

# **Interaktive Modellierung, Simulation und Prozessführung in einer parallelen problemorientierten Simulationsumgebung**

A. Masjuk\*, O. Smagin, V. Svjatnyj  
Fakultät für Rechengenie und Informatik (FRTI)  
Nationale Technische Universität Donezk, Artemstr. 58, 83000 Donezk, Ukraine

H.-J. Bungartz  
Institut für Informatik, Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Wissenschaftliches  
Rechnen, Technische Universität München, Boltzmannstr.3, D-85748 Garching,  
Deutschland

## **Kurzfassung**

Modellgestützte Entwicklung von Automatisierungssystemen für komplexe dynamischen Objekte wird in letzten Zeit mit der Anwendung paralleler Rechnerressourcen durchgeführt. Die problemorientierte parallele Simulationsumgebung (PSU) stellt eine neue Systemorganisation der Modellierung und Simulation in der parallelen Simulationstechnik dar. Im Beitrag werden die PSU-Subsysteme, die Aufgaben der rechnergestützten parallelen Modellierung und Simulation sowie Algorithmen für die sicherheitsbedingte interaktive Prozessführung von Grubenbewetterungsnetzen als komplexe Automatisierungsobjekte betrachtet.

## **1 Einleitung**

Grubenbewetterungsnetze (GBN) gehören zu denjenigen komplexen sicherheitskritischen Objekten, deren Luftströme abhängig von Methankonzentrationen gesteuert werden. Die formale GBN-Beschreibung beinhaltet eine durch einen Graphen  $G(V,U)$  dargestellte Topologie mit  $|V|=m$  Kanten und  $|U|=n$  Knoten sowie in Matrix-Vektor-Form dargestellte Systeme differential-algebraischer Gleichungen für Luftstromverteilung, gasdynamische Prozesse und im Netz hierarchisch verteilte Luftstromregler. Dieses Modell stellt mit ausreichender Genauigkeit ein GBN als mehrfaches Objekt mit konzentrierten Parametern dar und wird in unserer, speziell für die modellgestützte Entwicklung von Automatisierungssystemen der Grubenbewetterung konzipierten, problemorientierten parallelen Simulationsumgebung (PSU) eingesetzt. Im Beitrag werden aktuelle Fragen der interaktiven Modellierung und Simulation sowie der sicherheitsbedingten, vom Personal kontrollierten Prozessführung in den GBN diskutiert.

---

\* A. Masjuk und O. Smagin waren als Leonhardt-Euler-Stipendiaten am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (ISR, Prof.Dr.-Ing. E.D. Gilles, Prof.Dr.-Ing. M. Zeitz) und am Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS, Prof.Dr. H.-J. Bungartz, Prof.Dr. K. Rothermel) im Rahmen des Kooperationsvertrags der Universität Stuttgart mit der NTU Donezk

## 2. Die Subsysteme der GBN-orientierten parallelen Simulationsumgebung

Die verteilte parallele Simulationsumgebung [1] wird für Entwicklungszwecke in eine Reihe von Subsystemen zerlegt. Die Fokussierung der PSU auf die Lösung von sicherheitstechnischen Problemen und Automatisierungsproblemen von Grubenbewetterungsnetzen wird durch die weitere Dekomposition auf folgende, dem Simulationsproblem funktionell entsprechende Subsysteme erreicht:

- **Dialogsystem mit hoch entwickelter Bedienoberfläche**, das folgende Funktionen erfüllt: Darstellung der Simulationsumgebung; Integration mit anderen Subsystemen und PSU-Systemsoftware; visuelle Erstellung, Korrektur und Erprobung von GBN-Modellen; Eingabe der Parameter für die geplanten Simulationsexperimente; Visualisierung von Simulationsabläufen und Prozessführungen; Einführung der Domänenexperten in die Simulationsabläufe; Realisierung des Trainingssimulators für Experten, die mit sicherheitstechnischen Aufgaben der Grubenbewetterung befasst sind;

- **Modellierungssystem** mit interaktiver Datenaufbereitung, Topologieanalyse, Generierung der Gleichungen von luft- und gasdynamischen Prozessen in Form der Simulationsmodelle sowie Datenaustausch zwischen den Arbeitsplätzen und den Parallelressourcen;

- **Simulationssystem** mit den Funktionen des Lösen von Gleichungssystemen mit den zeitabhängigen Parametern des Echtzeitproblems und des Informationsaustausches mit der Bedienoberfläche;

- **Prozessführungssystem**, das die Algorithmen der automatisierten und automatischen Steuerung mit der Optimierung der Luftverteilung, der Prozessüberwachung und Sicherheitsvorhersage sowie dem Erkennen sicherheitskritischer Situationen realisiert.

