

УДК 656.212.001.57

Владимир Бобровский
Дмитрий Козаченко
Роман Вернигора

ЭРГАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Разработана эргатическая модель железнодорожной станции, в которой человек принимает непосредственное участие в моделировании технологических процессов, выполняя функции диспетчера, что обеспечивает требуемую адекватность модели.

Интеграция железных дорог Украины в европейское транспортное пространство через организацию международных транспортных коридоров, введение скоростного пассажирского движения предъявляют качественно новые требования к уровню предоставляемых услуг по перевозке грузов и пассажиров. В этой связи особую актуальность приобретают вопросы совершенствования технического оснащения железнодорожных станций, технологии их работы и подготовки оперативно-диспетчерского персонала для работы в новых условиях. Указанные задачи могут быть эффективно решены с помощью методов имитационного моделирования станционных технологических процессов (ТП) на ЭВМ.

Известно, что эффективность функционирования железнодорожных станций зависит не только от уровня их технического оснащения и технологии работы, но и от системы управления, основным звеном которой является человек-диспетчер (ЧД).

Учитывая отсутствие методов адекватного моделирования управленческой деятельности ЧД, в существующих моделях станций [1 – 3] функции оперативно-диспетчерского персонала выполняют упрощенные алгоритмы, поэтому адекватность подобных моделей во многих случаях является недостаточно высокой. В этой связи для выбора вариантов совершенствования железнодорожных станций предлагается использовать эргатические модели, в которых человек принимает непосредственное участие в процессе моделирования и в интерактивном режиме управляет ТП в качестве диспетчера.

В настоящей статье приведена общая структура эргатических моделей станций, методика формализации их ТП, а также результаты исследования адекватности модели, созданной для парка прибытия крупной сортировочной станции.

Железнодорожная станция представляет собой сложную систему массового обслуживания (СМО), состоящую из множества различных элементов, которые в процессе работы тесно взаимодействуют друг с другом, оказывая взаимное влияние. Модель функционирования станции (МФС) должна отражать как структуру, так и взаимодействие отдельных ее элементов.

© Бобровский В. И., Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., 2004

В этой связи МФС включает:

- информационную модель, которая используется для контроля человеком, выполняющим моделирование, текущего состояния станции и подачи управляющих команд. В состав информационной модели станции входит визуально-моторная (пульт-табло) и вербальная части (диалоги с исполнителями);
- модель путевого развития станции, необходимую для представления геометрических параметров плана путевого развития, контроля текущего состояния стрелочных переводов и моделирования занятия путевых участков подвижным составом;
- модель системы электрической централизации, которая имитирует функции станционных устройств автоматики и телемеханики, обеспечивающих взаимодействие между пультом-табло и напольными устройствами;
- модель технологического процесса станции (МТП), которая содержит данные об обслуживаемых объектах (локомотивах, составах, поездах) и используется для имитации их перемещения, моделирования операций обслуживания, а также занятия и освобождения исполнителей (сигналистов, бригад ПТО и др.).

Указанные модели реализованы в виде отдельных модулей, построенных с использованием объектно-ориентированного подхода. Синхронизация моделей выполняется в дискретные моменты системного времени T_c с помощью специально разработанного языка запросов. Модульная организация позволяет легко модифицировать модель в соответствии с конструкцией и технологией моделируемой станции. Схема взаимодействия моделей приведена на рис. 1.

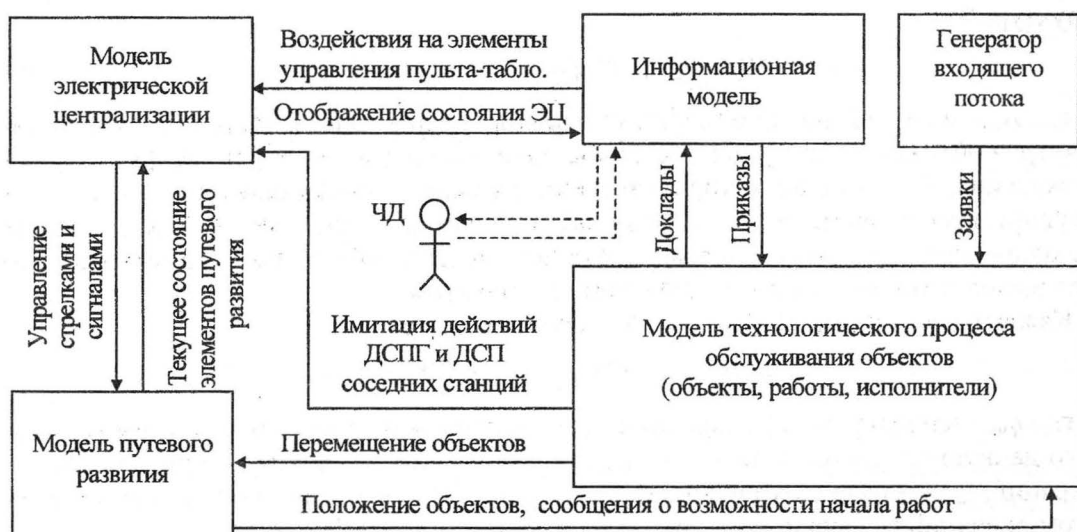


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов эргатической модели станции

