

Dr inż. Norbert Adamko
Dr inż. Peter Márton
University of Žilina, Slovakia
Dr inż. Jarosław Moczarski
Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE DECYZJI W MODERNIZACJI OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY KOLEJOWEJ

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Potrzeba modernizacji obiektów infrastruktury transportu kolejowego
3. Specyfikacja problemów
4. Zastosowanie pakietu symulacji komputerowej
5. Struktura danych modelu symulacyjnego
6. Tworzenie modelu symulacyjnego
7. Przebieg symulacji — ocena i wykorzystanie wyników
8. Zakończenie

STRESZCZENIE

Polityka transportowa Unii Europejskiej oraz przyjęta przez polski rząd Strategia Rozwoju Kraju 2007—2013 wskazują na potrzebę zwiększenia udziału transportu kolejowego w przewozach pasażerów i ładunków. Wiąże się z tym konieczność budowy i modernizacji elementów infrastruktury kolejowej. Cechy ekonomiczne takich obiektów sprawiają, że procesy inwestycyjne są czasochłonne i kosztowne, a ich efekty przez wiele lat wpływają na realizowane procesy transportowe. Racjonalną realizację przedsięwzięć inwestycyjnych może zapewnić wykorzystanie odpowiednich narzędzi informatycznych. Jednym z takich narzędzi, sprawdzonym podczas budowy i modernizacji obiektów infrastruktury kolejowej, jest pakiet symulacyjny Villon.

1. WPROWADZENIE

Przemieszczanie ładunków, usług i informacji od źródła pochodzenia do miejsca konsumpcji jest jednym z podstawowych celów realizacji procesów logistycznych. W sekwencji działań obejmujących planowanie, realizację i kontrolę dystrybucji zasobów istotną rolę odgrywa system transportowy. Od sprawności funkcjonowania tego systemu w dużym stopniu zależy techniczna i ekonomiczna efektywność realizacji procesów logistycznych, bowiem w wielu przypadkach koszty transportu stanowią ponad 50% całkowitych kosztów logistycznych, ponoszonych przez przedsiębiorstwo [4].

Jedną z podstawowych faz procesu transportowego jest proces przewozowy, obejmujący działania związane z bezpośrednim oddziaływaniem na przemieszczane zasoby, tzn. z naładunkiem, przewozem, ewentualnym przeładunkiem oraz wyładunkiem. Obecnie coraz większą rolę w dystrybucji zasobów zaczynają odgrywać przewozy kombinowane, z wykorzystaniem środków transportowych reprezentujących różne gałęzie transportu, w tym tzw. transport intermodalny oraz transport multimodalny.

Rządy państw Europy Zachodniej, a także zarządy kolejowe oraz organizacje międzynarodowe od wielu lat poszukują metod zmniejszenia udziału transportu drogowego w przemieszczaniu zarówno ładunków, jak też pasażerów na rzecz rozwoju transportu kolejowego. Istotnym argumentem są tu tzw. koszty zewnętrzne transportu oraz nasilające się w przewozach drogowych zjawisko kongestii.

Koszty zewnętrzne są generowane przez takie zjawiska, jak: hałas, emisja spalin, emisja dwutlenku węgla, zmiany klimatu, zmiany w przyrodzie i krajobrazie, a także wypadki i związane z nimi koszty leczenia i opieki społecznej [15]. Ich składowymi są także koszty oddziaływania na funkcjonowanie obszarów miejskich, koszty powodowane przez zjawisko kongestii oraz koszty towarzyszące produkcji energii, środków transportu i elementów infrastruktury transportowej.

Obecnie koszty zewnętrzne nie są pokrywane przez uczestników procesu transportowego, lecz traktowane jako koszty społeczne, ponoszone przez wszystkich podatników. W 2007 r. Dyrekcja Generalna ds. Energii i Transportu Komisji Europejskiej rozpoczęła proces konsultacji społecznych na temat włączenia kosztów zewnętrznych do opłat za korzystanie z infrastruktury transportowej. Opracowano ankietę skierowaną do mieszkańców Unii Europejskiej [5]. Pytania dotyczyły m.in.:

- 1) niedogodności poszczególnych rodzajów transportu (drogowego, kolejowego, powietrznego, morskiego, śródlądowego) dla użytkowników transportu i społeczeństwa;
- 2) internalizacji kosztów (sposobów przypisywania kosztów zewnętrznych użytkownikom transportu);
- 3) polityki stosowania różnych narzędzi rynkowych dla poszczególnych rodzajów kosztów zewnętrznych (zafłoczenia, wypadków, hałasu, zanieczyszczenia powietrza, zmian klimatu);
- 4) metod pobierania opłat i zarządzania uzyskiwanymi w ten sposób dochodami, a także możliwych źródeł finansowania infrastruktury transportowej.

Zebrane opinie powinny ułatwić opracowanie i wdrożenie odpowiednich rozwiązań systemowych.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że w porównaniu z transportem drogowym i lotniczym, przewozy kolejowe charakteryzują się najniższymi kosztami zewnętrznymi. Rozwój transportu kolejowego oraz umiejętne wykorzystanie zalet przewozów kombinowanych są więc jednym z istotnych warunków wdrożenia i praktycznej realizacji polityki zrównoważonego rozwoju kraju.

2. POTRZEBA MODERNIZACJI OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY TRANSPORTU KOLEJOWEGO

Jednym z działań decydujących o prawidłowym funkcjonowaniu i rozwoju systemu transportowego jest odpowiednie kształtowanie rozwoju elementów infrastruktury. Do podstawowych obiektów, tworzących infrastrukturę transportu, należą:

- drogi (dla różnych gałęzi transportu),
- porty rzeczne i morskie, lotniska, stacje kolejowe itp.,
- urządzenia i obiekty pomocnicze.

Obiekty te charakteryzują się istotnymi cechami ekonomicznymi [7]; są to między innymi:

- 1) niepodzielność techniczna i ekonomiczna (związana z tym, że potencjał obiektów infrastruktury, jak też niezbędne nakłady narastają w sposób skokowy);
- 2) długi okres realizacji inwestycji oraz bardzo duża trwałość obiektów i długi okres ich eksploatacji;
- 3) wysoka majątkochłonność oraz kapitałochłonność, a także duże zyski i straty związane z oddziaływaniem obiektów na funkcjonowanie innych podmiotów życia społeczno-gospodarczego.

Przedstawione cechy sprawiają, że modernizacja lub budowa obiektów infrastruktury transportu wymagają szczególnej staranności w określaniu celów, przyjmowaniu rozwiązań technicznych i organizacyjnych oraz zasad i metod realizacji.

W przewozach ładunków transportem kolejowym podstawowymi obiektami infrastruktury są linie kolejowe, stacje rozrządowe i manewrowe, bocznicie przemysłowe, tory postojowe Zakładów Taboru, terminale kontenerowe, centra logistyczne, a także punkty, w których odbywa się naładunek, przeładunek i wyładunek przemieszczanych zasobów. Wymienione elementy infrastruktury są istotnymi składnikami systemu transportu kolejowego, a jednocześnie — punktami węzłowymi, umożliwiającymi dystrybucję ładunków w szeroko pojętym systemie logistycznym, z wykorzystaniem różnych gałęzi transportu (w warunkach polskich — głównie drogowego, kolejowego i morskiego).

W przewozach pasażerskich podstawowymi elementami infrastruktury są linie kolejowe (w tym tzw. linie dużych prędkości), stacje oraz dworce osobowe, będące punktami przesiadkowymi na środki transportu różnych przewoźników (kolejowych, miejskich, drogowych, lotniczych itp.).

Liczba, rozmieszczenie i potencjał techniczny obiektów infrastruktury wpływają na sprawność przewozów kolejowych i ich efektywność ekonomiczną, a jednocześnie determinują udział transportu kolejowego w systemie transportowym kraju.

