

ВАЛИДАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ *

В. Л. Конюх (Новосибирск)

Доказательство соответствия разработанной модели объекту моделирования является основной проблемой моделирования [1]. Методика верификации и валидации зависит от того, существует ли система, для которой разрабатывают модель [2]. Для валидации модели существующей системы используют мнения заказчика, пользователя или эксперта, сравнивают результаты эксплуатации системы за реальное время с результатами моделирования за модельное время. Для валидации модели создаваемой системы сравнение откликов модели и объекта моделирования провести не удастся. В [3] предлагается вести статистическое сравнение выходов модели и реальной системы.

Представим процесс транспортирования в виде «черного ящика», на входы которого поступают грузы от рассредоточенных в пространстве источников грузопотоков, а на выходе через транспортное запаздывание появляется суммарный грузопоток (рис. 1).

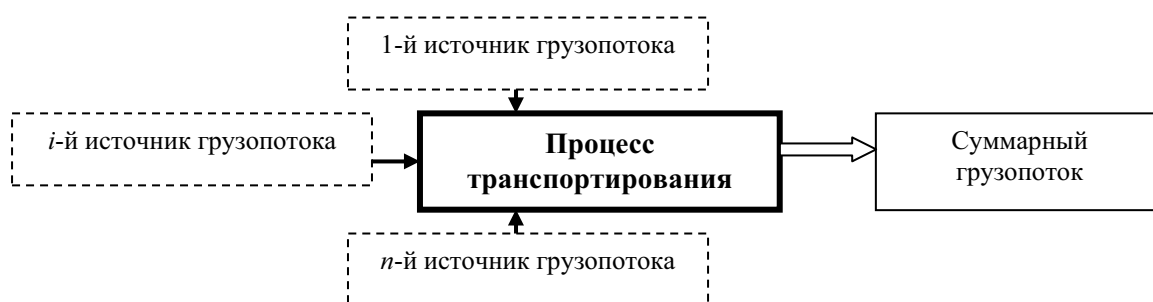


Рис. 1. Представление процесса транспортирования

Поток грузов может быть дискретным (коробки) или непрерывным (песок). Сравнение результатов непрерывного и дискретно-событийного моделирования потока сыпучих грузов в [4] показало, что непрерывный грузопоток может быть представлен движением дискретных грузов массой до 1 т. Поэтому процесс транспортирования можно отобразить последовательностью дискретных событий, которыми являются работа и остановка источника грузопотока или элемента транспортной сети, незаполнение или заполнение промежуточных складов. Через время t_k на выходе транспортной сети появляется груз от ближайшего источника грузопотока, а через t_j – суммарный груз от всех источников.

Для валидации имитационной модели процесса транспортирования нами предлагается два метода:

- сравнение грузопотоков на входе и выходе сети при имитации работы источников грузопотоков в разных комбинациях;
- сравнение времени появления или прекращения грузопотока в конце транспортной сети с расчетным временем движения при имитации случайной работы разных комбинаций источников грузопотоков.

Исходя из условий отсутствия потерь груза и появления новых источников грузопотоков за время доставки, сравним грузопотоки на входах и выходе транспортной системы:

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант 10-08-01211-а «Моделирование процессов добычи твердых полезных ископаемых на большой глубине»). Для разработки имитационных моделей применен программный продукт NetStar [5].

$$t_j \sum_{i=1}^m q_i = (t_j + t_l)Q,$$

где $\sum_{i=1}^m q_i$ – суммарный объем грузов, поступивших от m распределенных источников;
 t_j – j -й момент времени; t_l – время на доставку груза от самого удаленного источника; Q – объем груза на выходе транспортной системы.

Для валидации имитационной модели по истечении t_l сравнивают Q с $\sum_{i=1}^m q_i$, после чего делают вывод о соответствии модели объекту моделирования или калибруют модель. Время от начала работы i -го источника грузопотока до появления груза на выходе транспортной системы определяется как

$$T_i = \sum_{f=1}^F t_f,$$

где F – число участков сети между i -м источником грузопотока и выходом транспортной сети; t – время транспортирования груза по f -му участку сети.

Это же время может быть определено при имитации начала работы i -го источника грузопотока и определения момента появления груза на выходе транспортной системы. Входами концептуальной модели i -го источника грузопотока F_i являются случайные взаимоисключающие события: время работы Z_w или остановка Z_d на случайное время. Выходом является грузопоток Q_i (рис. 2).

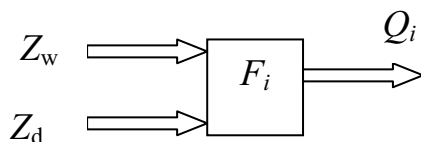


Рис. 2 . Концептуальная модель источника грузопотока

Входами концептуальной модели i -го элемента транспортирования C_i являются входной грузопоток $Q_{вх}$, длина доставки L_i , скорость перемещения V_i и емкость элемента Q_i . При $Q_i \leq Q_{вх}$, выходной грузопоток $Q_{вых}$ равен входному $Q_{вх}$, поэтому выходом является $Q_{вых}$ (рис. 3).

