

УДК 629.735.083(045)

РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНІЧНОЇ СТРУКТУРИ Й ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

М. В. Олег

Національний авіаційний університет
avia_icao@mail.ru

На прикладі особливостей системи Tecnomatix Plant Simulation розглянуто принципи імітаційного моделювання авіаційних транспортних систем. Показано місце імітаційного моделювання в економіко-технічному аналізі бізнес-процесів.

Ключові слова: імітаційне моделювання, транспортна система, аеропорт.

On the example of the features of Tecnomatix Plant Simulation examined the principles of simulation of air transportation systems. In the article indicated the place of simulation in the economic and technical analysis of business processes.

Keyword: simulation, transport system, airport.

Постановка проблеми

Якщо розглядати сучасні авіаційні транспортні системи у вигляді складної кібернетичної системи [1] (у якій системоутворюючим фактором за Анохіним є прибуток як результат діяльності), тоді на передній план виходить завдання максимальної відповідності архітектури такої авіаційної транспортної системи цілям її діяльності. Зазначена архітектура не просто поєднує в одне ціле всі підсистеми авіаційної транспортної системи (виконання польотів, фінанси, постачання, інформаційне забезпечення тощо) — вона структурує знання про бізнес-процеси, бізнес-правила, всі види потоків (матеріальні, енергетичні, фінансові, інформаційні, людські), організаційні структури. Відповідно усі підсистеми в рамках ефективної архітектури мають працювати на загальний результат. У протилежному випадку підсистема-«дезорганізатор» мають бути максимально обмежена у своїх степенях вільності.

Звідси витікає найважливіша ознака імітаційного моделювання діяльності авіаційної транспортної системи [2; 3]: інструментальна підтримка аналізу функціонування в усіх можливих аспектах (технологічному, економічному, організаційному тощо) з метою вдосконалення виробничих й управлінських процесів, скоординованої й контрольованої роботи всіх підсистем. Врешті-решт це буде сприяти підвищенню монолітності авіаційної транспортної системи, формуванню єдиного цілісного організму, здатного в найкоротший термін мобілізувати всі свої ресурси й перекинути їх на основний напрямок. Побачити не тільки сьогоднішні вузькі місця, але й передбачити за допомогою імітаційної моделі їхню появу в майбутньому — це і є шлях до повного розуміння процесів, які відбуваються в авіаційній транспортній системі, коли в будь-

який момент часу можна отримати відповідь на питання про те, що, чому і як відбувається в кожній з її підсистем.

Реструктуризація виробництва, підвищення якості обслуговування пасажирів і відправників вантажу, зниження виробничих і логістичних витрат, моделювання життєвого циклу нової авіаційної техніки — далеко не повний перелік проблем, повноцінне вирішення яких навряд чи можливо без використання імітаційних моделей [1; 2].

Для вирішення цього завдання можна використати систему *Tecnomatix Plant Simulation*. Вона являє собою систему моделювання, що дає змогу розраховувати технічні й технологічні параметри різних транспортних систем як в цілому, так й окремих її елементів.

Фактично *Tecnomatix* — це набір рішень для цифрового виробництва. *Tecnomatix* використовує PLM-систему *Teamcenter* як єдину платформу для технологічного проектування на всіх етапах: від розроблення технологічного процесу і до його імітаційного моделювання й документування. Сьогодні *Tecnomatix* позиціюється на ринку як рішення для усунення розриву між автоматизацією проектування й виготовленням виробу, керуючи проектуванням технічними процесами й їхнім виконанням на основі асоціативної моделі даних. Основні задачі, розв'язувані функціоналом програмного забезпечення — забезпечення технологічності, підвищення продуктивності й скорочення термінів підготовки виробництва.

Усі об'єкти мають набір параметрів (наприклад, час виконання операції) і поведінки. Можна будувати більш складні структури, поєднуючи базові об'єкти й додаючи підпрограми (методи) обробки подій мовою *SimTalk*. Таким чином, можна створювати користувальницькі бібліотеки об'єктів й ієрархічні моделі.

При моделюванні рухливих об'єктів (*Movable Units*) переміщуються за створеною структурою, генеруючи події в моменти часу, зумовлені параметрами об'єктів. Зокрема, під час входу в об'єкт і виходу з нього. Для оцінювання роботи системи можуть використовуватись аналітичні інструменти: аналізатор вузьких місць, діаграма Ганта, діаграма Сенки тощо.