Szybki rozwój polskiej gospodarki powoduje wzrost zapotrzebowania na przewozy towarów. W latach 2001—2006 zarejestrowano ponad 28-procentowy wzrost przewozów towarów, mierzony pracą przewoźową, w tym: dla przewozów kolejowych — o około 11%, a dla transportu samochodowego — o ponad 83% [1]. W roku 2006 przewozy ładunków transportem kolejowym na polskim rynku realizowało 37 podmiotów gospodarczych. Ponad 86% towarów stanowiły: węgiel kamienny, minerały surowe i przetworzone, ropa naftowa i materiały ropopochodne, rudy żelaza i materiałów nieżelaznych, a także wyroby metalowe, cement, wapno, materiały budowlane i chemikalia.

Konkurencja między przewoźnikami rozwija się przede wszystkim w segmencie przewozów masowych i dotyczy wyłącznie przewozów całopociągowych. Jest to spowodowane sposobem pobierania opłaty za dostęp do infrastruktury, który promuje powtarzalne przewozy całopociągowe (konieczność wcześniejszego zgłaszania planowanej organizacji przewozów). Natomiast przewozy rozproszone, w grupach wagonów lub pojedynczych wagonach, generują dodatkowe koszty związane np. z potrzebą wykorzystania stacji rozrządowych i manewrowych oraz wymagają zaangażowania większego potencjału własnego przewoźnika.

Należy jednak pamiętać, że wraz z rozwojem polskiej gospodarki w szybkim tempie będą rosły przewozy towarów wysoko przetworzonych. Jest to trend charakterystyczny dla uprzemysłowionych krajów rozwiniętych. Zwiększy się zapotrzebowanie na transport intermodalny i przewozy rozproszone. Dla realizacji nowych wyzwań niezbędna jest jednak dostępność nowoczesnych i efektywnie funkcjonujących obiektów infrastruktury kolejowej. W przeciwnym przypadku przyrost produkcji towarów wysoko przetworzonych zostanie przejęty przez transport samochodowy.

Analiza jakości usług realizowanych w punktowych obiektach infrastruktury kolejowej (przede wszystkim na stacjach rozrządowych i manewrowych, terminalach kontenerowych i centrach logistycznych) [6] oraz ocena ich stanu technicznego [6, 10, 13, 14] wskazują na pilną potrzebę uruchomienia procesów inwestycyjnych, obejmujących modernizację istniejących oraz budowę nowych obiektów. Jednocześnie substytucyjność przewozów pasażerskich sprawia, że coraz częściej kryterium wyboru środka transportu jest nie tylko cena przejazdu, ale także oczekiwania związane z czasem trwania podróży, punktualnością, bezpieczeństwem i komfortem jazdy. Wzrasta, potęgowane przez zjawisko kongestii, zapotrzebowanie klientów na efektywne połączenia kolejowe podmiejskie i regionalne, szybkie połączenia głównych miast kraju, a także rozwój przewozów międzynarodowych, konkurencyjnych z przewozami lotniczymi.

Cechy ekonomiczne obiektów infrastruktury sprawiają, że procesy inwestycyjne są przedsięwzięciem czasochłonnym i kosztownym, a ich efekty będą wpływały przez wiele lat na realizowane procesy transportowe. Dlatego wielkość i struktura tych obiektów, ich liczba i rozmieszczenie w systemie transportowym kraju, zakres wyposażenia w niezbędne środki techniczne oraz przewidywana organizacja pracy powinny być przedmiotem głębokiej analizy i oceny już na etapie wartościowania i projektowania.

Przygotowanie dokumentacji projektowej obiektów powinno zostać poprzedzone budową modeli zarówno obiektów, jak i realizowanych w nich procesów oraz wykonaniem symulacji, umożliwiających prześledzenie ich funkcjonowania przy różnych wartościach wielkości wejściowych i wzajemnych oddziaływaniach z innymi systemami. Efektem symulacji powinien być wybór najkorzystniejszego wariantu realizacji inwestycji, spełniającego przyjęte kryteria oceny.

Modelowanie i symulacja stacji rozrządowych i manewrowych powinny wskazać najlepszą, przy istniejących ograniczeniach, strukturę obiektu, liczbę torów i ich długość, wyposażenie w systemy automatycznego sterowania rozrządzaniem, liczbę niezbędnych lokomotyw manewrowych i pracowników, a także określić organizację pracy. W tym celu należy wykorzystać dostępne narzędzia modelowania i symulacji komputerowej. Przykładem może być opisany w kolejnych rozdziałach system *Villon*.

3. SPECYFIKACJA PROBLEMÓW

Można przyjąć, że podczas projektowania: stacji rozrządowych, stacji osobowych, bocznic przemysłowych, torów postojowych Zakładów Taboru lub terminali kontenerowych występują podobne klasy problemów decyzyjnych. Mówiąc ogólnie — projektowanie obiektów infrastruktury kolejowej wymaga odpowiedzi na pytanie „które składniki (np. tory, zwrotnice) są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania obiektu i w jaki sposób należy zintegrować te elementy, aby eksploatacja obiektu była opłacalna?”.

To pytanie jest istotne podczas realizacji planowania strategicznego (długoterminowego), a także przy próbie poprawy efektywności eksploatacji istniejącego obiektu. Planowanie strategiczne jest związane — na przykład — z realizacją następujących zadań:

- budowa nowego obiektu lub rozbudowa istniejącego,
- rekonstrukcja obiektu infrastruktury, która jest zwykle powiązana z modernizacją jego składników,
- rozbudowa infrastruktury z powodu wymaganego wzrostu jej pojemności lub redukcja infrastruktury z powodu zbyt dużej pojemności,
- koncentracja eksploatacji w nowoczesnie wyposażonym obiekcie i związane z tym zakończenie eksploatacji innych obiektów.

Potrzeba podjęcia działań na poziomie operacyjnym może się pojawić w następujących sytuacjach:

- 1) eksploatacja obiektu jest bardzo kosztowna lub pojemność infrastruktury nie jest wystarczająca, a poprawa wykorzystania torów, taboru, personelu lub procesu obróbki nie jest już możliwa;
- 2) w trakcie eksploatacji okazuje się, że infrastruktura jest nieodpowiednio zwymiarowana; na przykład niektóre fragmenty obiektu są wąskim gardłem lub są użytkowane bardzo rzadko.

Problem planowania obiektu infrastruktury dotyczy także optymalizacji konfiguracji jego elementów. Dla znalezienia konfiguracji optymalnej należy zdefiniować funkcję kryterium, a jest to zadanie bardzo trudne. Wystarczy wskazać przykładowe, często sprzeczne cele:

- 1) wielkość obiektu infrastruktury powinna być minimalna, ponieważ koszty inwestycji oraz koszty operacyjne są bardzo wysokie;
- 2) wielkość obiektu powinna zapewniać ciągłą eksploatację w godzinach szczytu;
- 3) konfiguracja elementów obiektu infrastruktury musi umożliwiać ich efektywne wykorzystywanie (bez wąskich gardeł, bez elementów bardzo rzadko użytkowanych);
- 4) konfiguracja obiektu infrastruktury powinna zapewniać odpowiednią rezerwę mocy przetwórczej w sytuacji krótkoterminowego lub długoterminowego wzrostu popytu na usługi przewozowe oraz w sytuacji stochastycznych zmian natężenia przewozów.

Podczas rozwiązywania problemu optymalnej konfiguracji elementów infrastruktury należy także pamiętać, że:

- realizacja przyjętego rozwiązania jest zwykle bardzo kosztowna, a wprowadzanie zmian w już zrealizowanej inwestycji — niemożliwe lub bardzo trudne,
- infrastruktura musi umożliwiać osiągnięcie założonych celów eksploatacyjnych (konfiguracja elementów infrastruktury jest prawidłowa, jeśli eksploatacja obiektu jest

- efektywna, czyli aby badać poprawność rozwiązań infrastruktury powinniśmy poddać szczegółowej analizie proces eksploatacji),
- eksploatacja obiektu infrastruktury transportowej jest bardzo skomplikowanym procesem, w którym występują złożone i często stochastyczne zależności między działaniami cząstkowymi.

