

**РАСЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ****И. П. Владимирская (Москва)**

Мировой опыт доказывает, что корректно рассчитать объект со сложной структурой можно только с помощью подробной имитационной модели. Для этого необходима развитая имитационная система с подпрограммой САПР.

Такой является *имитационная система ИСТРА*.

Система ИСТРА (Имитационная система транспорта) представляет собой систему моделирования, которая позволяет рассчитывать технические и технологические параметры систем железнодорожного и других видов транспорта. Подсистема автоматизированного проектирования ИСТРА – САПР позволяет удобно отображать схему путевого развития и технологию моделируемого объекта.

Техническая структура моделируемого объекта в имитационной системе ИСТРА представляется при помощи элементов. По своим свойствам элементы подразделяются на числовые  $q_i \in X^c$  и логические  $e_j \in X^l$ ;  $X^c \cap X^l = \emptyset$ . Числовые элементы используются для отображения устройств, имеющих свойства бункера (или емкости), например, путей определенной вместимости, грузовых фронтов и т.п. В дальнейшем будем называть такие элементы «бункерными». Они характеризуются предельной вместимостью  $B$  и текущей емкостью  $0 \leq q_i(t) \leq B$  в любой момент времени. Логические элементы могут принимать только два состояния – «занято» и «свободно»:  $s_j(t) \in \{0,1\}$ , где 0 – свободно, 1 – занято. С их помощью отображаются соединительные пути, стрелки, локомотивы, бригады осмотра и т.п. Логические элементы включают в себя подмножества базисных, промежуточных и параллельных элементов. Для станции базисные элементы отображают участки путевого развития, на которых могут происходить стоянка или остановка подвижного состава (пути, участки путей и т.п.). Промежуточными являются элементы, на которых остановка невозможна (например, стрелочные изолированные секции). Параллельные элементы моделируют устройства, которые занимают одновременно во времени с базисными или промежуточными элементами (маневровые локомотивы, бригады осмотра и пр.).

Содержательно элементы имитационной системы делятся на технологические, информационные и управляющие. Технологические отображают реальные устройства. Информационные элементы имитируют представление реальных устройств в памяти диспетчера (в общем случае в памяти лица, принимающего решения на некотором иерархическом уровне).

Технология работы станции в имитационной системе описывается набором операций. Под операцией понимается законченная часть технологического процесса, например, прием поезда, расформирование и т.д. В имитационной системе операция формально определяется таким образом, чтобы она максимально соответствовала существующему содержательному значению. Это позволяет без сложных преобразований достаточно легко и полно моделировать транспортные процессы.

В модели операция представляет собой набор записанных в определенной последовательности действий над элементами, участвующими в выполнении части технологического процесса, с указанием параметров их работы.

По характеру моделируемых процессов все операции модели условно можно разделить на три группы – технологические, информационные и управляющие.

Технологические операции имитируют передвижения по станции и, как следствие, продвижение какого-либо потока в пространстве и времени. Примерами таких операций могут служить перестановка состава из одного парка станции в другой, подача вагонов на грузовой фронт, заезд или уборка локомотива и т.д. К технологическим также относятся и те операции, которые не содержат в себе маршрутов, а моделируют изменение состояния потока во времени. Таковыми, например, являются операции осмотра состава в парке бригадой ПТО, обработка передачи на грузовом фронте и др.

Передвижения в модели имитируются при помощи маршрутов. Маршрутом в модели считается последовательность логических элементов, отображающих схему путевого развития, которая отвечает следующим требованиям:

- начальным и конечным элементом маршрута могут быть только элементы, отображающие путь, участок пути или перегон;
- смена направления движения в маршруте возможна только на элементе, отображающем путь, участок пути или перегон.

Маршруты моделируются с учетом данных из таблиц взаимозависимостей маршрутов, стрелок и сигналов действующих на станции систем электрической централизации. При этом отображаются прямая и косвенная враждебность, посекционное замыкание и размыкание поездных и маневровых маршрутов.

Операции увязываются в технологический процесс с помощью так называемой «таблицы взаимосвязи операций». В ней указывается, в какой последовательности выполняются операции и при выполнении каких условий. Условия задаются в виде предельных значений для состояния технологических элементов.

