

УДК 007.003; 007.008; 65.0; 681.3

## Контроль имитации управляемых технологических процессов с вероятностными характеристиками функционирования

В. С. СМОРОДИН, А. В. КЛИМЕНКО, В. А. КОРОТКЕВИЧ, Л. И. КОРОТКЕВИЧ

### Введение

Существующие подходы к моделированию технологических процессов с вероятностными характеристиками их функционирования базируются, как правило, на статических математических моделях. Однако наличие ненадежного оборудования и возникающие в процессе функционирования технологического цикла сбои и отказы оборудования могут привести к изменению структуры исходной математической модели объекта исследования. Поэтому использование такого подхода может приводить к значительным погрешностям при решении типовых задач анализа функционирования подобных объектов на стадии их проектирования, а также при анализе функционирования реально существующих технологических систем.

Решение данной задачи может иметь большое значение для совершенствования системы управления технологическими процессами в целом и улучшения качества управления производственно-технологическими комплексами при наличии потенциальной техногенной опасности, что обеспечивает повышение уровня надежности технологических объектов и безопасности их функционирования.

Таким образом, разработка метода построения математических моделей производственных систем в условиях потенциальной опасности с учетом параметров надежности задействованного оборудования, а также метода реструктуризации математической модели объекта исследования, в совокупности с методом их компьютерной реализации позволит повысить качество проектирования надежных и безопасных технологических систем.

### 1 Использование аппарата вероятностных сетевых графиков для имитации управляемых технологических процессов

В основу формализации управляемого технологического процесса положено использование аппарата их описания с помощью вероятностных сетевых графиков (ВСГР). Сочетание процедуры Монте-Карло и агрегатной системы моделирования [2] с аппаратом описания технологического процесса с вероятностными характеристиками посредством ВСГР дает возможность  $l$ -ю реализацию имитационной модели (ИМ) технологического процесса с вероятностными характеристиками представить в виде детерминированного сетевого графика ( $СГР_l$ ). Каждый  $СГР_l$  представляется состоящим из множества микротехнологических операций, имитируемых соответствующими агрегатами-имитаторами работы  $\{AMTXO_{ij}\}$ , которые соединяются друг с другом с помощью агрегатов-имитаторов событий ( $ASOB_i$  и  $ASOB_j$ ).

Каждый из этих агрегатов представляет собой реентерабельную программу подмодели агрегата, которая в базе данных имитационной модели технологического процесса с вероятностными характеристиками для каждого компонента ВСГР имеет свой набор переменных моделирования и статистик имитации, соответствующий номеру этого компонента.

Агрегат  $AMTXO_{ij}$  представляет собой четырехполюсник, имитирующий выполнение  $MTXO_{ij}$  в ВСГР и имеет два типа входов и выходов. Первый тип входов и выходов  $AMTXO_{ij}$