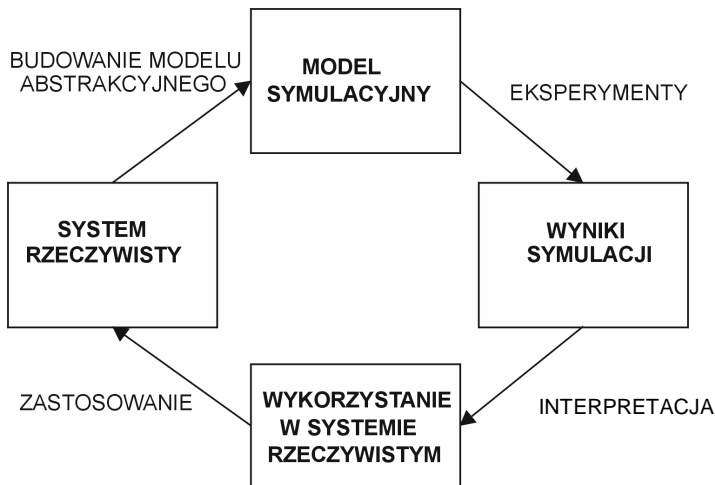
Ze względu na wspomnianą złożoność systemu i jego stochastyczne zachowania, stosowanie dokładnych metod matematycznych jest znacznie ograniczone. Jednocześnie w klasycznych metodach planowania ruchu kolejowego są wykorzystywane bardzo uproszczone modele eksploatacji, które nie uwzględniają stochastycznych zachowań systemu i nie umożliwiają prowadzenia badań niezależnych, dynamicznych procesów obróbki składów wagonów. Zamiast tego są wykorzystywane typowe lub średnie wartości różnych istotnych parametrów oraz praktyczna wiedza specjalistów. Często wynikiem takich rozwiązań są decyzje, które po ich realizacji i konfrontacji z rzeczywistą eksploatacją okazują się niewłaściwe.

Jak więc uzyskiwać poprawne rozwiązania takich problemów? Z powodu wyżej wymienionych trudności musimy rezygnować z poszukiwania dokładnych rozwiązań matematycznych, przyjmując do realizacji rozwiązania suboptymalne. Aby uzyskać takie rozwiązanie niezbędne są narzędzia, które uwzględniają złożoność infrastruktury i jednocześnie wspomagają podejmowanie jednoznacznych i właściwie uargumentowanych decyzji. Takim narzędziem może być *model symulacyjny* obiektu infrastruktury kolejowej, który jest komputerową namiastką obiektu rzeczywistego lub planowanego; model ten jest oparty na dokładnych danych, dotyczących infrastruktury oraz zawiera szczegółowo odwzorowane procesy eksploatacji. Model obiektu może być wykorzystywany jako „środowisko eksperymentalne” dla szczegółowego badania wybranych wariantów konfiguracji infrastruktury oraz wyboru i wdrażania rozwiązań umożliwiających w przyszłości ich efektywną eksploatację.

4. ZASTOSOWANIE PAKIETU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Symulacja komputerowa jest badaniem eksperymentalnym, wykonywanym na modelu komputerowym. Podczas badań system rzeczywisty jest zastępowany modelem symulacyjnym. Na takim modelu można przeprowadzać wiele eksperymentów, wykonywać ich ocenę i porównywania, znaleźć najlepszy spośród akceptowalnych wyników i zastosować wybrane rozwiązanie w systemie rzeczywistym. Nie są znane metody matematyczne, które umożliwiałyby eksperymentowanie z tak skomplikowanym systemem, jakim jest obiekt infrastruktury transportu. Nie są znane algorytmy, które umożliwiłyby zbadanie komputerowo, w ciągu kilku minut, skomplikowanych procesów, które w rzeczywistości trwają kilka dni lub tygodni. Symulacja jest bardzo dobrym narzędziem wspomagającym podejmowanie decyzji na różnych poziomach. Umożliwia przeprowadzenie analizy projektu i poszukiwanie dobrego rozwiązania dla systemu rzeczywistego.

Szukanie rozwiązania problemu za pomocą symulacji komputerowej składa się z trzech etapów (rys. 1):



Rys. 1. Zasady realizacji symulacji

- 1) budowanie modelu symulacyjnego;
- 2) eksperymentowanie z modelem;
- 3) interpretacja i wykorzystanie wyników symulacji.

Pakiet symulacyjny *Villon* umożliwia użytkownikowi (specjaliście w dziedzinie transportu) tworzenie modelu symulacyjnego obiektu infrastruktury i uruchamianie przygotowanych scenariuszy symulacji. Użytkownik posługuje się wyłącznie łatwym w obsłudze interfejsem i nie musi pisać specjalnego oprogramowania. Tworzenie modelu symulacyjnego wymaga odpowiedniego poziomu doświadczenia i wiedzy dotyczącej funkcjonowania poszczególnych gałęzi transportu. Jednak nawet mało doświadczony użytkownik może budować modele symulacyjne prostych systemów logistycznych w stosunkowo krótkim czasie.

Metody symulacyjne dysponują technikami, które umożliwiają optymalizację struktury oraz planowanie eksploatacji w obiektach infrastruktury transportu. Pakiet symulacyjny *Villon* umożliwia długo- i średnioterminowe planowanie, powiązane z analizą zmian infrastruktury i przebiegu jej eksploatacji. Analiza powinna gwarantować optymalne (albo przynajmniej efektywne) zachowanie modelowanego obiektu. *Villon* jest standardowym narzędziem symulacji, które umożliwia szczegółowe modelowanie różnych typów obiektów infrastruktury (stacji rozrządowych, stacji osobowych, bocznic, lotnisk itd.). Korzystając z tego pakietu, użytkownik może tworzyć szczegółowe modele procesów ruchowych, realizowanych w obiekcie, określać scenariusze symulacyjne, eksperymentować i szacować wyniki symulacji w jednym, scalonym środowisku.

W założeniach opracowanie tego narzędzia miało służyć do modelowania stacji rozrządowych. Obecnie pakiet symulacyjny *Villon*, dzięki elastyczności jego architektury i innym cennym właściwościom, umożliwia modelowanie różnych typów obiektów transportowych. Pozwala także przedstawiać wyniki w postaci animacji (format 2D lub

3D) dla wszystkich zakresów modelowania. Udostępnia bogaty zestaw narzędzi do szacowania wyników symulacji po zakończeniu jej realizacji (wliczając statystykę, protokół graficzny i inne elementy).

W porównaniu z innymi dostępnymi na rynku narzędziami symulacyjnymi, które są użytkowane do modelowania ruchu kolejowego (na przykład RASIM [3], *RailSys* [2] lub *OpenTrack* [11]), *Villon* oferuje swoim użytkownikom bardziej dokładne modelowanie i obrazowanie infrastruktury, szczegółowe modelowanie funkcjonowania zasobów (personelu, maszyn), a także umożliwia modelowanie ruchu kolejowego i drogowego w jednym modelu, tak aby móc badać wzajemne wpływy i zależności. Z drugiej strony — z powodu jego zastosowania do modelowania ruchu w obiektach typu punktowego — pakiet *Villon* nie jest przystosowany do modelowania rozległych sieci kolejowych oraz układania rozkładów jazdy.