Für alle obigen Subsysteme wurden die erforderlichen Funktionsalgorithmen entwickelt und simuliert.

## 3 Modell des Automatisierungssystems (AS)

Die formale Modelldarstellung des GBN-Automatisierungssystems besteht aus der AS-Struktur, der Struktur von Steueralgorithmen mit den logischen Bedingungen und Berechnungsformeln sowie den Gleichungssystemen für Netzobjekt mit den Ventilatoren, Messgerätesystem und Reglersystem.

Für die formale Beschreibung GBN als Objektes der Steuerung werden die folgenden Mittel verwendet.

1. Eine Datei für die Kodierung der Netztopologie:

$$NU_j, KU_j, Q_i, P_i, \quad (1)$$

Hier sind  $NU_j, KU_j$  die Nummern der Anfangs- und Endknoten der  $Q_i$  - Kanten,  $P_i$  - die Parameter von Kanten.

2. Das Gleichungssystem für Dynamik der Luftstromverteilung. Für die Netzobjekte mit konzentrierten Parametern gelten ein Knotenpunktsatz

$$AQ = 0 \quad (2)$$

und ein Maschensatz

$$SK \frac{dQ}{dt} + SRZ = SH, \quad (3)$$

die in der Vektor-Matrix-Form dargestellt werden. Die Inzidenzmatrix  $A$  und die Maschenmatrix  $S$  werden aus der Kodierungsdatei (1) nach den Algorithmen

$$A = F_a(NU_j, KU_j, Q_i) \quad (4)$$

$$S = F_s(NU_j, KU_j, Q_i) \quad (5)$$

erstellt. Die Diagonalmatrizen  $R, K$  der aerodynamischen Parametern werden aus den Spalten von  $P_i$  der Datei (1) formiert. Der Vektor  $Z$  beinhaltet nichtlineare Elemente  $Q_i \cdot \text{Mod} Q_i$ . Der Vektor  $H$  besteht aus der nichtlinearen Charakteristiken der in den Kanten vorhandenen Ventilatoren  $H_i(Q_i)$  und der Nullelementen der Kanten, die ohne Ventilatoren sind.

Das Gleichungssystem (2), (3) wird zum GBN-Simulationsmodell

$$\left. \begin{aligned} X &= -WY \\ \frac{dY}{dt} &= D[H(Q, \beta) + H_e + \Delta H(t)] - DRZ - DR'(t)Z - D\Delta R(t)Z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

durch eine Darstellung des Graphen als den aufspannenden Baum und Antibaum und die formale Operationen mit den topologischen Matrizen umgewandelt. Hier sind  $X, Y$  die Untervektoren von  $Q$ , die entsprechend dem Baum und Antibaum zugeordnet werden. Alle Matrizen und Vektoren werden in den  $X$ - und  $Y$ -Teile zerlegt. Matrix  $W$  spiegelt die Zusammenhänge zwischen den Luftströmen in den Baum- und Antibaumkanten wider und wird durch Untermatrizen  $A_x, A_y$  berechnet:

$$W = A_x^{-1} A_y.$$

Die Umwandlungsmatrix  $D = U^{-1}S$  ist von der  $W$  und den Untermatrizen abhängig:

$$U = S_y K_y - S_x K_x W.$$

Die weitere Funktionen in (6) sind  $H_e$  - die Depression des natürlichen Luftzuges;  $\Delta H(t)$ ,  $\Delta R(t)$  - die aerodynamischen Störungen;  $R'$  - die Diagonalmatrix der regelbaren Widerstände.

3. Das Gleichungssystem von gasdynamischen Prozessen im GBN:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_{\mathcal{A}}}{dt} &= V_{\mathcal{A}}^{-1} Q_{M\mathcal{A}}(t) - V_{\mathcal{A}}^{-1} [Q_{\mathcal{A}} + Q_{M\mathcal{A}}(t)] C_{\mathcal{A}} \\ \frac{dQ_M}{dt} &= V_n^{-1} \frac{V_n Q_M}{q} \frac{dq}{dt} - V_n^{-1} (Q_M - Q_{oM}) q \\ \frac{dC}{dt} &= V^{-1} Q_{M\Sigma} - V^{-1} (Q_{\Sigma} + Q_{M\Sigma}) C \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Hier sind  $V_{\mathcal{A}}, V_n, V$  - die Diagonalmatrizen der Volumen von Streben, Alten Männern und Ventilationsstrecken;  $C_{\mathcal{A}}, C$  - die Vektoren der Methankonzentration in den Streben und Ventilationsstrecken;  $Q_M, Q_{M\mathcal{A}}, Q_{M\Sigma}$  - die Methanvolumenstromvektoren aus den Alten Männer, Streben und ihrer Summe;  $Q_{\mathcal{A}} + Q_{M\mathcal{A}}, Q_{\Sigma} + Q_{M\Sigma}$  - die Diagonalmatrizen von Luftmethanmischungsströme;  $Q_M + Q_{oM}$  - die Diagonalmatrix von Methanvolumenströme; ;  $q \in Q$  - der Luftstromvektor durch die Alten Männer;  $\frac{V_n Q_M}{q}$  - die Diagonalmatrix.