используется в режиме прямой имитации  $СГР_l$ , а второй тип используется в режиме инверсной имитации. При имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  в режиме прямой имитации агрегат  $AMTXO_{ij}$  в каждой  $l$ -ой реализации ВСГР по соответствующим функциям распределения формирует фактические значения параметров  $\tau_{ijl}$ ,  $c_{ijl}$ ,  $V_{rijl}$ ,  $mt_{ijl}$ , а по спискам запросов определяет индивидуальные запросы  $MTXO_{ij}$  на ресурсы и оборудование в виде индивидуальных списков:  $SPINRS_{ijl}$ ,  $SPOBR_{ijl}$ ,  $SPISP_{ijl}$ ,  $SPKOM_{ijl}$ . Эти ресурсы предприятия выделяются  $AMTXO_{ij}$  на время имитации выполнения  $MTXO_{ij}$ . Если при выполнении  $AMTXO_{ij}$  на агрегатах оборудования возникают опасные отказы, то время выполнения операции на оборудовании увеличивается на величину  $\tau_{6ock}$ . При этом проводится анализ последствий этого опасного отказа оборудования путем розыгрыша жребия «Произошла авария», который с вероятностью  $P_{ав}$  позволяет идентифицировать наличие аварии при выполнении агрегата  $AOBIN_r$ . При «простой» аварии (не требующей изменения технологического цикла производства) время выполнения операции на оборудовании увеличивается на величину  $\tau_{аврl}$ , разыгрываемую по функции распределения  $\Phi_3(\tau_{ав})$ . Если возникшая авария не «простая», то для ее ликвидации требуется «штатная» последовательность процедур ликвидации, имитируемых агрегатами  $\{APROC_k\}$ . Каждый из этих агрегатов обладает своим оборудованием, составом исполнителей, действует по утвержденному алгоритму ликвидации последствий аварийной ситуации, длительность реализации которого  $\tau_{пракl}$  также может быть случайной величиной и поэтому формируется по известной до имитации функции распределения  $\Phi_4(\tau_{pr})$ . В этой последовательности процедур порядок их следования фиксированный, поэтому при имитации ликвидации аварии каждая  $k$ -я процедура знает номер  $(k+1)$ -й процедуры  $PROC_{k+1}$ . Исходя из этого, процесс ликвидации аварии реализуется последовательностью агрегатов  $\{APROC_k\}$ , выполнение которых имеет различную длительность  $\{\tau_{nrkl}\}$ .

По окончании этой последовательности выполнение операции на отказавшем оборудовании продолжается с прерванного места. При этом формируется признак ( $\pi_{ак} = 1$ ) «была авария», а время выполнения операции на оборудовании увеличивается на величину, равную сумме времен выполнения каждой процедуры  $PROC_k$  ( $\sum \tau_{prkl}$ ). По завершении имитации  $AMTXO_{ij}$  формирует сигнал, поступающий на  $r$ -й вход агрегата  $ASOB_j$ . При этом передается признак  $\pi_{ак} = 1$  «была авария» на оборудовании  $r$  при выполнении  $MTXO_{ij}$ . Сам же агрегат  $AMTXO_{ij}$  переходит в режим ожидания инверсного сигнала от  $ASOB_j$ , с приходом которого  $AMTXO_{ij}$  в инверсном режиме имитирует выполнение  $MTXO_{ij}$  длительностью  $\tau_{вынijl}$ , хранимой в базе данных имитационной модели технологического процесса с вероятностными характеристиками до прихода инверсного сигнала. По окончании инверсной имитации на выходе  $AMTXO_{ij}$  появляется сигнал, который поступает на выход  $ASOB_i$ . Далее агрегат  $AMTXO_{ij}$  ожидает прихода сигнала в режиме прямой имитации, но уже в следующей  $(l+1)$ -й реализации ВСГР.

Агрегаты  $ASOB_i$  являются многополюсниками с различным числом входов и выходов. Выходы у  $ASOB_i$  бывают одиночными и «кустовыми». Из «кустовых» выходов агрегата формируются сигналы двух типов: один действительный  $Sgd$ , разыгрываемый по вектору вероятностей  $\{P_{ijkl}\}$  и  $(k-1)$  фиктивных сигналов  $Sgf$ . Выходы  $ASOB_i$  нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события  $j$  и номер входа  $r$  в  $ASOB_j$ . Только действительные сигналы  $Sgd$ , поступающие в режиме прямой имитации на вход  $AMTXO_{ij}$  ини-

цируют его работу по вышеизложенному алгоритму. Фиктивные сигналы  $Sgf$  обходят алгоритм выполнения  $AMTXO_{ij}$  и поступают на вход  $ASOB_j$ , минуя  $AMTXO_{ij}$ .