5. STRUKTURA DANYCH MODELU SYMULACYJNEGO

Każdy model w pakiecie *Villon* składa się z danych modelu (*Model Data*), własności ruchowych (*Run Properties*) i scenariuszy realizacji (*Configurations*). Dane modelu są wprowadzane z uwzględnieniem ich hierarchii – najwyższy poziom danych jest wprowadzany jako pierwszy. Umożliwia to wykonanie początkowej walidacji wpisywanych danych i pozwala na ich właściwą edycję. Na przykład pakiet *Villon* sprawdza, czy tor wejściowy dla pociągu kończącego bieg, który jest definiowany na niższym poziomie (opisany rozkładem jazdy), znajduje się w danych dotyczących infrastruktury na liście torów typu „tor wejściowy”.

W części *Run Properties* modelu można zdefiniować atrybuty przebiegu symulacji — czas trwania, ustawienie animacji, wybór form zapisu wyników symulacji oraz wybór rodzaju współpracy użytkownik—model.

Użytkownik może stworzyć wiele wariantów każdego rodzaju danych (kilka wersji infrastruktury, harmonogramów pracy personelu, rozkładów jazdy, składów pociągów, schematów sortowania wagonów itd.). Scenariusz symulacji jest tworzony przez wybór jednego wariantu każdego rodzaju danych. Taki scenariusz ma swoją specyficzną nazwę i może być przechowywany w bazie scenariuszy (konfiguracji).

6. TWORZENIE MODELU SYMULACYJNEGO

6.1. Uwagi wstępne

Tworzenie modelu symulacyjnego składa się z dwóch faz. W ramach pierwszej fazy są definiowane wstępne dane o modelowanym systemie. Przebieg definiowania danych wstępnych dla modelu symulacyjnego złożonego systemu logistycznego nie może być pomyślnie zrealizowany bez właściwego przygotowania danych opisujących modelowa-

ny system rzeczywisty. Na podstawie analizy struktury wewnętrznej systemu można podzielić niezbędne dane na trzy główne kategorie — zasoby (infrastruktura, personel, lokomotywy), klienci (pociągi, wagony) oraz ruch (usługi wykonawcze, obróbka składów).

Drugą fazą jest strojenie modelu. Przebieg definiowania danych wstępnych i strojenia modelu symulacyjnego wyjaśniono na przykładzie modelu stacji rozrządowej *Bratislava vychod* w opracowaniu [8].

6.2. Zasoby

Zasoby są istotnymi składnikami funkcjonującego obiektu infrastruktury i wymagają specjalnej uwagi podczas modelowania.

Model infrastruktury jest tworzony bezpośrednio na podstawie mapy (planu) obiektu, która jest dostępna w formie papierowej lub elektronicznej. Dzięki wykorzystaniu dokładnego (a nie uproszczonego — schematycznego) modelu infrastruktury można uniknąć zniekształceń spowodowanych niedokładnością map schematycznych. W przypadku stacji rozrządowej *Bratislava vychod* wykorzystano obie formy (dwie trzecie map miało formę elektroniczną, pozostałe były skanowane z mapy papierowej). W takim przypadku było niezbędne połączenie obu rodzajów map i skorzystanie z programu AutoCAD, celem przygotowania cyfrowego pliku (DXF), który może być użyty w pakiecie symulacyjnym *Villon*. Następnie układ stacji rozrządowej był wprowadzony do programu *Villon*, z uwzględnieniem poziomu fizycznego modelu infrastruktury. Na tym poziomie nie jest możliwe wprowadzanie opisu typu torów lub innych elementów infrastruktury. Pojęcie „typu” jest związane z informacją o przeznaczeniu każdego składnika infrastruktury. Na przykład w modelu stacji rozrządowej jest definiowany typ toru: tor grupy przyjazdowej, tor na górcie, tor kierunkowy. Informacje te są niezbędne w dalszym etapie tworzenia modelu symulacyjnego, zwłaszcza podczas układania harmonogramu obróbki składów oraz przebiegu realizacji procesów technologicznych, zgodnie z tym harmonogramem. Przykładowo, dla operacji „dojazd lokomotywy manewrowej na tor kierunkowy” należy zdefiniować typ toru, który będzie wykorzystywany na dojazd lokomotywy. Informacje dotyczące „typu” są przydzielane torom i innym elementom systemu przez twórcę modelu symulacyjnego, na podstawie rozpoznania infrastruktury rzeczywistej.

W kolejnym kroku następuje określenie dróg przebiegu, które będą wykorzystywane przez pociągi do ich przemieszczania. Określenie dróg przebiegu uwzględnia rzeczywiste możliwości obiektu infrastruktury.

Środki ruchome (personel, lokomotywy) są modelowane indywidualnie, z uwzględnieniem ich godzin pracy, typów, realizowanych zadań oraz innych własności. Na przykład w modelu stacji rozrządowej *Bratislava vychod* są uwzględnione lokomotywy manewrowe, pracujące na górcie i lokomotywy manewrowe służące do przemieszczania wagonów pomiędzy grupą kierunkową i grupą odjazdową. Często nie ma potrzeby uwzględniania w modelu typów wszystkich elementów stacji rozrządowej, a wykorzystywane są tylko te typy, które służą do obsługi pociągów w grupie przyjazdowej i grupie odjazdowej.

6.3. Klienci

Dane o klientach (pociągach) są opisane w formie rozkładu jazdy, z możliwością modyfikacji prawdopodobieństwa wystąpienia odpowiednich wartości jego atrybutów (czas przyjazdu, ładunek, skład, kolejność grup wagonów itd.). Rozkład jazdy może być importowany z pliku XLS (szereg obiektów infrastruktury kolejowej ma system informacyjny, z którego można eksportować dane w tym formacie), dzięki czemu czas wprowadzania danych jest krótszy.

Dla modelu stacji rozrządowej dane były pobierane z systemu PIS (system informacyjny nadzorowania eksploatacji ŽSR). Źródłem pozostałych danych o pociągach i grupach wagonów był plan generalny zestawiania pociągów towarowych. Przed wprowadzeniem wszystkie dane były kontrolowane przez pracowników stacji rozrządowej. W ten sposób zdefiniowano około 70 pociągów przyjmowanych w grupie przyjazdowej i 50 pociągów wyprawianych w grupie odjazdowej w ciągu jednego dnia.