Одной из основных проблем, возникающих при функциональном моделировании станций, является сложность формализации ТП, которые могут существенно отличаться для различных категорий объектов. В разработанной модели станция или ее отдельный технологический комплекс рассматривается как многофазная,

многоканальна СМО [4]. Фазами обслуговування являються окремі операції w_i , які виконуються в певній послідовності в відповідності з ТП:

$$w_i = \{N_w, p, \rho, M[t], \sigma_t\}, \quad i = 1, 2, \dots, n_w \quad (1)$$

де N_w – ідентифікатор операції; p – спеціалізація виконавця операції; ρ – тип закону розподілення випадкової величини (СВ) тривалості операції t ;

$M[t]$, σ_t – відповідно, математичне очікування і середнє квадратичне відхилення СВ; n_w – загальна кількість операцій комплексу.

Обслуговуваними каналами в СМО є виконавці різної спеціалізації; кожен виконавець в МТП представляється структурою:

$$E_k = \{N_e, p\}, \quad k = 1, 2, \dots, n_e$$

де N_e – ідентифікатор виконавця; p – спеціалізація; n_e – загальна кількість виконавців, які беруть участь в ТП роботи станції.

Для урахування зайнятості виконавців обслуговуванням заявок в МТП введено динамічний список $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, (m – загальна кількість вільних виконавців), який містить ідентифікатори виконавців, які в даний момент системного часу T_c не зайняті виконанням якої-небудь операції.

Потік заявок, що надходять на станцію, є неоднорідним. Технологія обробки заявок різної категорії різна, і тому в МТП для кожного типу об'єктів v передбачено виконання окремого комплексу технологічних операцій w_i (1). Кожен об'єкт, оброблюваний на станції, представляється структурою:

$$O_j = \{N_o, v, D, s, Q, U\}, \quad j = 1, 2, \dots, n_o \quad (2)$$

де N_o – ідентифікатор об'єкта; D – вектор технічних і технологічних параметрів об'єкта; s – поточний стан об'єкта, який відображає фазу його обслуговування; Q – список технологічних операцій, виконуваних з об'єктом в даний момент часу; U – список ідентифікаторів виконавців, які після закінчення виконання операцій з об'єктом не звільнюються, а очікують початку виконання інших операцій з тим же об'єктом.

Кожен елемент списку операцій Q представляється так:

$$q_l = \{q_w, q_e, f, t_{ок}\}, \quad l = 1, 2, \dots, n_q$$

де q_w – ідентифікатор операції; q_e – ідентифікатор виконавця, виконуючого цю операцію з об'єктом в даний момент часу; f – ознака початку операції; $t_{ок}$ – момент закінчення операції; n_q – загальна кількість виконуваних з об'єктом операцій (в початку моделювання $n_q = 0$ для всіх об'єктів).

Параметр f є булевою змінною, яка приймає значення $f=1$, якщо операція q_w виконується, і $f=0$, якщо операція q_w очікує звільнення виконавця відповідної спеціалізації.

Заявки на обслуговування надходять в модель з кількох входів (примикаючих станцій і інших парків станції). Момент $T_{вх}$ для кожної заявки визначається за допомогою виразу:

$$T_{вхj} = T_{вх(j-1)} + t,$$

де t – СВ інтервалу між надходящими поїздами.

Величина t моделюється по заданному закону розподілення або встановлюється в відповідності з расписанием. Одночасно з інтервалом t моделюється категорія заявки v і її параметри D (2).

Моделювання ТП обробки об'єктів здійснюється з використанням детермінованого кінцевого автомата A , який забезпечує виконання з кожним об'єктом всього комплексу технологічних операцій в відповідності з їх взаємною обумовленістю і дозволяє імітувати взаємодію ЧД з виконавцями:

$$A = \{X, Z, S, F_z, F_s\},$$

де X, Z – відповідно, входної і вихідної алфавіти; S – множина станів автомата; F_z, F_s – функції виходів і переходів.

Входної алфавіт X автомата включає два підмножини входних сигналів:

$$X = \{X_n, X_k\},$$

де X_n – команди ініціалізації технологічних операцій w з об'єктом (код сигналу $1N_w$); X_k – повідомлення від об'єкта про завершення операцій (код сигналу $2N_w$).