В имитационной модели управляемого технологического процесса с вероятностными характеристиками используется еще один тип выходных сигналов у  $ASOB_j$ , называемыми «резервными» выходами. «Резервные» выходы у  $ASOB_j$  также являются кустовыми. С их помощью в имитационной модели технологического процесса с вероятностными характеристиками реализуется так называемое «технологическое резервирование». Наличие в технологическом процессе отказов оборудования при выполнении  $AMTXO_{ij}$  ставит исследователя перед необходимостью использования на выходах  $ASOB_j$  нескольких «резервных»  $AMTXO_{ij}$ , которые активизируются только при появлении аварий во время имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  на агрегате  $AOBIN_r$  для обеспечения надежности функционирования производственной системы. Если аварии не происходит, то активизируются «штатные»  $AMTXO_{ij}$ . При этом переключение ветвей  $AMTXO_{ij}$  должно быть оперативным и зависеть от наличия отказов оборудования, используемого в  $AMTXO_{ij}$ , являющихся входными для  $ASOB_j$ . Эту роль играют агрегаты  $ASOB_j$  с помощью формирования комбинации фиктивных и действительных сигналов на «кустовых» выходах третьего типа. Механизм формирования действительных сигналов у «кустовых» выходов третьего типа основан на использовании булевой матрицы  $\|\gamma_{nr}\|$ . Наличие единицы на пересечении  $n$ -й строки с  $r$ -м столбцом в этой матрице означает необходимость включения резервных  $AMTXO_{ij}$  с признаком  $\pi_{ak}=1$ , свидетельствующим о ранее произошедшей аварии. Это означает, что на  $n$ -м разветвлении  $k$ -го кустового выхода третьего типа формируется  $Sgd$  только в том случае, если станет истинной булева функция  $z=(\gamma_{rh} \wedge \pi_{ar})$ , где  $r$ -номера входов  $ASOB_j$ . С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных  $AMTXO_{jh}$ , если на входы  $ASOB_j$  поступают сигналы с  $AMTXO_{ij}$ , во время выполнения которых на оборудовании, находящимся в их распоряжении, происходили аварии. Подобным образом с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа их разветвлений каждого кустового выхода эксперту предоставляется возможность динамического регулирования выполнением множества  $\{AMTXO_{ij}\}$  в зависимости от операционной обстановки внутри управляемого технологического процесса.

Таким образом, многополюсник  $ASOB_j$  в режиме прямой имитации ожидает прихода на его входы последнего сигнала с  $AMTXO_{ij}$ . В этой ситуации срабатывает «спусковая функция» агрегата, фиксируется ранний срок свершения события  $t_{pjl}$  и формируется серия выходных сигналов со всех трех типов выходов. Эти сигналы выходов  $ASOB_j$  поступают на входы  $AMTXO_{jh}$  согласно таблице коммутаций агрегатов, которая задается экспертом до начала имитации ВСГР. После рассылки всех действительных и фиктивных выходных сигналов агрегат ожидает прихода сигналов от  $AMTXO_{jh}$  в режиме инверсной имитации ВСГР. С приходом самого первого сигнала в режиме инверсной имитации на выход  $ASOB_j$  формируется поздний срок свершения события  $t_{njl}$  и определяется резерв свершения события ( $R_{jl} = t_{njl} - t_{pjl}$ ). Далее агрегат  $ASOB_j$  ожидает появления сигнала на его входах в режиме прямой имитации, но уже при следующей  $(l+1)$ -й реализации ВСГР согласно процедуре Монте-Карло.

Имитация функций оборудования, на котором реализуются все  $MTXO_{ij}$ , осуществляется тремя типами имитаторов оборудования. Каждой  $MTXO_{ij}$  доступны к использованию два типа оборудования: индивидуальное использование  $r_l$  номера, имитируемое агрегатами