6.4. Eksploatacja — ruch

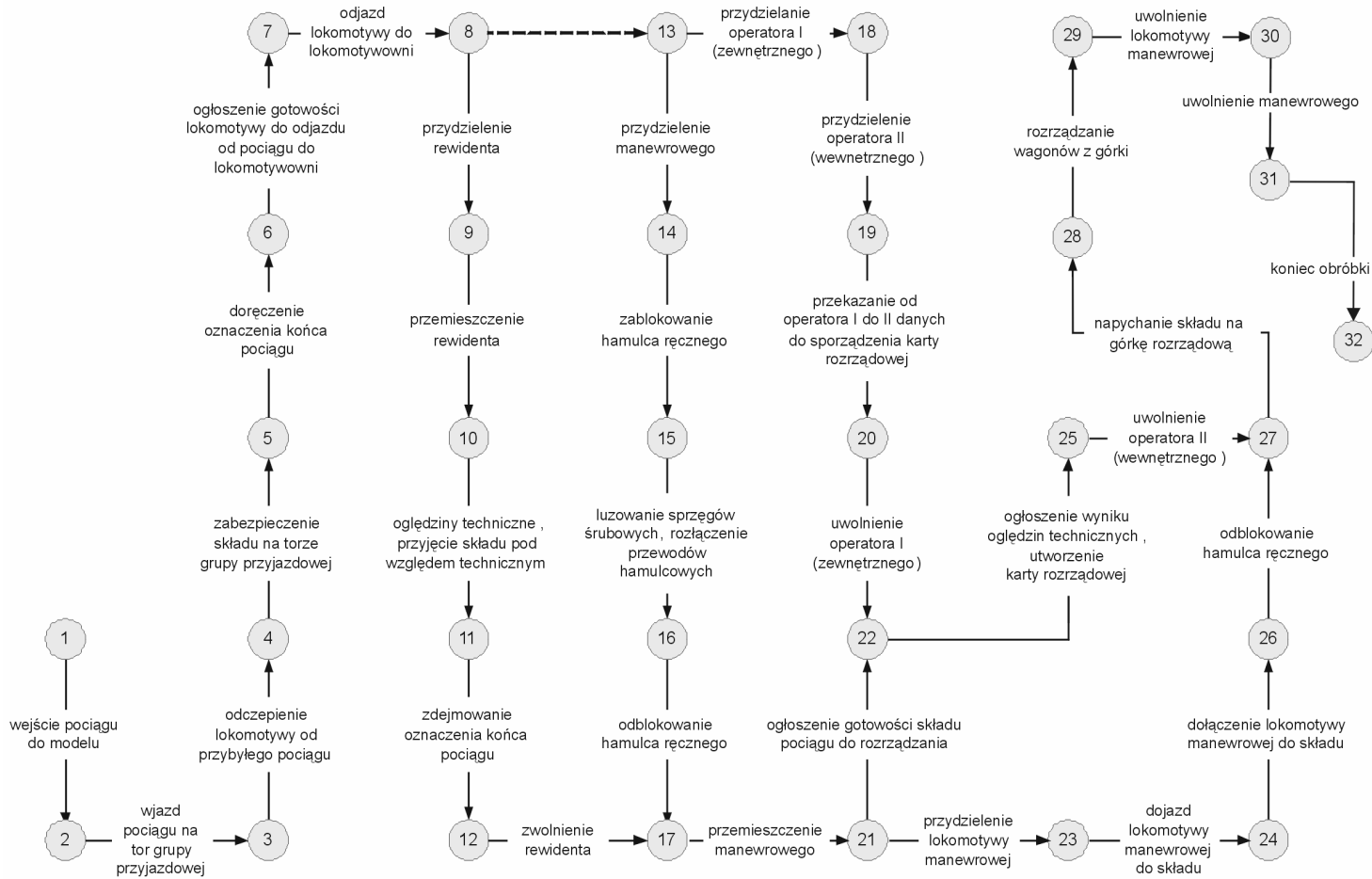
Głównym procesem eksploatacji w obiektach infrastruktury transportu (tak jak i w wielu innych obiektach) jest obsługa klientów wchodzących do systemu. Ponieważ pakiet *Villon*, jest narzędziem umożliwiającym modelowanie różnych obiektów transportowych, nie uwzględnia on etapu przygotowania procedury obróbki składów. Niezbędne jest zatem przygotowanie dokładnego „programu” opisującego proces obsługi klientów. W przypadku pakietu *Villon*, „program” jest zapisywany w formie schematu blokowego przez użytkownika podczas tworzenia modelu (rys. 2). Schematy blokowe opisują ciąg czynności, które odpowiadają poszczególnym etapom obsługi składu pociągu.

Czynności obsługowe są opisywane zbiorem parametrów, które pozwalają na zdefiniowanie czasu ich trwania czy też na przykład wskazują, z których typów torów może korzystać lokomotywa w celu przemieszczania się z górki rozrządowej na tor grupy przyjazdowej. Każda zdefiniowana czynność może być podzielona na wiele różnych schematów blokowych obróbki składów. Schematy blokowe są tworzone z wykorzystaniem wygodnego edytora graficznego, z wbudowaną funkcją automatycznej walidacji. Gotowy schemat blokowy może być wykorzystywany do modelowania obsługi różnych klientów (wagony, lokomotywy, pociągi), w przypadku takiego samego procesu obróbki. W modelu stacji rozrządowej *Bratislava vychod* należało utworzyć 20 schematów dla pociągów kończących bieg i ponad 20 schematów blokowych dla pociągów odjeżdżających ze stacji. Jeden schemat blokowy miał około 35 wierzchołków i 50 gałęzi. Ponieważ wszystkie pociągi wjeżdżające po tym samym torze wejściowym są obsługiwane w jednakowy sposób, jeden schemat blokowy może być wykorzystywany wielokrotnie.

Inne procesy, które można modelować wykorzystując pakiet *Villon*, to na przykład wymiana grup wagonów między pociągami, sortowanie uzupełniające, obróbka wagonów wymagających specjalnej obsługi (na przykład wagonów, które nie mogą przejeżdżać przez górkę rozrządową).

Podczas definiowania danych niezbędnych dla opisu procesów obróbki, wymiany grup wagonów, ich sortowania itd., następuje jednoczesne definiowanie reguł sterowania ruchem w modelowanym obiekcie infrastruktury.

Rys. 2. Przykład schematu blokowego obsługi klienta (dla stacji rozrządowej Bratislava východ)



W przypadku stacji rozrządowej są to ogólne reguły przydzielania torów w grupie przyjazdowej dla poszczególnych pociągów, reguły dotyczące gromadzenia wagonów w torach kierunkowych, reguły wykorzystania lokomotyw manewrowych itp.

6.5. Strojenie modelu symulacyjnego

W zbudowanym modelu symulacyjnym (po ukończeniu definiowania danych) występuje jeszcze wiele ukrytych kolizji, mimo tego, że znaczna część problemów, które mogą powstać podczas przebiegu symulacji sterowania ruchem, jest rozwiązywana automatycznie przez wbudowane algorytmy oraz wykrywana dzięki hierarchicznej architekturze programu. Aby umożliwić przeprowadzenie symulacji ruchu pojazdów w przyjętym przedziale czasu, niezbędne jest odpowiednie dostrojenie modelu.

Ta faza budowania modelu zostanie omówiona na przykładzie przyjazdu pociągów kończących bieg na tory grupy przyjazdowej i rozrządzania tych pociągów.

Podczas definiowania danych o pociągach kończących bieg (co jest realizowane w ramach fazy opisanej w poprzednim rozdziale), takich jak: rozkład jazdy, kolejność wagonów, wykorzystywane lokomotywy, rodzaj obróbki, do każdego pociągu przypisywana jest informacja dotycząca toru, na którym pociąg będzie kończył swój bieg (typ — „tor przyjęcia”); z tego wynika, jakie drogi przebiegu należy przygotować. W grupie przyjazdowej stacji rozrządowej *Bratislava vychod* pociągi kończące bieg mają do dyspozycji trzynaście torów. Przy definiowaniu dróg przebiegu dla przyjazdu do tej grupy użytkownik może przyjąć, że względu na rzeczywiste warunki miejscowe, że jedna połowa torów będzie przeznaczona dla pociągów przyjeżdżających do stacji rozrządowej z północy i wschodu, a druga — dla pociągów z południa i zachodu. Użytkownik może także wcześniej zdefiniować kolejność zajmowania pojedynczych torów. Na przykład kolejność 701, 702, 703 oznacza, że jeśli wszystkie trzy tory są wolne, to jako pierwszy będzie przydzielany dla pociągu tor 701, a w przypadku gdy ten tor jest już zajęty, program przydziela tor 702 itd. Inne możliwe kolejności zajmowania wybranych torów grupy przyjazdowej to na przykład: 703, 702, 701 lub 701, 703, 702.

Możemy przyjąć (w ramach fazy budowania modelu), że lokomotywy manewrowe na górcie będą rozrządzały składy wagonów przemiennie z jednej i drugiej połowy grupy torów.