Вирішення проблеми

Технічна структура об'єкта, що моделюється в імітаційній системі *Tecnomatix Plant Simulation*, подається за допомогою елементів. За своїми властивостями елементи поділяються на числові $q_i \in X^c$ і логічні $e_j \in X^l$; $X^c \cap X^l = \emptyset$ [6]. Числові елементи використовуються для відображення пристроїв, що мають властивості бункера (або ємності), наприклад, шляхів певної місткості, вантажних фронтів тощо. Надалі будемо називати такі елементи «бункерними». Вони характеризуються граничною місткістю B і поточною ємністю $0 \leq q_i(t) \leq B$ у будь-який момент часу. Логічні елементи можуть одержувати тільки два стани — «зайняте» і «вільне»:

$$s_j(t) \in \{0, 1\},$$

де 0 — вільне; 1 — зайняте.

За їх допомогою відображаються сполучні маршрути, аеродроми, літальні апарати, інженерно-технічний склад тощо. Логічні елементи містять у собі підмножини базисних, проміжних і паралельних елементів. Для аеродромів базисні елементи відображають ділянки розгалуження маршрутів розвитку, на яких можуть відбуватися стоянка й/або технічне обслуговування повітряних суден.

Змістовно елементи імітаційної системи діляться на технологічні, інформаційні й керуючі [7]. Технологічні відображають реальні пристрої. Інформаційні елементи імітують роботу реальних пристроїв у пам'яті диспетчера, пілота, обслуговуючого персоналу (у загальному випадку в пам'яті особи, що приймає рішення на деякому ієрархічному рівні).

Технологія роботи аеропорту в імітаційній системі описується набором операцій. Під операцією розуміється закінчена частина технологічного процесу, наприклад, приземлення повітряного судна, розвантаження повітряного судна тощо. В імітаційній системі операція формально визначається таким чином, аби вона максимально відповідала існуючому змістовному значенню. Це дає можливість без складних перетворень досить легко й повно моделювати транспортні процеси.

У моделі операція являє собою набір записаних у певній послідовності дій над елементами,

що беруть участь у виконанні частини технологічного процесу, із вказівкою параметрів їхньої роботи.

За характером процесів, що моделюються, всі операції моделі також умовно можна розділити на три групи — технологічні, інформаційні й керуючі [7].

Технологічні операції імітують пересування по аеродрому й, як наслідок, просування якогонебудь потоку в просторі й часі. Прикладами таких операцій можуть служити подача вантажів з вантажного терміналу до літака тощо. До технологічного також відносяться й ті операції, які не містять у собі маршрутів, а моделюють зміну стану потоку в часі. Такими, наприклад, є операції оперативного технічного обслуговування повітряних суден та інші подібні операції.

Пересування в моделі імітуються за допомогою маршрутів. Маршрутом у моделі вважається послідовність логічних елементів, які відображають схему повітряних трас, що відповідає таким вимогам:

— початковим і кінцевим елементом маршруту можуть бути тільки елементи, що відображають аеродром;

— зміна напрямку руху в маршруті можлива тільки на елементі, що відображає аеродром.

Маршрути моделюються з урахуванням даних з таблиць взаємозалежних повітряних трас, системи керування повітряним рухом і льотно-технічними характеристиками повітряних суден.

Операції об'єднуються в технологічний процес за допомогою так званої «таблиці взаємозв'язку операцій». У ній вказується, у якій послідовності виконуються операції й при виконанні яких умов. Умови задаються у вигляді граничних значень для стану технологічних елементів.

Інформаційні й керуючі операції в моделі слугують для імітації передачі інформації й прийняття керуючих рішень пілотами й диспетчерами керування повітряним рухом.

Для інформаційних і керуючих операцій коефіцієнт переходу λ може бути відмінний від одиниці, оскільки під час руху потоків інформаційних повідомлень і керуючих рішень може виникати затримка, перекручування й втрата інформації [8].

Роль інформаційних операцій у моделі полягає в занесенні ємності на інформаційні елементи з певними параметрами. Це буде відображати передачу інформації диспетчерському персоналу [9]:

$$\sum_T \Delta \bar{q}_y^+(t) = \sum_T \lambda_i(t) \Delta q_i^+(t);$$

$$\sum_T \Delta \bar{q}_y^-(t) = \sum_T \lambda_i(t) \Delta q_i^-(t),$$

де $\Delta \bar{q}_y^+(t)$ — величина ємкості, що заносить на y -й інформаційний елемент у момент часу t ; $\Delta \bar{q}_y^-(t)$ — величина ємкості, що знімається з y -го інформаційного елемента в момент часу t ; $\Delta q_y^+(t)$ — величина ємкості, що заносить на y -й технологічний елемент у момент часу t ; $\Delta q_y^-(t)$ — коефіцієнт переходу в момент часу t .