$AOBIN_{r_1}$ , и оборудование общего пользования номера  $r_2$ , на котором  $MTXO_{ij}$  использует некоторый объем ресурса  $V_{rij}$  только на время выполнения  $MTXO_{ij}$ . После выполнения  $MTXO_{ij}$  этот объем возвращается агрегату общего пользования  $AOBOP_{r_2}$ . Поскольку общим оборудованием могут пользоваться несколько  $AMTXO_{ij}$ , то синхронизация их доступа реализуется следующим образом: оборудование общего пользования имитируется одним агрегатом  $AOBOP_{r_2}$  и множеством агрегатов имитаторов каналов общего пользования  $AKAN_{r_3}$ . Агрегат  $AOBOP_{r_2}$  функционирует непрерывно (последовательно переходит с самого начала и до окончания  $l$ -й реализации ВСГР из состояния  $S_{0r_2}$  в состояние  $S_{1r_2}$  и затем снова из  $S_{1r_2}$  в  $S_{0r_2}$ ) в течение реализаций имитационной модели технологического процесса с вероятностными характеристиками. Длительности нахождения оборудования в этих состояниях определяются при их смене по соответствующим функциям распределения:  $k$ -й интервал безотказного функционирования  $\tau_{BOKl}$  находится по функции распределения  $\Phi_{1r_2}(\tau_{BO})$  и определяет длительность нахождения в состоянии  $S_{0r_2}$ ;  $k$ -й интервал восстановления работоспособности оборудования  $\tau_{BOKl}$ , который также находится по функции распределения  $\Phi_{2r_2}(\tau_{BO})$ , соответствует нахождению устройства в состоянии  $S_{1r_2}$ . Таким образом,  $AOBOP_{r_2}$  непрерывно из состояния  $S_{0r_2}$  через интервал времени  $\tau_{BOKl}$  переходит в состояние  $S_{0r_1}$ , в котором находится длительностью  $\tau_{BOKl}$ . Это чередование состояний агрегата продолжается до окончания  $l$ -й реализации имитационной модели технологического процесса с вероятностными характеристиками, и далее весь процесс имитации  $AOBOP_{r_2}$  продолжается аналогичным образом, но уже в  $(l+1)$ -й реализации ВСГР. Поскольку  $AMTXO_{ij}$  и  $AOBOP_{r_2}$  функционируют независимо, каждый согласно своим алгоритмам, то для избежания такой ситуации, когда использование агрегатом  $AMTXO_{ij}$  агрегата  $AOBOP_{r_2}$  приходится на состояние  $S_{1r_2}$ , введено использование агрегата  $AKAN_{r_3}$ , имитирующего собственно использование общего ресурса объема  $V_{rijl}$  устройством общего пользования  $r_2$ . Количество таких  $AKAN_{r_3}$  будет определяться числом использований  $AOBOP_{r_2}$  агрегатами  $AMTXO_{ij}$ .

Агрегат  $AOBIN_{r_1}$  функционирует в старт-стопном режиме согласно следующему алгоритму. В момент запуска агрегата на выполнения длительностью  $\tau_{ВЫПР1kl}$  по функции распределения  $\Phi_{3r_1}(\tau_{BO})$  определяется длительность  $\tau_{BOR1kl}$  нахождения агрегата в состоянии  $S_{1r_2}$ . Случай, когда  $\tau_{BOR1kl} \geq \tau_{ВЫПР1kl}$  означает, что во время имитации  $AOBIN_{r_1}$  не будет отказа функционирования оборудования. Если же данное неравенство не выполняется, то это означает возникновение отказа оборудования. При этом определяются последствия отказа: простой отказ (состояние  $S_{1r_1}$ ), возникновение простой аварии (состояние  $S_{2r_1}$ ) или появление сложной аварии (состояние  $S_{3r_1}$ ). Длительность нахождения агрегата в состоянии  $S_{1r_1}$  по функции распределения  $\Phi_{4r_1}(\tau_{BO})$  определяется равной  $\tau_{BOR1kl}$ . Время выполнения  $AMTXO_{ij}$  на  $AOBIN_{r_1}$  равно сумме интервалов восстановления и двойному интервалу использования  $AOBIN_{r_1}$ . В состоянии  $S_{2r_1}$  по функции  $\Phi_{5r_1}(\tau_{AB})$  определяется интервал ликвидации простой аварии равным  $\tau_{ABr1kl}$ . В этом случае определяется время выполнения  $MTXO_{ij}$  на  $AOBIN_{r_1}$  равное сумме интервалов ликвидации аварии и двойного интервала использования  $AOBIN_{r_1}$ .

