

УДК 681.3.06.001.57

*А.М. Валуев***ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
РЕАЛИЗАЦИИ КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ
ОТКРЫТОЙ УГЛЕДОБЫЧИ**

Семинар № 14

В настоящей работе, как и в предыдущих работах автора по рассматриваемой теме [1–4], речь идет о моделировании производственных процессов во временном масштабе календарного планирования — текущего и оперативного. В работе [2] описано построение программных средств планирования производственных процессов и ведения баз данных на основе языкового описания моделей процессов. Общая форма математических моделей управляемых процессов, формальное представление, расчеты и систематизированное хранение данных для которых возможно с помощью описанных средств, представляет собой обобщение формы модели дискретного (по времени) управляемого процесса со смешанными ограничениями. Отличие предлагаемой формы модели (событийно-переключаемого процесса) [1], развивающей модель управляемого процесса с качественной динамикой [5] на случай систем с циклической сменой состояний отдельных работ, состоит в том, что плановый период разбивается на этапы не только календарными моментами времени, но и рассчитываемыми (и зависящими от управления) моментами окончания отдельных работ.

Математические модели в задачах планирования в силу действия случайных факторов не могут точно отражать фактическое протекание процесса. Отклонения фактического поведения производственной системы от планового могут быть

следствием двух причин: 1) отклонения фактических параметров процесса от прогнозных, 2) случайных событий, изменяющих качественное состояние системы на время, сопоставимое с продолжительностью этапа планового периода. Имитационное моделирование реализации календарных планов открытой угледобычи направлено на изучение и выбор методов регулирования, т.е. коррекции плана (и значений их параметров) при возникающих возмущениях с позиций достижения требуемых значений целевых показателей производственного процесса. С учетом возникающих и прекращающихся возмущений представление процесса в виде последовательности этапов, завершающихся качественными переключениями системы, которыми служат как события возникновения и прекращения возмущений, так и окончания работ, является естественным. Такое внутреннее единство разных типов моделей — как чисто детерминированных, так и учитывающих случайные факторы, — позволяет строить программные средства для рассматриваемого типа задач имитационного моделирования на основе использования и модификации описанных в [2] программно-информационных средств планирования для переключаемых процессов.

В работе [4] предложены формы представления различных случайных факторов открытой угледобычи независимо от управления процессом, что обеспечивает возможность объективного сопоставления

различных методов управления при имитационном моделировании. Общая методика, положенная в основу имитационного моделирования, состоит в следующем:

- рассчитать последовательно набор реализаций отдельных случайных факторов;
- определить путем случайного независимого выбора реализаций каждого фактора полные наборы данных — совокупности параметров возможной производственной ситуации, рассматриваемой в динамике на плановый период;
- для каждого такого набора и изучаемой комбинации «метод планирования + метод регулирования» выполнить сначала расчет плановой траектории, а затем и фактически реализуемой при заданной производственной ситуации.

Реализация предложенной методики требует использования различных форм представления производственного процесса и случайных факторов производственной ситуации:

- модели частных случайных факторов;
- модель фактического поведения — на основе принятого или скорректированного плана с учетом возмущений, в т.ч. ненаблюдаемых, вычисляются фактические моменты качественных переключений системы и количественное состояние в моменты переключений;
- модель для планирования, соответствующая невозмущенной производственной ситуации;
- модель для регулирования, являющаяся вариантом модели для планирования и отличающаяся учетом уже проявившихся наблюдаемых возмущений и прогноза в их отношении.

Характер моделей, позволяющих генерировать реализации случайных величин и случайных рядов, описывающих отдельные независимые факторы неопределенности, описан в работе [4]. В [4] показано, что эти модели могут быть построены так, чтобы любая реализация была независима

от управления процессом, т.е. могла осуществиться независимо от управления.

Различия в моделях, определяющих собственно управляемый производственный процесс, заключается в наборе величин и взаимосвязей между ними. При этом все они представляет собой детерминированные модели событийно-переключаемых процессов типа [1], т.к. случайные факторы на реализации выражаются детерминированными параметрами ситуации. Однако наблюдаемость этих величин и соответственно возможность их рассмотрения для разных типов моделей различна. Так, в модели для регулирования прогнозная траектория производственного процесса может быть рассчитана с текущего момента и текущего состояния. Однако само это состояние и даже момент (если это не заданная календарная дата) не могут быть точно рассчитаны при планировании или регулировании для предшествующего момента времени. Они рассчитываются при имитационном моделировании с помощью модели фактического поведения, т.к. только последняя использует значения всех ненаблюдаемых случайных величин. Приблизительно момент переключения рассчитывается в модели для регулирования, если переключение связано либо с окончанием работы, либо с моментом прекращения определенного возмущения, тогда как для определения моментов наступления возмущений никаких соотношений и данных в модели для регулирования нет.