Вихідної алфавіт Z також включає два підмножини:

$$Z = \{Z_n, Z_k\},$$

де Z_n, Z_k – підмножини функцій, відповідно, ініціюючих початок технологічних операцій з об'єктом і функцій, виконуваних при їх завершенні. Вихідні сигнали $z \in Z$ відповідають входним сигналам $x \in X$, або приймають нульове значення при порушенні порядку виконання операцій, встановленого ТП.

Кожний стан автомата $s \in S$ відповідає певній фазі ТП обслуговування об'єкта, яка характеризується ступенем виконання окремих технологічних операцій. Ступінь виконання кожної операції кодується наступним чином: 0 – не почата; 1 – виконується; 2 – виконана.

Функції виходів F_z і переходів F_s автомата A визначають його поведінку в момент часу t і представляються в табличній формі (см. табл. 1):

$$z_t = F_z(x_t, s_t),$$

$$s_{t+1} = F_s(x_t, s_t).$$

В кожній клітці таблиці вказані вихідний сигнал z_t (чисельник) і номер наступного стану s_{t+1} (знаменатель).

Для управління процесом обслуговування заявок різного типу v в модель повинні бути включені відповідні автомати A_v (окремі таблиці виходів і переходів). При цьому один автомат A_v керує обслуговуванням всіх заявок типу v , що знаходяться в системі в поточний момент часу. Поточний стан автомата s для j -го об'єкта зберігається в моделі об'єкта O_j (2).

Вихідні сигнали автомата $z \in Z$ представляють собою ідентифікатори функцій, які ініціалізують виконання різних дій, передбачених алгоритмом моделювання ТП:

- зміна параметрів D оброблюваних об'єктів;
- коректування списку робіт Q , виконуваних з об'єктом;
- зміна стану виконавців (коректування списків U для об'єктів і списку R для станції).

- формирование команд на изменение состояния других моделей МФС;

Таблиця 1. Функции выходов и переходов автомата, управляющего технологическим процессом расформирования составов

№ состояния	Фаза обслуживания					Входные сигналы X									
	Закрепление	Отцепка локомотива	Прицепка локомотива	Уборка башмаков	Роспуск состава	Закрепление		Отцепка локомотива		Прицепка локомотива		Уборка башмаков		Роспуск состава	
						11	21	12	22	13	23	14	24	15	25
1	2	2	0	0	0	0/1	–	0/1	–	13/2	–	0/1	–	0/1	–
2	2	2	1	0	0	0/2	–	0/2	–	0/2	23/3	0/2	–	0/2	–
3	2	0	2	0	0	0/3	–	12/4	–	0/3	–	14/5	–	0/3	–
4	2	1	2	0	0	0/4	–	0/4	22/1	0/4	–	0/4	–	0/4	–
5	2	0	2	1	0	0/5	–	0/5	–	0/5	–	0/5	24/6	0/5	–
6	0	0	2	2	0	11/7	–	0/6	–	0/6	–	0/6	–	15/8	–
7	1	0	2	2	0	0/7	21/3	0/7	–	0/7	–	0/7	–	0/7	–
8	0	0	2	2	1	0/8	–	0/8	–	0/8	–	0/8	–	0/8	25/9
9	0	0	2	2	2	0/9	–	0/9	–	0/9	–	0/9	–	0/9	–

В табл. 1 в качестве примера приведены функции выходов и переходов автомата для моделирования части технологического процесса обслуживания расформируемых составов (от момента окончания осмотра до окончания роспуска). На данном примере рассмотрим случай, когда автомат находится в состоянии $s=3$ (горочный локомотив прицеплен). В соответствии с ТП в этом состоянии возможно поступление входных сигналов $x=12$ (отцепить локомотив) и $x=14$ (убрать тормозные башмаки). В первом случае выполняется выходная функция $z=12$ (начать отцепку) и автомат переходит в состояние $s=4$; во втором случае – функция $z=14$ (приступить к уборке башмаков) и переход в состояние $s=5$. При поступлении любого другого входного сигнала (например, $x=15$ – начать расформирование) фиксируется нарушение ТП ($z=0$) и автомат остается в прежнем состоянии ($s=3$).

Для апробации разработанной методики моделирования выполнено комплексное обследование подсистемы расформирования станции Нижнеднепровск-Узел и построена ее эргатическая модель.