В состоянии  $S_{3r_1}$  для ликвидации сложной аварии  $AOBIN_{r_1}$  инициирует выполнение первого агрегата ликвидации аварии из последовательности  $\{APROC_k\}$ , которые реализуются на временном интервале длительностью  $\sum_k \tau_{APRk}$ . В этом случае общее время выполнения  $MTXO_{ij}$  на  $AOBIN_{r_1}$  равно суммарному времени выполнения последовательности  $\{APROC_k\}$  и двойного интервала использования  $AOBIN_{r_1}$ .

Во время выполнения  $MTXO_{ij}$  на  $AOBIN_{r1}$  при наличии состояний  $S_{2r1}$  и  $S_{3r1}$  в момент окончания выполнения операции на оборудовании и возврата на  $AMTXO_{ij}$  формируется признак  $\pi_{ar1} = 1$ , означающий факт аварии на  $AOBIN_{r1}$  при выполнении  $MTXO_{ij}$ . По множеству  $\{\pi_{ar1}\}$  этих признаков  $ASOB_j$  организует технологическое резервирование по изложенной выше методике. Кроме технологического резервирования в имитационной модели предусмотрено автоматическое индивидуальное резервирование оборудования индивидуального и общего пользования. В основе этого перехода лежит оценка близости фактической наработки оборудования  $r$ -го устройства критическому значению. Предусматривается для каждого устройства  $r$  порог  $Q_{01r}$  этой наработки. Фактическое значение наработки  $r$ -го устройства  $Q_{\phi r}$  накапливается в индикаторе наработки оборудования ( $ind_r = Q_{\phi r}$ ). Множество этих индикаторов доступно для чтения системой  $SPRESH$  для обеспечения оперативного контроля управления процессом имитации технологического процесса с вероятностными характеристиками функционирования. До порога наработки  $Q_{\phi r} < Q_{01r}$  устройство оборудования функционирует в обычном режиме. Фактическая наработка непрерывно увеличивается на постоянную величину при каждом использовании  $r$ -го устройства.

Отметим, что значения порогов наработки ( $Q_{01r}$ ) и приращения наработки ( $\Delta Q_r$ ) задаются до начала имитационного эксперимента в качестве начальных значений при  $l$ -й реализации ВСГР. Как только выполняется неравенство  $Q_{\phi r} \geq Q_{01r}$ , срабатывает переход  $r$ -го устройства на «индивидуальный резерв». Этот переход является инициатором двух действий имитационной модели: отправки множества  $\{ind_r\}$  системе  $SPRESH$ , которая служит сигналом анализа операционной обстановки в имитационной модели, и обнуления индикатора  $Q_{\phi r}$  фактической наработки на сбой устройства номера  $r$ , означающей факт автоматического резервирования устройства. Информация об этом передается от  $AOBIN_{r1}$  непосредственно в системе  $SPRESH$ .

В ходе имитации технологического процесса с вероятностными характеристиками с постоянным шагом  $\Delta T_n$  фиксируются состояния ресурсов технологического процесса в базе данных модели (БДМ), которые затем в виде графиков и временных диаграмм ( $ST_k$ ) выдаются подсистеме PS.ANALEX. По этой информации формируется необходимая графическая информация  $\{\theta_4\}$  для эксперта при формировании управляющих воздействий  $\theta_3$  и  $\theta_5$  на имитационную модель технологического процесса с вероятностными характеристиками функционирования.