Рассмотрим модель для регулирования и модель фактического поведения на методическом примере. Пусть добыча ведется m экскаваторами, которые случайным образом попадают в состояние отказа и выходят из него; пусть уточненные данные о зольности угля в геологических блоках, намеченных к отработке на очередной этап, становятся известны к началу этапа. Введем две функции для зольности угля в зависимости от положения i -го забоя — грубую $a_i(x)$ и точную $b_i(x, R)$ оцен-

ку; последняя зависит от реализации R случайных факторов. Соответственно грубая и точная оценка массы золы в угле между положениями x и x' выражается соответственно как $A_i(x')$ - $A_i(x)$ и $B_i(x', R)$ - $B_i(x, R)$, где

$$A_i(x) = \int_0^x a_i(y) dy, \quad B_i(x, R) = \int_0^x b_i(y, R) dy. \quad (1)$$

Пусть на реализации R аварийная остановка i -го экскаватора происходит в положениях $x_{i1}(R), \dots, x_{in(R)}(R)$ на время соответственно $T_{i1}(R), \dots, T_{in(R)}(R)$. Пусть плановый период состоит из N этапов продолжительностью T_0 каждый. Управление процессом происходит дискретно и выражается в назначении постоянной интенсивности выемки и отгрузки угля в забоях для интервалов между двумя последовательными событиями, которыми здесь являются события окончания очередного этапа, аварийной остановки и восстановления работоспособности экскаваторов. Будем считать, что положение каждого экскаватора измеряется массой угля, извлеченного от начала выемки его экскаваторного блока.

Обозначим для начала k -го этапа: момент времени $T(k)$, номера текущего календарного этапа $l(k)$ и последнего отказа i -го экскаватора $j(k, i)$, положения экскаваторов $x_i(k)$ и их состояния работоспособности $s_i(k)$, массу отгруженного угля $q(k)$ и золы в нем $z(k)$, плановое управление для этапа $u_{i0}(k)$ и отклонение фактического управления от планового $\Delta u_i(k, R)$. Тогда фактическая динамика процесса определяется уравнениями

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (u_{i0}(k) + \Delta u_i(k, R)) \Delta t(k), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \Delta t(k) &= T(k+1) - T(k), \\ q(k+1) &= q(k) + (x_1(k+1) - x_1(k)) + \dots \\ &+ (x_m(k+1) - x_m(k)), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} z(k+1) &= z(k) + B_1(x_1(k+1), R) - \\ &- B_1(x_1(k), R) + \dots + B_m(x_m(k+1), R) - \\ &- B_m(x_m(k), R), \end{aligned} \quad (4)$$

$$s_i(k+1) = 0, \quad j(k, i) = j(k, i) + 1,$$

$$t_{i0}(k+1) = T(k) + T_{ij(k,i)}(R),$$

$$\text{если } x_i(k+1) = x_{ij}(R), \quad (5)$$

$$s_i(k+1) = 1, \quad \text{если } t_{i0}(k+1) = T(k) + NT_0, \quad \text{если } T(k) = t_{i0}(k), \quad (6)$$

$$l(k) = l(k) + 1, \quad \text{если } T(k+1) = l(k)T_0. \quad (7)$$

Кроме того, фактические управления удовлетворяют ограничениям

$$0 \leq u_{i0}(k) + \Delta u_i(k, R) \leq u_{i\max}(R),$$

$$\text{если } s_i(k) = 1, \quad \text{иначе}$$

$$u_{i0}(k) = \Delta u_i(k, R) = 0. \quad (8)$$

Модель для регулирования (которую можно использовать и для планирования) отличается от модели (2)–(8): отсутствием слагаемого $\Delta u_i(k, R)$ в (2) и (8); использованием вместо (4) при $l(k) > 1$ уравнения

$$z(k+1) = z(k) + A_1(x_1(k+1)) - A_1(x_1(k)) + \dots$$

$$+ A_m(x_m(k+1)) - A_m(x_m(k)), \quad (4')$$

отсутствием соотношения (5) и использованием в (6) в качестве времени очередного восстановления работоспособности i -го экскаватора $t_{i0}(k)$ оценки, основанной на знании характеристик закона распределения времени восстановления; использованием в (8) вместо $u_{i\max}(R)$ максимальной прогнозной производительности i -го экскаватора с поправкой на вероятную долю времени нахождения его в отказе.