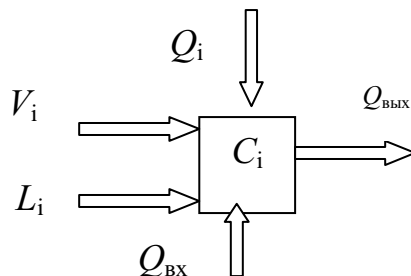


Рис. 3 . Концептуальная модель перемещения груза i -м элементом транспортирования

Масса груза на i -м элементе транспортирования сети в момент t_j :

$$M_i(t_j) = L_i n(t_j) \Delta q_i,$$

где n – число дискретных объемов груза на L_i ; Δq_i – масса груза в дискретном объеме.

После перемещения груза

$$Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} (t_j + L_i/V_i).$$

Таким образом, перемещение груза можно представить задержкой C_i в элементе транспортирования на время

$$Z_i = L_i/V_i,$$

Для j -го промежуточного склада B_j входами являются поступающий грузопоток Q_j , емкость склада S_b и скорость разгрузки V_p , выходом концептуальной модели – степень заполнения склада $N \leq S_b$ (рис. 4).

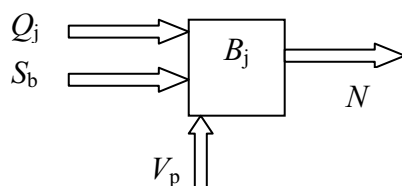


Рис. 4. Концептуальная модель движения груза через j -й промежуточный склад B_j

Для предотвращения переполнения или опустошения склада динамика его заполнения должна быть равна динамике потребления. Таким образом, пребывание груза на складе также можно представить задержкой грузопотока:

$$Z_i(N) = \begin{cases} 0, & N \leq n_2 \\ \Delta t \cdot N / n_2, & N > n_2 \end{cases},$$

где n_2 – число дискретных грузов на выходе склада; Δt – шаг времени между смежными дискретными грузами.

Степень заполнения склада изменяется в пределах

$$0 \leq N \leq S_b/q,$$

где S_b – емкость склада; $q = |Q_1 - Q_2|$ – разность объемов входного Q_1 и выходного Q_2 грузопотоков.

Разработка и валидация имитационной модели транспортной сети проводилась по заказу крупнейшей российской шахты «Распадская» (Междуреченск). Шахта ведет добычу угля из шести рассредоточенных под землей забоев F_1-F_6 (рис. 5).

Забой находится в случайных состояниях выдачи или прекращения грузопотока. Добытый уголь транспортируется девятью ленточными конвейерами C_1-C_9 на поверхность. В транспортной сети размещены пять промежуточных бункеров B_1-B_5 .

Сравнивались расчетное и модельное время появления и прекращения потока угля на поверхности. Известны число, длины и скорости конвейеров, связывающих забой с поверхностью. Время от начала работы забоя до появления угля рассчитывалось по формуле

$$T = L_1/V_1 + \dots + L_i/V_i + \dots + L_n/V_n,$$

где L_i – длина i -го конвейера, м; V_i – скорость ленты i -го конвейера, м/с; n – число конвейеров между забоем и поверхностью.

Так, для конвейерной линии C_4-C_5 расчетное время появления горной массы из забоев на сборном конвейере C_1 зависит от длин L_4, L_5 и одинаковых скоростей V конвейеров C_4, C_5 :

$$t = (L_4 + L_5)/V = 20 \text{ мин.}$$

Время от начала работы забоев F_1 , F_2 и F_3 до появления горной массы на сборном конвейере C_1 составило 22 мин., что, с учетом двух дополнительных интервалов модельного времени для забоя F_2 и бункера B_1 , соответствует расчетному (рис. 6).