## 2 Контроль имитации управляемых технологических процессов

Возможность отказов оборудования технологического процесса с вероятностными характеристиками при выполнении  $AMTXO_{ij}$  заставляет эксперта-технолога предусмотреть выход из ситуации в технологическом процессе, возникшей после аварии, хотя она уже ликвидирована последовательностью  $\{APROC_k\}$ . На этот случай в имитационной модели 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 имитации технологического процесса с вероятностными характеристиками. Строками  $n$  являются номера  $AMTXO_{ij}$  на входе  $ASOB_i$ , а столбцами  $s$  являются номера резервных  $AMTXO_{ij}$  на выходе  $ASOB_j$ , которые необходимо инициировать в поставарийной ситуации технологического процесса. В результате подобное «технологическое резервирование» является динамическим регулятором поставарийной ситуации в технологическом процессе с вероятностными характеристиками функционирования.

Ещё одним способом недопущения аварий оборудования технологическом процессе является автоматический переход на резервное устройство, когда хотя бы для одного из устройств оборудования фактическая «наработка» превышает пороговые значения в  $ind_r$ . В этом случае все множество  $\{ind_r\}$  поступает в PS.OPEREX, которая проверяет близость к пороговому значению всех устройств оборудования. При достижении близости к пороговым значениям у нескольких устройств формируются следующие воздействия на имитационную модель технологического процесса: групповой переход на резервирование тех устройств, у которых «наработка» близка к критической ( $\alpha_1$ ); переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств ( $\alpha_2$ ); допускается возможность аварии в тех случаях, когда останавливать технологический процесс нельзя, и состояния индикаторов игнорируются ( $\alpha_3$ ); если оборудование изношено, и общая профилактика будет неэффективна, принимается решение о досрочном завершении имитации  $h$ -го варианта имитационная модель, поскольку появление аварии для данного технологического процесса недопустимо ( $\alpha_4$ ).

Важной статикой реализации имитационной модели является граф критических путей ( $GRKRP_k$ ), который получен после наложения друг на друга критических путей. С помощью сообщений  $\theta_4$  PS.ANALEX выдаёт эксперту графики расхода в  $t_0$  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 технологического процесса в виде сообщения  $\theta_4$  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  $\theta_5$ ), которые затем через подсистему SPRESH обеспечивают возможность досрочной остановки  $l$ -й реализации ВСГР на имитационную модель, перевод всех устройств оборудования на профилактику, оперативное изменение характеристик надёжности функционирования оборудования.

### Заключение

В работе рассматривается новый подход использования аппарата вероятностных сетевых графиков для имитации управляемых технологических процессов, который ориентирован на случаи, когда динамику функционирования систем управления можно описать на уровне элементов управления со сложной логикой с использованием процедур метода Монте-Карло. Описываются способы контроля хода имитации управляемых технологических процессов с вероятностными характеристиками функционирования

**Резюме.** Рассматривается новый подход к исследованию вероятностных технологических процессов с дискретным характером технологического цикла, в котором временные интервалы выполнения отдельных операций являются случайными величинами, а нарушение ритма производственного процесса может стать причиной серьезной аварийной ситуации. Изложен способ контроля имитации управляемых технологических процессов с вероятностными характеристиками функционирования

**Abstract.** The new approach to research of likelihood technological processes with discrete character of a work cycle in which time intervals of separate operation performance are random variables, is considered, and production rhythm infringement can become the reason for a serious emergency. The way of control of operated technological process imitation with likelihood functioning characteristics is stated.

**Литература**

1. Смородин, В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В.С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2007. – № 1. – С. 105 – 110.
2. Смородин В.С. Регулирование функционирования технологического процесса производства с помощью системы принятия решений // Системні дослідження та інформаційні технології (System Research & Information Technologies). – 2008. – № 2. – С. 77–86.
3. Боровиков В.П. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2003. — 688 с.: ил.

Гомельский государственный  
университет имени Ф. Скорины

Поступило 30.03.09

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