Коефіцієнт переходу стану елементів в інформаційних операціях враховує час затримки інформації при передачі, можливі перекручування й втрату інформації під час передачі:

$$q_y^k(t) = \varphi_i^k \gamma_i^k q_i^k(t - \bar{t}_i^k),$$

де $q_y^k(t)$ — стан інформаційного елемента в момент часу t ; $q_i^k(t - \bar{t}_i^k)$ — стан технологічного елемента в момент часу $(t - \bar{t}_i^k)$; \bar{t}_i^k — час затримки інформації при передачі диспетчеру; φ_i^k — коефіцієнт перекручування інформації; γ_i^k — коефіцієнт втрати інформації.

Час затримки \bar{t}_i^k визначається для кожного типу переданої інформації фіксованим значенням або за випадковим законом. Введення часу затримки дозволяє моделювати ситуацію, що відстає від поточної.

Коефіцієнт перекручування φ_i^k моделює можливі помилки при передачі інформації (помилка того, хто передає інформацію, помилка технічних пристроїв, погана чутність). Як і час затримки, коефіцієнт перекручування може задаватися фіксованим або за випадковим законом розподілу.

Коефіцієнт втрати інформації γ_i^k відображає в моделі можливу втрату інформації. Втрата інформації виникає, коли повідомлення не було передано й коли воно не було прийнято. Моделюється використанням випадкових величин. За певним законом розподілу коефіцієнт може набувати двох значень:

- 1 — інформація надійшла;
- 0 — інформація загублена:

$$\forall k | \gamma^k = (0;1)law(),$$

де $law()$ — вид закону розподілу з параметрами.

Керуючі операції в моделі використовуються для відображення процесів управління. Така операція змінює стан відповідного елемента. Весь простір станів інформаційних елементів кожного рівня розбивається на укрупнені ситуації. Для кожної укрупненої ситуації номер рішення повинен бути відомий заздалегідь. Структура укрупнених ситуацій і відповідних їм керуючих рішень задається користувачем. Після ви-

конання чергової інформаційної операції алгоритмом перевіряється, чи належить новий стан попередній ситуації, або відбувся перехід до нової. В останньому випадку приймається нове рішення, тобто виконується відповідна керуюча операція:

$$(\forall \{\bar{q}_y^k\} \in \bar{Q}_s | \underline{q}_y^k \leq \bar{q}_y^k(t) \leq \overline{q}_y^k) \wedge (\bar{q}_y^k = \beta) \equiv K_s,$$

де \bar{Q}_s — підмножина інформаційних елементів, що беруть участь в описі s -ї ситуації; $\bar{q}_y^k(t)$ — стан y -го інформаційного елемента; $\underline{q}_y^k, \overline{q}_y^k$ — мінімальне й максимальне значення станів для y -го інформаційного елемента в s -ї ситуації; \bar{q}_y^k — стан керуючого елемента; β — номер рішення, що відповідає s -ї ситуації; K — s -а ситуація.

Послідовність й умови виконання технологічних, інформаційних і керуючих операцій визначається оператором керування. Залежно від ситуації, що склалась у моделі, оператор керування визначає моменти часу початку виконання операцій. У моделі реалізований ситуаційний принцип керування, тому що він найбільше відповідає процесам керування в складних транспортних системах.

Сукупність станів технологічних $\{q_i(t)\}$ і відповідних інформаційних $\bar{q}_y(t)$ елементів описує ситуацію, за якою потрібно прийняти рішення, і для якої номер рішення відомий. У випадку, коли ситуація змінилася, тобто $(\{q_i(t)\} \{\bar{q}_y^k(t)\}) \notin \bar{q}_y^k$, виконується відповідна керуюча операція, що змінює стан керуючого елемента на відповідній ситуації, що змінилася. Потім, з огляду на стан інформаційних і керуючих елементів, виконується вибір операцій, які необхідно зробити після керуючої операції. Фактично, це імітує процес ухвалення рішення пілотом або диспетчером.

Підсистема автоматизованого проектування *Tecnomatix Plant Simulation* дозволяє зручно відображати схему повітряних трас і технологію об'єкта, що моделюється (аеропорту). Вона використовується для вирішення таких проблем, як оцінювання проектних рішень, приведення у відповідність технічної структури й технології транспортного обслуговування, визначення раціональної кількості повітряних суден, авіаційної наземної техніки та інших технічних пристроїв аеропорту.