Przyjętą zasadę zajmowania torów grupy przyjazdowej i rozrządzania składów kończących bieg można stosować tylko przy zwykłym ruchu i średnim wykorzystaniu torów. W godzinach szczytu taka zasada może być niewystarczająca. W ten sposób mogą powstawać wzajemne sprzeczności wcześniej zdefiniowanych reguł postępowania i niezbędne będzie ich rozwiązywanie drogą interwencji użytkownika, czyli twórcy modelu symulacyjnego. Podczas godzin szczytu może na przykład dojść do sytuacji, gdy na jedną połowę torów grupy przyjazdowej będzie przybywać więcej pociągów niż na drugą. Oznacza to, że z jednej połowy grupy przyjazdowej należy częściej wprowadzać składy wagonów na górkę. Gdyby użytkownik pozwalał rozwiązywać taką sytuację automatycznie, symulacja zakończyłaby się przedwcześnie z powodu braku torów przyjęcia w intensywniej użytkowanej połowie grupy przyjazdowej. Użytkownik ma w takiej sytuacji dwie możliwości. Pierwsza, to pozwolić na tymczasowe użytkowanie mniej obciążonej połowy torów grupy przyjazdowej przez pociągi z drugiej połowy. Druga

możliwością jest tymczasowa zmiana reguły przydzielania lokomotyw rozrządzających składy wagonów kończące bieg.

Podobne kolizje między wcześniej zdefiniowanymi regułami sterowania ruchem mogą się pojawiać także podczas przemieszczania składów wagonów między grupą kierunkową a grupą odjazdową, podczas przydzielania lokomotyw manewrowych do przemieszczania tych składów, przy zajmowaniu toru definiowanego większą liczbą typów (jeden tor może być jednocześnie definiowany jako „tor przyjęcia”, „tor tranzytowy”, „tor połączeniowy dla przejazdu lokomotywy do lokomotywowni” itd.).

Podczas rozwiązywania tych i innych podobnych sytuacji kolizyjnych twórca modelu symulacyjnego musi się wcielić w rolę dyspozytora ruchu obiektu infrastruktury. Aby zabezpieczyć ciągłą realizację procesów ruchowych, musi umieć rozwiązywać konkretne sytuacje kolizyjne. Wykaz takich sytuacji może być też cennym źródłem informacji o kolizjach i metodach ich rozwiązywania dla pracowników sterujących ruchem w rzeczywistym systemie.

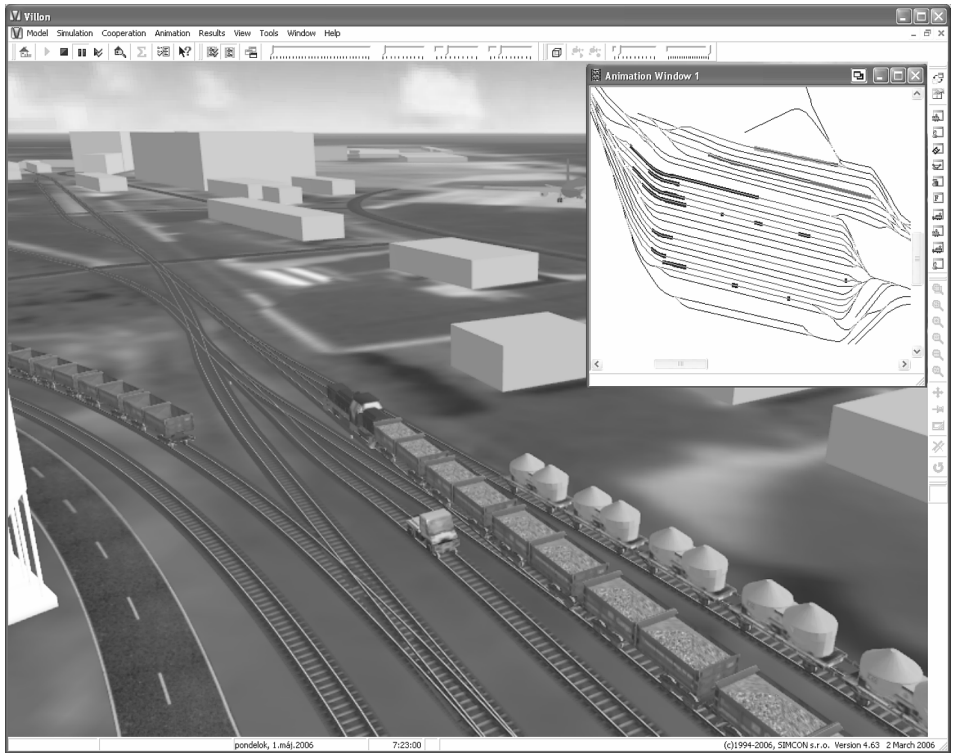
Faza strojenia modelu symulacyjnego wymaga udziału doświadczonego technologa w dziedzinie transportu. Twórca modelu może oczywiście rozwiązywać wszystkie zaobserwowane sytuacje kolizyjne wyłącznie w ramach obowiązujących przepisów i zasad prowadzenia ruchu oraz ogólnych i miejscowych instrukcji sterowania ruchem i obróbki składów w modelowanym obiekcie. Dlatego niezbędna jest bezpośrednia współpraca twórcy modelu i uprawnionych pracowników obiektu.

Jedną z przewag programu symulacyjnego *Villon* nad innymi, podobnymi pakietami jest możliwość obserwowania, dzięki wykorzystaniu animacji 2D lub 3D, wpływu pojedynczych zmian wprowadzanych w fazie strojenia modelu na redukowanie sytuacji kolizyjnych podczas przebiegu symulacji. Oznacza to, że użytkownik nie musi obserwować przebiegu całej symulacji, aby odnaleźć w uzyskanych danych wyjściowych przyczynę jej niepowodzenia.

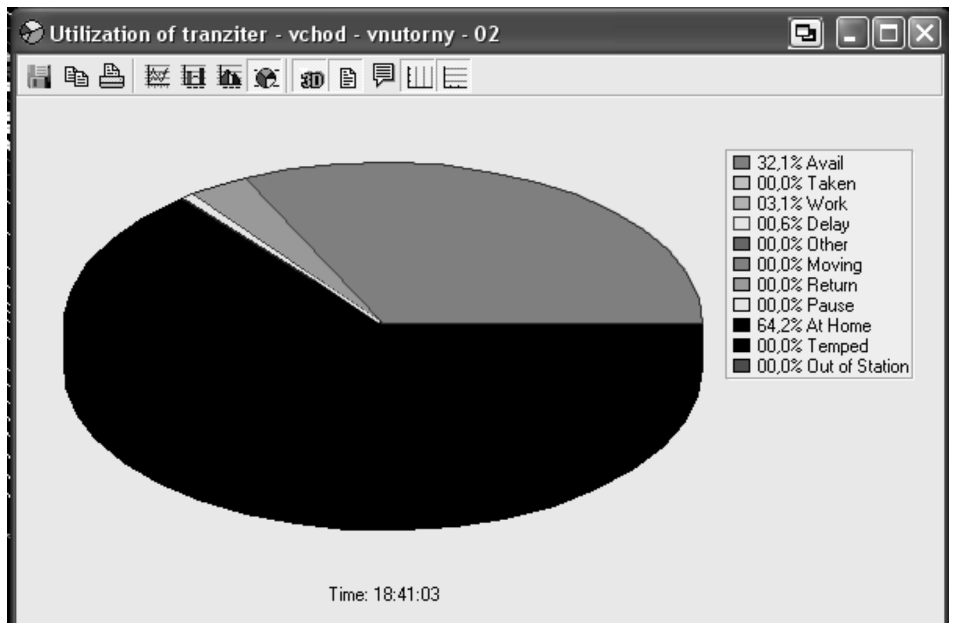
7. PRZEBIEG SYMULACJI — OCENA I WYKORZYSTANIE WYNIKÓW

Po zdefiniowaniu wszystkich niezbędnych danych oraz wybraniu scenariusza można rozpocząć symulację. Animacja umożliwia prezentację wszystkich przemieszczanych wagonów, pociągów i lokomotyw. Użytkownik może wybierać między widokami 2D i 3D (rys. 3). Animację można obserwować w jednym lub kilku oknach jednocześnie. Istnieje możliwość wykorzystania funkcji „zoom” oraz dowolnego przemieszczania okien na ekranie, zgodnie z potrzebami użytkownika.