4 Gleichungen des Messgeräte- und Reglersystems.

Die  $Q$ - und  $C$ -Messgeräte sowie  $R'$ -Reglersysteme werden mit den Vektor-Matrix-Gleichungssysteme beschrieben, die dem GBN-Simulationsmodell zugeordnet sind:

$$\begin{aligned} T_Q \frac{dQ_g}{dt} + Q_g &= K_Q Q \\ T_C \frac{dC_g}{dt} + C_g &= K_C C \end{aligned} \quad (8)$$

$$R' = F(Q_s, Q_g, C_g, Reg, t).$$

Dabei sind  $T_Q, T_C, K_Q, K_C$  die Parameterdiagonalmatrizen,  $Q_g$  und  $C_g$  die Messwertvektoren,  $Q_s$  - Sollwertvektor,  $Reg$  - eine Menge von Reglerparametern.

Es sind zwei AS-Betriebsarten vorgesehen: die automatisierte interaktive (mit Beteiligung des Bedienpersonals) Prozessführung und die voll automatische Steuerung der aerogasdynamischen Prozesse. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss die interaktive Prozessführung als Teil der AS entwickelt werden. Es wurden Varianten algorithmischer Organisation und Modelldarstellung der interaktiven Prozessführung samt deren Realisierung im Dialogsubsystem vorgeschlagen und analysiert sowie weitere Algorithmen entwickelt. Darauf aufbauend werden Ansätze zur Parallelisierung des AS-Simulationsmodells und die Methodik der parallelen Simulation von Automatisierungssystemen industrienaher komplexer Grubenbewetterungsnetze diskutiert. Das GBN-Automatisierungssystem funktioniert hauptsächlich nach dem Prinzip der asynchronen Arbeit von über das Netzobjekt verbundenen Reglern, die von zentralen Rechnern für die Optimierungsaufgaben koordiniert werden. Diese Eigenschaft wurde für die Erstellung der parallelen AS-Simulationsmodelle benutzt.

Der PSU-Prozess der GBN-Modellierung und Simulation ist in Abbildung 1 ersichtlich: der Topologieeditor erlaubt dem Modellentwickler interaktive Aufbau des

topologischen Modells der Grube; der GBN-Editor kodiert den Graphen und erzeugt die Datei (1); der Parametereditor ist für die  $Pi$ -Spalten und die physischen Parameterwerte in (1) zuständig; alle Editoren visualisieren die Ergebnisse. Das Modellierungssystem wird durch zwei Komponenten realisiert: paralleler Topologieanalytiker, der den Baum und den Antibaum sowie die Inzidenzmatrix und Maschenmatrix des GBN-Graphen aus (1) erstellt; der Gleichungsgenerator, der mathematische Beschreibung der GBN in der Form des Simulationsmodells als Ergebnis der Topologieanalyse bildet. Die Simulation wird durch den parallelen Gleichungslöser realisiert. Dabei erfolgt die Simulationsplanung und die Experimentenverwaltung mit den Mittel von Dialogsubsystem.