Взаимодействие моделей состоит в следующем. Программные средства, реализующие модели отдельных случайных процессов и величин, порождают наборы экземпляров полных наборов величин, характеризующих свой случайный фактор. Ввиду того, что рассчитываемые величини

ны относятся к тем типам величин, которые употребляются в моделях планирования, прогнозного и фактического поведения производственной системы, они должны храниться в объединенной базе данных задачи, с которой работают перечисленные модели (структура которой, собственно, и определяется этими моделями). Дополнительными элементами каждой записи, хранящей данные определенной реализации, служит код ситуации и код реализации, составленный из кода случайного фактора и номера реализации. Если реализация представляет собой последовательность векторов, зависящих от времени или другой величины (как наработка на отказ), к каждому вектору добавляются значения этой величины (например, моменты времени начала и окончания действия данного фактора) и порядковый номер вектора.

Для порождения реализации совокупности случайных факторов, соответствующей возможной их комбинации для выбранной производственной ситуации на весь плановый период, достаточно независимо случайным образом выбрать номер реализации каждого фактора. Таким образом, ситуацию идентифицирует код ситуации, соединенный с кортежем значений номеров (кодов) реализации отдельных факторов, что позволяет отфильтровать в базе данных исходные данные для расчетов.

Алгоритм расчета функционирования при определенном алгоритме регулирования (коррекции плана для компенсации возмущений) состоит в следующем.

1. Текущим этапом объявляется первый; в качестве действующего управления на этап принимается плановое.

2. По модели функционирования рассчитывается очередное переключение производственной системы и состояние в момент переключения. Если переключение состоит в окончании процесса, расчет завершается. Если переключение состоит в возникновении (прекращении) некоторого возмущения, список наблюдаемых возмущений для модели регулирования соот-

ветственно пополняется данным возмущением (очищается от него), иначе увеличивается на 1 номер соответствующего планового этапа.

3. Номер текущего этапа увеличивается на 1. От текущего фактического состояния рассчитывается скорректированное управление и прогнозная траектория процесса по модели для регулирования. Для методов регулирования, корректирующих управление до конца планового периода, производится расчет прогнозной траектории до конца процесса с аналогичным переопределением управления и, возможно, плановой последовательности этапов. Затем действующее управление корректируется вычислениями метода регулирования, при действии на текущем этапе.

4. Производится возврат к п. 2.

Единство формы моделей позволяет использовать компоненты программных средств для планирования и для расчета модели фактического поведения. При этом одинаковым образом (но с разными значениями параметров) вызываются программные модули (или методы объектов), реализующие операции с моделью производственного процесса. Оказывается, что и целый ряд наиболее употребительных (или предложенных в работе [4]) моделей случайных факторов — такие, как пуассоновский поток, марковская цепь, процесс с независимыми приращениями [6], могут быть рассчитаны с помощью средств той же подсистемы моделирования [4], что и детерминированные модели, при условии дополнения ее библиотекой функций, служащих для описания случайных зависимостей.

Удобства расчета и сопоставления результатов вычислений требуют сохранения в базе данных о реализующемся производственном процессе при всех рассматриваемых вариантах. В зависимости от метода управления либо корректируется плановое управление на текущем этапе, текущем календарном периоде, с текущего момента времени до конца текущего ка-

лендарного периода или, наконец, с текущего момента времени до конца планового периода. Рассчитанные величины, если их требуется хранить в БД, характеризуются двумя ключевыми атрибутами времени: номер этапа (фактического), на начало которого произведен прогноз и

расчет, и номер прогнозного этапа, к которому они относятся. При более экономном хранении данных в БД сохраняются данные только для текущего и предыдущего этапа для прогнозной траектории и фактическая траектория.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Valuev A.M.* On the substantiation of technological solutions for open pits via production planning simulation // *Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the fifth international symposium, Sao Paulo, 22-26 October 1996.* — P. 91–95.
2. *Валуев А.М.* Программно-информационные средства исследования текущего управления угольным разрезом: // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2004. — Вып. 4. — С. 175–178.
3. *Валуев А.М.* Декомпозиционное построение системы имитационного моделирования управляемых процессов на основе языкового описания моделей // *Моделирование, декомпозиция и*

оптимизация сложных динамических процессов: Сб. науч. тр. М.: ВЦ им. А.А. Дородницына РАН. — С. 131–150.

4. *Валуев А.М.* Имитационное моделирование реализации календарных планов открытой угледобычи // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2005. — №6. — С. 192–195.

5. *Величенко В.В.* К проблеме управления катастрофами // *Доклады АН.* — 1996. — Т. 349. — №6. — С. 732–735.

6. *Вентцель А.Д.* Курс теории случайных процессов. — М.: Наука, 1975.

Коротко об авторах

Валуев А.М. — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Организация и управление в горной промышленности», Московский государственный горный университет.



© С.Н. Гончаренко, 2006

УДК 65

С.Н. Гончаренко