Niektóre informacje — na przykład nazwa bieżącego scenariusza symulacji, czas symulacji, numer, stan (wolny/zajęty) i długość toru oraz numer pociągu — można obserwować bezpośrednio na pasku stanu. Wielkości dotyczą toru, na który użytkownik wskazuje kursorem myszy. Dalsze informacje o aktualnym stanie systemu można uzyskać w formie tablicy (na przykład wykaz wagonów w pociągu) lub wykresu (na przykład aktualne informacje o średnim wykorzystaniu lokomotywy manewrowej) w niezależnych oknach. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe informacje dotyczące wykorzystania personelu oraz aktualnej dostępności zasobów.



Rys. 3. Widok animacji 2D i 3D w pakiecie Villon



Rys. 4. Widok informacji o wykorzystaniu personelu

informacji można kontynuować symulację. Oczywiście, przebieg symulacji można także zakończyć przed planowanym terminem.

W trakcie realizacji symulacji użytkownik może badać rzeczywisty przebieg zmian wartości wybranych wielkości wykorzystując obraz graficzny (na przykład analizować zaangażowanie personelu lub zmiany wskaźnika wykorzystania wybranej lokomotywy). Innym rodzajem danych wyjściowych są ogólne informacje dostępne po zakończeniu symulacji. Podczas realizacji symulacji powstają szczegółowe informacje o zmianach wartości wszystkich parametrów infrastruktury, zasobów i klientów modelu. Zapisy te mogą być badane oddzielnie, możliwe jest także przeszukiwanie baz danych. Obok formy graficznej wyników symulacji, w której są pokazywane raporty o wykorzystaniu zasobów, czasach oczekiwania itd. (rys. 6), są także dostępne różne statystyki przedstawiane w formie tablic, grafów i wykresów. Dane statystyczne można uzyskiwać na podstawie przygotowanej wcześniej palety typów danych. Paleta umożliwia dodawanie nowych typów, zgodnie z potrzebami użytkownika.

Pakiet symulacyjny *Villon* umożliwia także eksportowanie wszystkich gromadzonych informacji w pliku XLS do dalszej ich analizy w programie kalkulacyjnym.

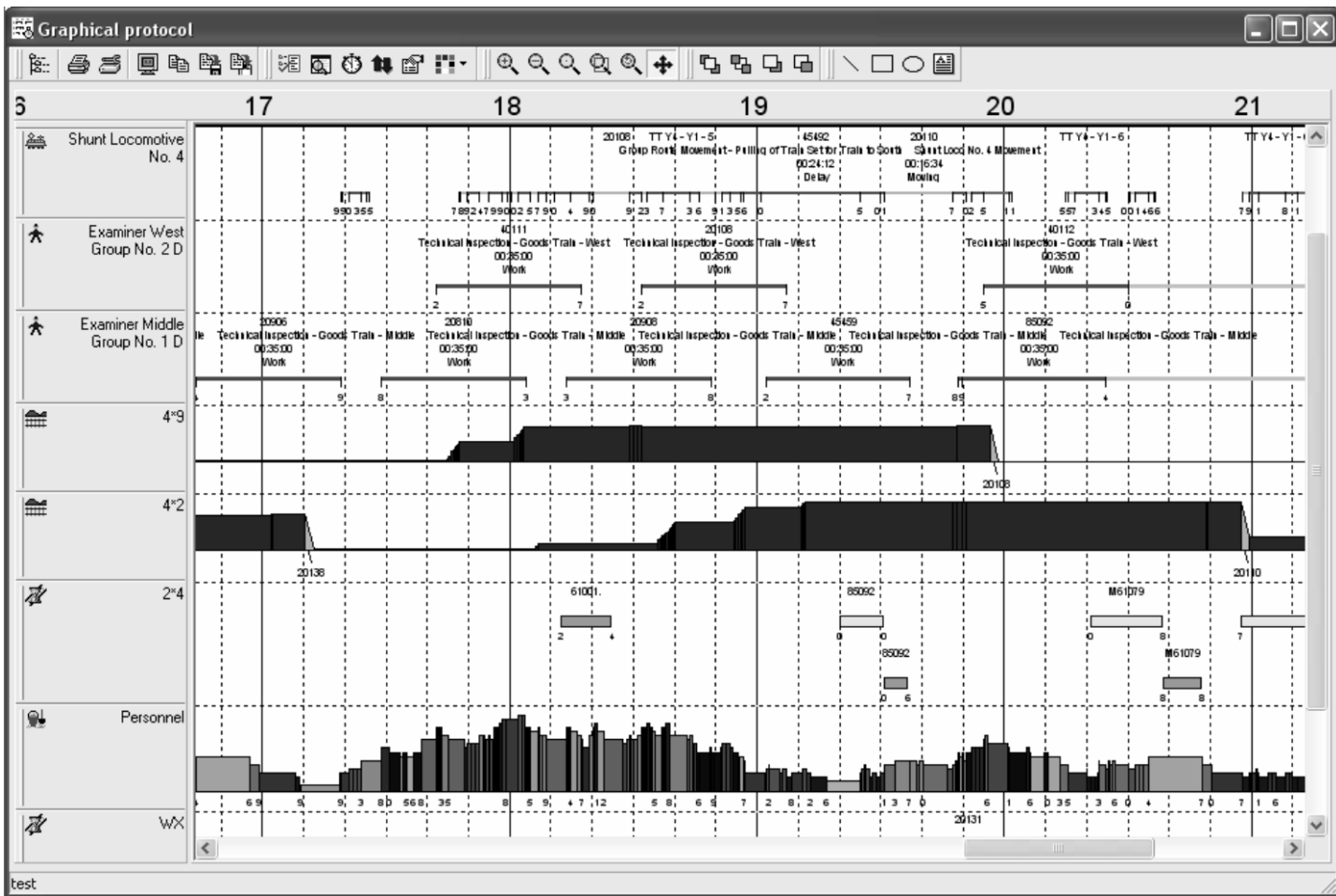
Bardzo ważną cechą pakietu *Villon* jest możliwość tworzenia wersji specjalnej *Viewer*, dzięki której użytkownik (na przykład właściciel modelowanego obiektu) może uruchamiać symulację przygotowywaną przez twórcę modelu oraz wykorzystywać pełną skalę możliwości realizacji badań symulacyjnych metodą „run-time” i „post-run”. Oczywiście w wersji *Viewer* nie można zmieniać danych w modelu, ponieważ mogłoby to spowodować nieprzewidywalne konsekwencje.

8. ZAKOŃCZENIE

Jednym z priorytetów przyjętej przez polski rząd *Strategii Rozwoju Kraju 2007—2015* [9] jest poprawa stanu infrastruktury technicznej i społecznej, obejmująca kształtowanie warunków dla rozwoju inwestycji w infrastrukturę transportową, energetyczną, ochronę środowiska i budownictwo mieszkaniowe. Wskazuje się w niej na potrzebę zwiększenia udziału kolei w przewozach pasażerskich i towarowych, zapowiadając między innymi:

- stymulowanie przenoszenia, niebezpiecznego dla ludzi i środowiska, ciężkiego ruchu z dróg na kolej,
- wspieranie inwestycji w infrastrukturę transportu intermodalnego,
- budowę i modernizację ogólnodostępnych centrów logistycznych, terminali kontenerowych na liniach kolejowych i w portach.

