиями в медленно развивающемся технологическом процессе достаточны для оперативного управления ( $\tau_{SOB_j} > T_{крh}$ , где  $T_{крh}$  – критическое время реализации процесса, ранее полученное на имитационной модели).

Кроме того, важной задачей использования имитационной модели ВСГР является постановка серий имитационных экспериментов по методике Монте-Карло с помощью модели для нахождения графиков изменения в модельном времени значений глобальных переменных  $Z_{fh}(t_0)$  и  $U_{fh}(t_0)$ . В дальнейшем эти зависимости используются для сравнения полученных модельных значений с реальными значениями этих характеристик:  $Z_{fh}(t_0)$  с  $Z_{fh}^*(t)$  и  $U_{fh}(t_0)$  с  $U_{fh}^*(t)$ , где  $t_0$  и  $t$  – соответственно моменты времени в имитационной модели ВСГР и реальном ПС. Если для всех компонентов этих векторов абсолютное значение разности соответствующих координат находится в пределах ошибки имитации ( $|Z_{fh}(t_0) - Z_{fh}^*(t)| < \delta$ ;  $|U_{fh}(t_0) - U_{fh}^*(t)| < \delta$ ), то это означает, что достигнута адекватность имитационной модели в динамике реализации управления технологическим процессом производства с помощью специализированной имитационной модели.

Для обеспечения выполнения ремонтно-профилактических работ используются возможности технологического резервирования оборудования производственной системы. При этом требуется обеспечить максимально возможную производительность  $\Psi(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  производственной системы в единицу времени:

$$\Psi(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \delta_i \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\tau_i} \int_0^{\tau_i - t_{ni}} \rho_i(t) dt \right] \rightarrow \max, \quad (1)$$

на основании измерений показаний монитора надежностных характеристик функционирования оборудования и регрессионного анализа полученных данных, где  $\rho_i(t)$  – соответствующие уравнения линейной регрессии (функции падения производительности устройства  $i$ -го типа с течением времени его использования);  $0 \leq \delta_i \leq 1$  – коэффициенты удельного веса оборудования  $i$ -го типа в целевой функции производительности системы;  $t_{ni}$  – время, необходимое по регламенту для проведения ремонтно-профилактических работ на оборудовании  $i$ -го типа;  $\tau_i$  – оптимальное в смысле критерия (1) время между двумя последовательными операциями восстановления работоспособности на  $i$ -м оборудовании.

Таким образом, используя соответствующие вычисления, находятся оптимальные в смысле критерия (1) интервалы времени восстановлений работоспособности  $i$ -го типа оборудования производственной системы ( $i = \overline{1, n}$ ) между двумя последовательными операциями его восстановления, доставляющих максимум целевой функции  $\Psi(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  производительности системы, что обеспечивает решение поставленной задачи.

**Заключение.** Приведенные в данной статье результаты относятся к вопросам, связанным с разработкой систем управления надежностью функционирования технологических процессов производства, включающих в свой состав системы управления надежностью функционирования оборудования и системы управления надежностью реализации технологических операций.

Необходимо иметь в виду, что, на современном этапе развития технологических процессов, производственные системы характеризуются широким внедрением и использованием

сложных технических комплексов, которые базируются на средствах вычислительной техники, включают в свой состав измерительные и управляющие устройства, технологическое оборудование и обслуживающий персонал.

Исследование таких систем традиционными математическими методами стало невозможным, поскольку их поведение описывается настолько большим количеством математических соотношений, что найти решения возникающих задач практически невозможно в приемлемое время даже с помощью мощных вычислительных машин.

Кроме того, аналитические соотношения, описывающие законы функционирования подобных систем, не всегда известны и имеют вероятностную природу. Их поведение зачастую определяется человеческим фактором, создающим дополнительную неопределенность при попытке его учета, а качество работы оценивается по многим составляющим.

Данная работа представляет собой реализацию универсальной методики управления вероятностным технологическим процессом производства и описание средств управления функционированием оборудования.

Практическая значимость полученных результатов состоит в обеспечении возможности непрерывного контроля за ходом развития ПС, своевременном переключении оборудования на резервное, переводе оборудования на профилактику с остановкой производства в целях предупреждения отказов и недопущения аварии в процессе реализации замкнутого технологического цикла, а также возможности внедрения данной методики и соответствующего программного обеспечения в учебный процесс для подготовки специалистов, работающих в области прикладной математики и системе министерства по чрезвычайным ситуациям.

### 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. Имитационное моделирование и средства оптимизации сложных технических систем / В.С. Смородин, А.В. Клименко // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2014. – № 4. – С. 171–178.
4. Смородин, В.С. Реструктуризация имитационных моделей управляемых систем при автоматизации проектного моделирования / В.С. Смородин, А.В. Клименко, Е.И. Сукач // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 1 (26). – С. 80–84.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 25.01.2016