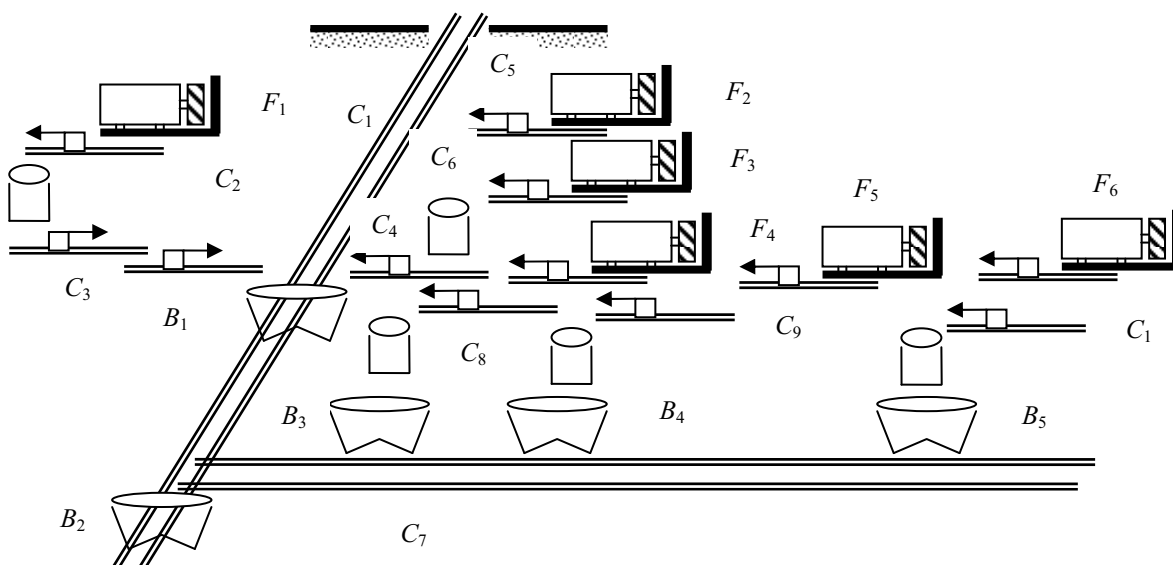


Рис.5 . Схема подземной транспортной сети шахты «Распадская»

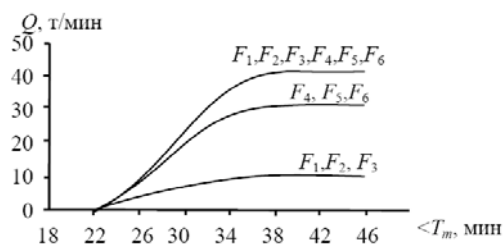


Рис. 6. Оценка времени T_m появления грузопотока Q на поверхности с момента начала работы забоев

Расчетное время стабилизации грузопотока из забоев, находящихся на разном расстоянии от сборного конвейера C_1 , разошлось с временем, полученным из имитационных экспериментов на 10,2%.

Далее имитировалось окончание работы забоев и оценивалось время, через которое поток горной массы на сборном конвейере C_1 должен прекратиться (рис. 7).

Так, по окончании работы самого удаленного от C_1 забоя F_4 время прекращения грузопотока рассчитывалось по длине $L_4 + L_8$ и скорости V конвейеров, соединяющих его со сборным конвейером:

$$t = (2000 + 4300)/189 = 33,3 \text{ мин.},$$

Сопоставлялись объемы горной массы на шести входах и выходе транспортной сети:

$$\sum_{i=1}^6 Q_i(t_k) = Q_{сб}(t_k + \Delta t),$$

где Q_i – грузопоток из i -го забоя в момент времени t_k ; $Q_{сб}$ – грузопоток по сборному конвейеру; Δt – транспортное запаздывание.

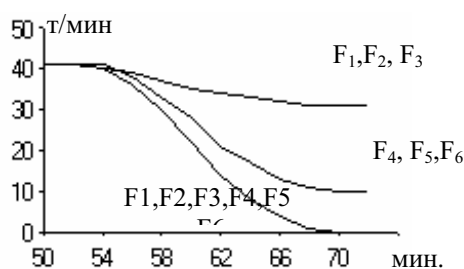


Рис. 7 . Оценка времени прекращения грузопотока на поверхности при имитации прекращения работы забоев

Расчетный объем грузопотока на выходе сети определен путем сложения объемов грузопотоков из забоев, работающих в разных сочетаниях. Транспортное запаздывание рассчитывалось по времени движения груза от забоя до поверхности. При имитационном моделировании объем грузопотока на выходе транспортной сети оценивался для таких же сочетаний работающих забоев. Расхождение результатов расчета и имитации для разных забоев составило 0,4–15,8%, что позволило считать разработанную модель соответствующей объекту моделирования.

Выводы

С целью валидации имитационных моделей транспортных сетей предлагается сравнивать грузопотоки на входе и выходе модели, а также расчетное и модельное время от начала или окончания работы источников грузопотоков до появления или прекращения грузопотока на выходе транспортной сети. Проверка методов при валидации моделей подземного транспортирования угольных шахт показала их работоспособность.

Литература

1. **Balci O.** Validation, Verification and Testing Techniques Throughout the Life Cycle of a Simulation Study / O.Balci // *Annals of Operation Research*. 1994. Vol.53. P. 121–174.
2. **Яцкив И. В.** Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения/ И.В.Яцкив// Доклады 1-й Всероссийской конференции по имитационному моделированию (ИММОД2003). СПб, 2003. Т. 1. С. 211–218.
3. **Kleijnen J. P. C.** Bootstrapping and Validation of Metamodels in Simulation/J.P.C., Kleijnen R.C.H. Cheng., A.J. Feelders// *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998. P. 701–706.
4. **Lebedev A.** Simulation of Materials Handling Systems in the Mines: Two Case Studies/A. Lebedev, P.Staples// *Simulation*. 1998. Vol. 70. No. 3. P. 183–196.
5. **Конюх В. Л.** Имитатор NETSTAR (программное обеспечение)/ В. Л. Конюх, А. Ю. Михайлишин, В. В. Зиновьев, А.Н.Стародубов //Свидетельство № 20106117178 от 27.10. 2010 г. о Госрегистрации программы для ЭВМ.