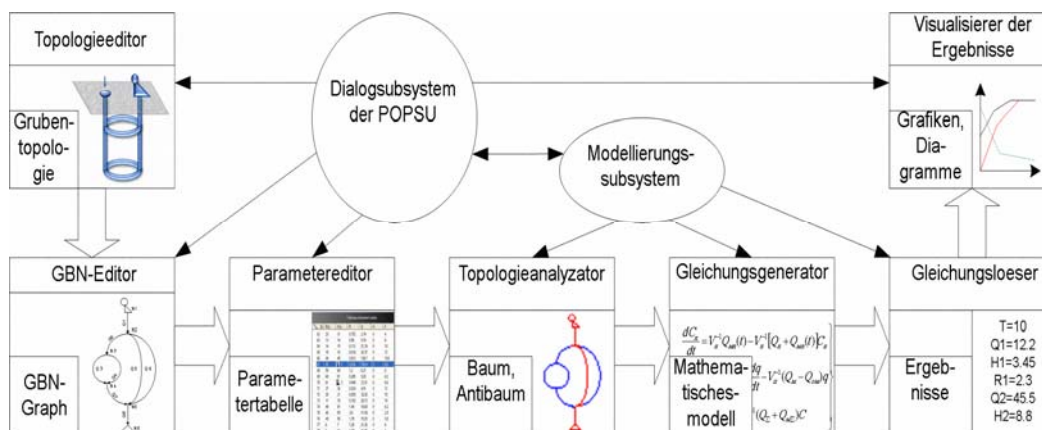


Abbildung 1: Strukturdarstellung der Modellierung und Simulation in PSU

#### 4 Implementierung und experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen der Entwicklungen wurden umfangreiche Implementierungsarbeiten durchgeführt. Die autonome objektorientierte Implementierung der Funktionsalgorithmen für obige Subsysteme und ihre Erprobung anhand der Testbeispiele zeigte, dass die vorgeschlagene Dekomposition methodisch effektiv ist und die rechnergestützte Modellierung der Netzobjekte leistet. In Zusammenarbeit mit dem IPVS und HLRS der Universität Stuttgart wurde die oben erwähnte parallele Simulationsumgebung [1] auf dem neu installierten NEC-Parallelrechner für parallele Simulationsläufe benutzt. Die parallelen Simulatoren von Grubenbewetterungsnetzen und GBN-Automatisierungssystemen wurden als MPI-Bibliothek realisiert, mit der autonom erprobten Subsystemsoftware integriert und mittels Anwendung einfacher Testnetzobjekte sowie industrieller GBN experimentell validiert. Dabei erwies sich das Dialogsubsystem bei der Integration mit anderen Subsystemen als benutzerfreundliches interaktives Werkzeug für alle Schritte der Modellierung und parallelen Simulation von GBN. Das GBN-Automatisierungssystem wurde in beiden Betriebsarten parallel

simuliert, wobei die Darstellung aller möglichen Kombinationen von sicherheitskritischen Situationen und Zuständen vorgesehen wurde. Die Realisierung der interaktiven Algorithmen zur optimalen Prozessführung mit Benutzerinteraktion wurde mit den Ressourcen des Dialogsubsystems und anderer beteiligter Subsysteme erfolgreich durchgeführt. Die Simulation dieser Betriebsarten hat auch zu ersten Erfahrungen der beteiligten Experten im Training der Prozessführung geführt. Die Einsatzfähigkeit der Algorithmen für die automatische Steuerung einschließlich Optimierung nach den Sicherheitskriterien konnte mit den Ergebnissen der parallelen AS-Simulation bestätigt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden interaktionsfähige Funktionsalgorithmen für definierte PSU-Subsysteme entwickelt, implementiert und an Beispielen industrienaher Grubenbewerterungsnetzen in einer räumlich verteilten und durch Subsysteme problemorientierten parallelen Simulationsumgebung (IPVS, HLRS, Stuttgart – FRTI, Donezk) experimentell untersucht. Die erzielten Ergebnisse haben praktische Bedeutung für eine modellgestützte Projektierung von Automatisierungssystemen und sind somit ein Beitrag zur parallelen Simulationstechnik. Die zukünftigen Arbeiten in diesem Bereich werden gemeinsam mit den Informations- und Sicherheitsdiensten von Gruben im Hinblick auf eine Modellanpassung und modellgestützte Prozessführung sowie auf die Anwendung des Trainingssimulators im Rahmen der Systemorganisation des Simulations- und Service-Zentrums [2] der Kohleindustrie der Ukraine durchgeführt.

## 6 Literatur

- [1] *Nadeev D.V., Rothermel K., Solonin O.M., Stepanov I.S., Svjatnyj V., Zeitz M.:* Verteilte parallele Simulationsumgebung. In: Problems of Simulation and Computer Aided Design of Dynamic Systems. Scientific Papers of Donetsk State Technical University, Vol. 29, Sevastopol: <<Weber>> 2001, 229-233 (in Ukrainisch).
- [2] *Bär W., Galazov R., Svjatnyj V., Lapko V., Moldovanova O., Pererva A., Razinkov D.:* Das Simulations- und Service-Zentrum für automatisierte Grubenbewerterungsnetze. In: Möller, [D.P.F.](#) (Hrsg.): Tagungsband 14. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Hamburg2000, SCS-Europe BVBA, Ghent/Belgium 2000, 223-228.