Информационные и управляющие операции в модели служат для имитации передачи информации и принятия управляющих решений диспетчерским персоналом. Для информационных и управляющих операций коэффициент перехода  $\lambda$  может быть отличен от единицы, поскольку при движении потоков информационных сообщений и управляющих решений может возникать задержка, искажение и потеря информации.

Роль информационных операций в модели заключается в занесении емкости на информационные элементы с определенными параметрами. Это будет отображать передачу информации диспетчерскому персоналу станции.

$$\sum_T \Delta q_y^{\oplus}(t) = \sum_T \lambda_i(t) \Delta q_i^+(t),$$

или

$$\sum_T \Delta q_y^{\ominus}(t) = \sum_T \lambda_i(t) \Delta q_i^-(t),$$

где  $\Delta q_y^{\oplus}(t)$  – величина заносимой емкости на  $y$ -й информационный элемент в момент времени  $t$ ;  $\Delta q_y^{\ominus}(t)$  – величина снимаемой емкости с  $y$ -го информационного элемента в момент времени  $t$ ;  $\Delta q_i^+(t)$  – величина заносимой емкости на  $i$ -й технологический элемент в момент времени  $t$ ;  $\lambda_i(t)$  – коэффициент перехода в момент времени  $t$ .

Коэффициент перехода состояния элементов в информационных операциях учитывает время задержки информации при передаче, возможные искажения и потерю информации при передаче.

$$\varphi_y^{\oplus}(t) = \varphi_i^k \gamma_i^k q_i^k (t - t_i^{\oplus}),$$

где  $\mathcal{E}_y^k(t)$  – состояние информационного элемента в момент времени  $t$ ;  $q_i^k(t - t_i^{\mathcal{E}})$  – состояние технологического элемента в момент времени  $(t - t_i^{\mathcal{E}})$ ;  $t_i^{\mathcal{E}}$  – время задержки информации при передаче диспетчеру;  $\varphi_i^k$  – коэффициент искажения информации;  $\gamma_i^k$  – коэффициент потери информации.

Время задержки  $t_i^{\mathcal{E}}$  определяется для каждого типа передаваемой информации фиксированным значением или по случайному закону. Введение времени задержки позволяет моделировать ситуацию, которая отстает от текущей.

Коэффициент искажения  $\varphi_i^k$  моделирует возможные ошибки при передаче информации (ошибка передающего, ошибка технических устройств, плохая слышимость). Как и время задержки, коэффициент искажения может задаваться фиксированным или по случайному закону распределения.

Коэффициент потери информации  $\gamma_i^k$  отображает в модели возможную потерю информации. Потеря информации возникает, когда сообщение не было передано и когда оно не было воспринято. Моделируется использованием случайных величин. По определенному закону распределения коэффициент может принимать два значения: 1 – информация поступила; 0 – информация потеряна:

$$\forall k / \gamma^k = (0; 1) \text{ law}(\ ),$$

где  $\text{law}()$  – вид закона распределения с параметрами.

В реальности потеря информации, как правило, имеет временный характер. Если образ, сложившийся в памяти диспетчера, слишком не похож на действительность, он предпринимает действия по уточнению ситуации. Эти действия моделируются с помощью информационной операции сверки. При наличии расхождений операция сверки восстанавливает реальную картину.

Управляющие операции в модели используются для отображения процессов управления. Такая операция меняет состояние соответствующего элемента. Все пространство состояний информационных элементов каждого уровня разбивается на укрупненные ситуации. Для каждой укрупненной ситуации номер решения должен быть известен заранее. Структура укрупненных ситуаций и соответствующих им управляющих решений задается пользователем. После выполнения очередной информационной операции алгоритмом проверяется, принадлежит ли новое состояние предыдущей ситуации, или произошел переход к новой. В последнем случае принимается новое решение, т.е. выполняется соответствующая управляющая операция.

$$\left( \forall \{ \mathcal{E}_y^k \} \in \mathcal{E}_s / \underline{\mathcal{E}}_y^k \leq \mathcal{E}_y^k(t) \leq \bar{\mathcal{E}}_y^k \right) \wedge (\tilde{q}_x(t) = \beta) \equiv K_s,$$