Для оценки адекватности разработанной модели был выполнен статистический анализ СВ времени нахождения расформируемых составов в парке прибытия, полученных на реальной станции и методом моделирования. С этой целью исследованы выборки указанных значений времени, полученных в результате наблюдений на станции $x=(x_1, x_2, \dots, x_{n_x})$, $n_x=121$ и в результате моделирования $y=(y_1, y_2, \dots, y_{n_y})$, $n_y=24$. По данным выборок определены статистические оценки математических ожиданий \bar{x} и \bar{y} и средних квадратических отклонений s_x и s_y , а также выполнена проверка гипотез о законе распределения случайных величин X и Y .

В результате статистического анализа установлено, что случайные величины X и Y подчиняются логарифмически нормальному закону распределения с близкими параметрами: для станции и для модели оценки математического ожидания, соответственно, равны $\bar{x}=84,0$ и $\bar{y}=83,3$ мин; оценки среднего квадратического отклонения – $s_x=30,5$ мин, $s_y=26,9$ мин. Полученные статистические параметры свидетельствуют о близости результатов моделирования опытным данным.

Для повышения достоверности утверждения об адекватности модели по данным указанных выборок была выполнена проверка гипотезы об их принадлежности к одной и той же генеральной совокупности. С этой целью был использован X -критерий Ван дер Вардена, который предназначен для проверки гипотезы H о том, что функции распределения F_X и F_Y двух генеральных совокупностей одинаковы ($H: F_X = F_Y$); конкурирующая гипотеза $H_1: F_X \neq F_Y$.

Значения критерия Ван дер Вардена определяются с помощью выражений:

$$V_X = \sum_{i=1}^{n_x} \Psi \left(\frac{r(x_i)}{n_x + n_y + 1} \right) \quad \text{и} \quad V_Y = \sum_{j=1}^{n_y} \Psi \left(\frac{r(y_j)}{n_x + n_y + 1} \right),$$

где $r(x_i), r(y_j)$ – ранги, соответствующие элементам выборок x и y .

В приведенных выражениях $\Psi(z) = \Phi^{-1}(z)$ – функция, обратная функции $\Phi(z)$ нормального распределения с параметрами $(0,1)$.

В результате расчета указанных статистик для выборок x и y получены значения $V_X=+0,194$ и $V_Y=-0,194$.

При проверке гипотезы $H: F_X = F_Y$ против конкурирующей гипотезы $H_1: F_X \neq F_Y$ выбирается двухсторонняя критическая область; при этом гипотеза H отвергается, если $\max(V_X, V_Y) > X_{n_x, n_y}$. При больших значениях $n = n_x + n_y$ приближенное значение критического значения X_{n_x, n_y} можно найти как

$$X_{n_x, n_y; \alpha} \approx \lambda_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{n_x n_y}{n-1}} Q_n,$$

где λ_q – квантиль порядка q нормального распределения $N(0,1)$.

Для определения значений Q_n используется выражение

$$Q_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Psi^2 \left(\frac{i}{n+1} \right).$$

Для рассматриваемых выборок x и y $n=121+24=145$, а приближенное значение Q_{145} равно $0,942$. Тогда на уровне значимости $\alpha=0,05$ величина $\lambda_{0,975}=1,960$ и критическое значение $X_{121;24;0,05}=8,54$. Так как $\max(V_X, V_Y)=0,194 < 8,54$, основная гипотеза H о принадлежности выборок x и y одной генеральной совокупности не противоречит экспериментальным данным и может быть принята. Таким образом, можно заключить, что разработанная модель парка прибытия адекватна реальной станции.

После подтверждения адекватности модель была использована для решения следующих научно-практических задач:

- оптимизация технико-технологических параметров станции;
- совершенствование конструкции путевого развития парка прибытия;
- оперативное планирование работы подсистемы расформирования;

- построение тренажера для подготовки и повышения квалификации дежурных по станции [4].

Решение этих задач подтвердило эффективность концепции эргатических моделей и разработанной методики их построения. В перспективе указанные модели могут быть созданы для всех крупных станций Украины и использоваться для выбора реконструктивных мероприятий, оперативного планирования их работы и построения тренажеров для подготовки оперативно-диспетчерского персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миркин А. Г. Расчет прогнозных показателей работы сортировочной станции в изменяющихся условиях эксплуатации с использованием имитационного моделирования // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 3. – С. 7 – 10.
2. Нагорный Е. В., Алешинский Е. С. Моделирование функционирования комплекса “Сортировочная станция - прилегающие участки” с помощью сетей Петри // Информационно-управляющие системы на ж. д. транспорте. – 2000. – № 2. – С. 98 – 103.
3. Шавзис С. С. Планирование поездообразования: новые подходы и решения. // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 8. – С. 43 – 47.
4. Бобровский В. И., Вернигора Р. В. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно-диспетчерского персонала // Мат. моделювання. – 2000. – № 2(5). – С. 68 – 71.

Поступила 13 февраля 2004 г.