Realizacja wskazanych działań jest niezwykle istotna zarówno dla poszczególnych regionów, jak też dla całego kraju. Przewozy towarowe są w zbyt dużym stopniu realizowane przez transport drogowy. Jest to powodowane przede wszystkim niedostatecznym rozwojem przewozów intermodalnych, a także zbyt długim czasem transportu ładunków w wagonach pojedynczych lub grupach wagonów, na co ma wpływ zły stan linii kolejowych oraz punktowych elementów infrastruktury. Dlatego w Narodowych Strategicznych Ramach Odniesienia na lata 2007—2013 (NSRO) [12] zapowiedziano promowanie inwestycji w infrastrukturę transportu intermodalnego oraz systemu informatycz-



Rys. 6. Przykład raportu z zależnościami czasową (wykorzystanie lokomotywy manewrowej, personelu, torów kierunkowych, czas oczekiwania na wolny tor, liczba pracowników aktywnych)

ne i łączności, umożliwiające wykorzystanie nowoczesnych technologii w dziedzinie transportu. Działania takie mają sprzyjać odciążeniu dróg oraz ograniczeniu negatywnego oddziaływania transportu drogowego na środowisko naturalne.

Poziom jakościowy usług realizowanych w obiektach infrastruktury kolejowej sieci PKP PLK S.A. nie sprzyja rozwojowi przewozów towarowych, a także pasażerskich. Szczególnie, że obiekty te są często punktami styku transportu kolejowego z innymi systemami przewozowymi oraz z otoczeniem. W ostatnich dziesięciu latach udział przewozów intermodalnych w transporcie kolejowym wzrósł co prawda ponad trzykrotnie, ale stanowią one nadal marginalną część przewozów wykonywanych koleją [12]. Także sieć terminali kontenerowych i centrów logistycznych jest zbyt mała w stosunku do potrzeb. Negatywnie jest oceniana zarówno liczba jak i poziom wyposażenia obiektów infrastruktury wykorzystywanych w transporcie intermodalnym, a także służących funkcjonowaniu centrów logistycznych. Jednocześnie badania wykazują, iż właśnie powstawanie centrów logistycznych skutecznie wspiera rozwój transportu intermodalnego [16].

Rozwój transportu intermodalnego powinien obejmować przede wszystkim budowę i modernizację ogólnodostępnych terminali kontenerowych na liniach kolejowych i w portach morskich, budowę i modernizację ogólnodostępnych centrów logistycznych, a także integrację obiektów już istniejących.

Wzrost potoków ładunków, zły stan dróg oraz wysokie, niewzględnie dotychczas koszty zewnętrzne transportu samochodowego (w tym znaczne zanieczyszczenie środowiska) wskazują na potrzebę efektywnego wykorzystania istniejącego potencjału infrastruktury kolejowej oraz konieczność jej modernizacji i rozbudowy. Dlatego niezbędne jest podejmowanie działań zmierzających do podnoszenia atrakcyjności przewozów kolejowych, w szczególności w pojedynczych wagonach i grupach wagonów, racjonalizacji procesów przewozowych oraz przeciwdziałania marginalizacji transportu kolejowego. Temu celowi ma służyć modernizacja obiektów infrastruktury.

Przedstawiony w artykule pakiet *Villon* był wykorzystywany komercyjnie w ramach badań symulacyjnych stacji rozrządowych w Austrii (*Wien Zvbf, Linz Ost Vbf*), Niemczech (*Hamburg Alte Süderelbe, Oberhausen-Osterfeld*), Szwajcarii (*Basel RB, Lausanne Triage*) i Chinach (*Mudanjiang, Harbin*). Inne aplikacje pakietu były wykorzystywane na przykład przy badaniu nowego projektu stacji postojowej w *Ulm* (Niemcy), sprawdzaniu przebiegu procesu eksploatacji stacji osobowej *Praha Masarykovo nádraží* (Czechy), badaniu wzajemnego oddziaływania wewnętrznego transportu drogowego i kolejowego fabryki *Volkswagen Bratislava* (Słowacja), ocenie infrastruktury kolejowej fabryki chemicznej *BASF Ludwigshafen* (Niemcy), a także badaniu wewnętrznego ruchu kolejowego w fabryce papieru *SCA Laakirchen* (Austria) oraz stalowni *Voest Alpine Linz* (Austria) i *Teeside Cast Products Middleborough* (Wielka Brytania).

Duże projekty inwestycyjne w obszarze transportu, przy obecnym poziomie informatyki i rozwoju metod symulacji, nie mogą być przyjmowane do realizacji bez wykonania odpowiednich badań z wykorzystaniem modeli. Program *Villon* umożliwia: dokładne i kompleksowe modelowanie rozległych obiektów infrastruktury transportu, prezentowanie wyników symulacji, wybór najlepszych rozwiązań, zapewniających racjonalne wykorzystywanie dostępnych środków finansowych.

Ogólny charakter pakietu symulacyjnego *Villon* przynosi istotną korzyść: zbudowany, sprawdzony i poddany walidacji model konkretnego obiektu może być wykorzystywany wielokrotnie do różnych badań. Na przykład ten sam model może z jednej strony służyć do poszukiwania efektywnych metod rekonstrukcji obiektu, z drugiej — może być wykorzystywany w trakcie różnych faz jego bieżącej modernizacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Antonowicz M. i in.: Ocena funkcjonowania rynku transportu kolejowego w Polsce za rok 2006. *Transport i komunikacja*, 2007, nr 2.
2. Bendfeldt J.P., Mohr U., Müller, L.: RailSys, a system to plan future railway needs. *Computers in Railways VII*, WIT Press, 2000, ISBN 1-85312-826-0.
3. HaCon: RASIM — Simulation system for the analysis and planning of railway systems, http://www.hacon.de/rasim_e/index.shtml
4. Hajdul M.: Przebudowa systemu transportowego z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych oraz wielokryterialnego wspomaganie decyzji. *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej*. Transport z. 60. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2007.
5. http://ec.europa.eu/transport/white_paper/consultations/index_en.htm
6. Janecki R.: Logika wykorzystania stacji manewrowych, rozrządowych i centrów logistycznych na sieci kolejowej w Polsce. Materiały konferencyjne Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne problemy dotyczące funkcjonowania górek rozrządowych na sieci kolejowej”. Tarnowskie Góry—Zawiercie 2007.
7. Kompendium wiedzy o logistyce. Red. *Gołemska E.* PWN Warszawa—Poznań 1999.
8. Márton P.: Computer simulation of freight train formation in Bratislava vychod marshalling yard, in: Proceedings of the international conference of computer aided science, industry and transport. Radom University of Technology, 2006, pp. 539—542, ISSN 1230-7823.
9. Ministerstwo Rozwoju Regionalnego. Strategia Rozwoju Kraju 2007—2015. Warszawa 2006.
10. Moczarski J.: Kolejowe priorytety badawcze w strategii rozwoju kraju. Materiały konferencyjne Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne problemy dotyczące funkcjonowania górek rozrządowych na sieci kolejowej”. Tarnowskie Góry—Zawiercie 2007.
11. Nash A., Hürlimann D.: Railroad Simulation using OpenTrack. *Computers in Railways IX*, pp. 45—54, WIT Press, 2004, ISBN 1-85312-715-9.
12. Narodowe Strategiczne ramy odniesienia. Narodowa Strategia Spójności. Ministerstwo Rozwoju Regionalnego. Warszawa 2007.
13. Nowosielski L.: Polska polityka transportowa nie sprzyja rozwojowi kolei. *Przegląd Komunikacyjny*, 2007, nr 8.
14. Raport końcowy z realizacji Projektu Celowego 6T12 056 2001 C/5503 „Inteligentny system regulacji prędkości odpręgów z oddziaływaniem punktowym dla stacji rozrządowych, manewrowych i bocznic kolejowych”, Warszawa—Kańczuga 2005. Kierownik Projektu — J. Moczarski.
15. Technologie transportowe XXI wieku. Red.: *Mindur L.*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji — PIB, Warszawa—Radom 2008.
16. Uwarunkowania rozwoju systemu transportowego Polski. Red.: *Liberadzki B., Mindur L.* Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji — PIB, Radom 2007.

Artykuł powstał przy wsparciu Słowackiej fundacji ds. grantów, w ramach grantu nr 1-4057-07.

This work has been supported by the Slovak grant foundation under grant No. 1-4057-07.