где  $\mathcal{E}_s$  – подмножество информационных элементов, участвующих в описании  $s$ -й ситуации;  $\mathcal{E}_y^k(t)$ , – состояние  $y$ -го информационного элемента;  $\underline{\mathcal{E}}_y^k, \bar{\mathcal{E}}_y^k$ , – минимальное и максимальное значение состояний для  $y$ -го информационного элемента в  $s$ -й ситуации;  $\tilde{q}_x(t)$  – состояние управляющего элемента;  $\beta$  – номер решения, соответствующего  $s$ -й ситуации;  $K_s$  –  $s$ -я ситуация.

Последовательность и условия выполнения технологических, информационных и управляющих операций определяется оператором управления. В зависимости от ситуации, сложившейся в модели, оператор управления определяет моменты времени

начала выполнения операций. В модели реализован ситуационный принцип управления, так как он наиболее соответствует процессам управления в сложных транспортных системах. Совокупность состояний технологических  $\{q_i(t)\}$  и соответствующих информационных  $\{\xi_y(t)\}$  элементов описывает ситуацию, по которой требуется принять решение, и для которой номер решения известен (структура укрупненных ситуаций и номеров решений для них задается заранее). В случае, когда ситуация изменилась, т.е.  $(\{q_i(t)\}, \{\xi_y(t)\}) \notin \tilde{q}_x(t)$ , выполняется соответствующая управляющая операция, которая меняет состояние управляющего элемента на соответствующее изменившейся ситуации. Затем, учитывая состояния информационных и управляющих элементов, производится выбор операций, которые необходимо выполнить после управляющей операции. Фактически это имитирует процесс принятия решения диспетчером.

Подсистема автоматизированного проектирования ИСТРА – САПР позволяет удобно отображать схему путевого развития и технологию моделируемого объекта. Она используется для решения таких проблем, как оценка проектных решений, приведение в соответствие технической структуры и технологии транспортного обслуживания, определения рационального количества локомотивов, погрузочно-выгрузочных и других технических устройств. При помощи этого программного комплекса были подробно рассчитаны транспортные системы таких крупных предприятий, как Новолипецкий металлургический комбинат, Магнитогорский металлургический комбинат, АО «Уралмаш», «Ураласбест» и другие.

Известно, что сложным промышленным транспортным системам свойственно противоинтуитивное поведение. На практике это значит, что даже опытные сотрудники транспортного управления часто затрудняются в оценке тех или иных мероприятий по развитию технической структуры.

Приведем реальный пример. Для снижения простоя вагонов РЖД было принято решение о строительстве нового грузового фронта. В горловине станции, к которой прикнет новый фронт, пересекаются 16 видов передвижений. Строительство нового грузового фронта наложит на эту схему новые маршруты следования вагонов РЖД. Что произойдет в результате этого изменения, сказать без подробного моделирования невозможно. Аналитические формулы здесь не работают. Результат, полученный на имитационной модели, показал, что эффект от строительства нового фронта будет противоположен ожидаемому. Среднее время простоя вагона РЖД на предприятии увеличится на час.

Имитационная система позволяет обеспечить высокую производительность расчетов. В течение двух месяцев могут быть оценены 25–30 укрупненных ситуаций. По каждому из расчетов может быть выведен подробный суточный план-график. Таким образом, производительность приблизительно может быть определена, как построение и обсчет за два месяца 600–750 суточных планов-графиков работы ПТС.

Подсистема САПР системы ИСТРА имеет большой набор инструментов, который позволяет строить модели легко и удобно. «Умный» электронный справочник «знает» основные технологии и не позволяет пользователю делать грубые ошибки. ИСТРА автоматически проводит анализ результатов и формирует рекомендации. Широкое применение такого метода расчета сложных транспортных систем позволит избежать весьма вероятных крупных ошибок в проектировании и поможет сохранить многие миллионы рублей.

### Литература

Козлов П. А., Козлова В. П. Расчет параметров проектируемых транспортных узлов// Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 36–38.