Відомо, що складним транспортним системам властиво антиінтуїтивне поведіння. На практиці це означає, що навіть досвідчені співробітники транспортних підприємств часто утрудняються в оцінюванні тих або інших заходів щодо розвитку технічної структури.

Наведемо реальний приклад. Для зниження простою вантажних літаків було ухвалене рішення про будівництво нового вантажного терміналу. При цьому планувалося будівництво нових доріжок для руління і місць для стоянки літаків без збільшення площі аеродрому. Що відбудеться в результаті цієї зміни, сказати без докладного моделювання неможливо.

Аналітичні формули тут не працюють. Результат, отриманий на імітаційній моделі, показав, що ефект від будівництва нового вантажного терміналу буде протилежний очікуваному. Середній час простою вантажних літаків збільшиться більш ніж на годину.

Імітаційна система дозволяє забезпечити високу продуктивність розрахунків. Протягом двох місяців можуть бути оцінені 25...30 укрупнених ситуацій. По кожному з розрахунків може бути отриманий докладний добовий план-графік. Таким чином, продуктивність приблизно може бути визначена, як побудова й обрахування за два місяці 600...800 добових планів-графіків роботи аеропорту.

Система *Tecnomatix Plant Simulation* має великий набір інструментів, що дає змогу будувати моделі легко й зручно.

«Розумний» електронний довідник «знає» основні технології й не дозволяє користувачеві робити грубі помилки. *Tecnomatix Plant Simulation* автоматично проводить аналіз результатів і формує рекомендації. Широке застосування такого методу розрахунку складних транспортних систем сприяє уникненню досить імовірних великих помилок у проектуванні й допоможе зберегти багато мільйонів доларів.

Висновки

Наявність в економіко-математичних моделях матеріального, фінансового й соціального факторів потребує застосування різних інструментів на відповідному модельному рівні.

Так, виробничо-технологічні моделі (традиційно розглянуті як системи масового обслуговування) непогано моделюються дискретно-ситуаційними засобами типу GPSS, фінансові моделі добре вписуються в рамки системної динаміки, для імітаційного моделювання трудових ресурсів може бути корисний агентний підхід.

Слід зазначити, що якщо традиційні підходи в імітаційному моделюванні практично не отримали істотного розвитку за останні сорок років, то в розробці програмних систем відбулися революційні зміни, що радикально змінили принципи роботи зі складними системами. Концепції об'єктно-орієнтованого проектування й програмування, що знайшли своє втілення в агентному моделюванні, дозволяють будувати моделі реальних систем (складних, нелінійних, зі зворотними зв'язками й стохастичною поведінкою) не тільки за допомогою професійних аналітиків або програмістів, але й силами самих користувачів, у термінах бізнесів-процесів.

Про те, який з підходів в імітаційному моделюванні буде переважати в найближчі кілька років, говорити ще рано — у кожного з них є досить ємна «ніша» на ринку — але переваги агентного моделювання занадто вражаючі, щоб не оцінити їх у реальному проекті.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Караваяев А. П.* Модели и методы управления составом активных систем / А. П. Караваяев. — М. : ИПУ РАН, 2003. — 151 с.
2. *Уродовских В. Н.* Управление рисками предприятия : учеб. пособие / В. Н. Уродовских. — М. : Вузовский учебник : ИНРА-М, 2011. — 168 с.
3. *Советов Б. Я.* Моделирование систем : учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — М. : Высш. шк., 2001. — 343 с.
4. *Аверилл М. Лоу* Імітаційне моделювання / Аверилл М. Лоу, В. Девід Кельтон. — СПб. : Питер, Издат. группа ВHV, 2004. — 848 с.
5. *Ємельянов А. А.* Імітаційне моделювання економічних процесів / А. А. Ємельянов — М. : Фінанси й статистика, 2002. — 368 с.
6. *Прикладные нечеткие системы* : пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иван [и др.]; под редакцией Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. — М.: Мир, 1993. — 368 с.
7. *Тарасик В. П.* Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов / В. П. Тарасик. — Мн. : ДизайнПРО, 2004. — 640 с.
8. *Деменков Н. П.* Нечеткое управление в технических системах : учебн. пособие / Н. П. Деменков. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 200 с.
9. *Силов В. Б.* Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В. Б. Силов. — М. : ИНПРО-РЕС, 1995. — 228 с.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2012.