

V. A. Svyatnyy
V. G. Kushnarenko
O. M. Miroshkin

PARALLELE MODELLIERUNG UND SIMULATION DER LUFTDYNAMISCHEN PROZESSE IN DEN GRUBENBEWETTERUNGSNETZEN

Ziele des Beitrages sind die Grubenbewetterungsnetze (GBN) als Objekte der Automatisierung und komplexe dynamische Systeme mit verteilten Parametern zu präsentieren, die Ansätze zur parallele Modellierung und Simulation der luftdynamischen Prozesse und GBN-orientierte parallele Simulationswerkzeuge der modellgetriebenen Aufgabenlösungen in Bergbausicherheitstechnik vorzuschlagen. Methodologisch werden zwischen der luft- und gasdynamischen Prozesse unterschieden. Das mathematische Modell der Luftdynamik wird mit den partiellen Differentialgleichungen beschrieben. Die äußeren und inneren Randbedingungen werden mit der Berücksichtigung der Struktur des GBN-Graphen und Vorhandensein der regelbaren Komponenten formuliert. GBN-Dekomposition erlaubt die Herleitung der Gleichungen für alle Arten von Abbauten und eine Berücksichtigung der bergbautechnischen Bedingungen. Durch Approximation der GBN-Graphenkanten nach Linienverfahren werden ortdiskretisierte Modell und Simulationsmodell des GBN als des Objektes mit verteilten Parametern erhalten. Es werden die für parallele Simulationstechnik wichtige Definitionen der minimalkörnigen MIMD-Prozesse, virtuellen parallelen GBN-Simulationsmodelle, des Devirtualisierungsvorgangs, des parallelen GBN-Simulators und parallelen GBN-Simulation formuliert. Als neue Schwerpunktkomponente des parallelen GBN-Simulators wird aufgrund der blockartigen numerischen Verfahren (BAV) entwickelter Gleichungslöser vorgeschlagen, implementiert sowie am Beispiel des Test-GBN geprüft und analysiert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die BAV-Anwendung gute Perspektive hat. Diese Verfahren haben höhere Genauigkeit und Konvergenz, besseres Verhältnis „Genauigkeit-Geschwindigkeit“ im Vergleich mit den traditionellen Verfahren. Es wird Neuansatz zur Parallelisierung des GBN als Objektes der parallelen Modellierung und Simulation vorgeschlagen: die virtuelle BAV-diskrete GBN- Simulationsmodelle werden auf vier Parallelitätsebenen „Eine Gleichung – MIMD-Prozess“, „Ein Approximationselement – MIMD-Prozess“, „Eine Kante – MIMD-Prozess“ und „Ein Teilgraph – MIMD-Prozess“ realisiert. Aufgrund der Modelle, Simulationsmodelle, Simulatoren und virtuellen Parallelitätsebenen wird Konzeption der GBN-orientierten verteilten parallelen Simulationsumgebung (VPSU) als neue Systemorganisation der parallelen Rechenressourcen vorgeschlagen. Die parallelen VPSU-Simulatoren werden für modellgestützte Aufbau der Automatisierungssysteme in Kohlegruben als Objekte der Industrie-4.0 verwenden. Bei der Erweiterung der GBN-Modelle mit den Gleichungen die gasdynamischen Prozesse werden die vorgeschlagenen Ansätze auch gelten. Die erhaltene Erfahrung der parallelen Modellierung und Simulation der Grubenbewetterungsnetze dient für weitere Arbeiten in Forschung und Lehre in der parallelen Simulationstechnik (ParSimTech) sowie in Anwendungsgebiete wie Bergbautechnik, Energetik, Hüttenwesen, Maschinenbau und Verfahrenstechnik.

Schlüsselwörter: Grubenbewetterungsnetz, Luftdynamikmodell, parallele Simulationstechnik, virtuelle Parallelitätsebene, Devirtualisierung, paralleler Simulator, verteilte parallele Simulationsumgebung

Einführung

Probleme der Automatisierung von Grubenbewetterungssystemen beinhalten neben den zahlreichen technischen Aufgaben die Analyse der dynamischen Prozesse von Bergbauaerologie [1]. Bei der Regelung der Luftströme entstehen die luftdynamischen Prozesse der Übergänge von gewissen laufenden Bewetterungszustand zu der aus der Sicherheitsgründen vorberechneten Luftverteilung. Dabei werden die Methankonzentrationen in verschiedenen Punkte der Abbauten und in den Filtrationsmedien („Alten Männern“) geändert. In [1] wurden die mathematische Beschreibung der luftgasdynamischen Prozesse in allen Komponenten von GBN vorgeschlagen, die mathematische Modelle entwickelt, geprüft, mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Aufgrund dieser Beschreibung wurden die Algorithmen der Überwachung und der automatisierten Regelung von Luftverteilungen entwickelt und im System ATMOS realisiert [1]. Die modellgestützte Entwicklung von ATMOS spielte entscheidende Rolle zur Qualitätssicherung des Kohleindustrieprojektes. Als Folge von steigenden Anforderungen an die Qualität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Automatisierungssysteme für sicherheitskritischen Arbeitsbedingungen in den Kohlegruben als Objekte der Industrie 4.0 [2] werden immer genauere und damit auch komplexere Simulationsmodelle benötigt. Bei dieser Entwicklung ergibt sich in einer natürlichen Weise eine Komplexitätsschwelle für die Implementierung und Anwendung der Simulationsmodelle, die nur durch die Verwendung von neuen Simulationswerkzeugen überwunden werden kann [3, 4]. Hierzu

gehören u.a. die parallelen Höchstleistungsrechner der MIMD-Architektur. Die effiziente Nutzung von diesen Simulationswerkzeugen erfordert eine benutzerfreundliche system- und informationstechnische Organisation der parallelen Ressourcen sowie eine hoch entwickelte Modellierungs- und Simulationssoftware, die neue Ansätze zur Modellerstellung und Simulationsdurchführung zur Verfügung stellt. Die hierbei zu lösenden theoretischen und praktischen simulationstechnischen Probleme sind bei weiteren Lösungen von in [1] formulierten Simulationsaufgaben entstanden. Sie gehören zu den Fachgebieten der **Bergbausicherheitstechnik** und **parallelen Simulationstechnik (ParSimTech)** und werden im Rahmen der langjährigen Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Computer Engineering der DonNTU mit den deutschen Kollegen der Universitäten Stuttgart und Ulm untersucht. Im diesen Beitrag werden die mathematischen Modelle und Simulationsmodelle der luftdynamischen GDN-Prozesse und aktuelle ParSimTech-GDN-Lösungen betrachtet.

Die Grubenbewetterungsnetze als Objekte der Modellierung und Simulation der Luftströmodynamik

Die Grubenbewetterungsnetze (GBN) sind in der Bergbautechnik die Objekte der Untersuchung, Projektierung, Automatisierung, Überwachung, Qualitätssicherung, optimalen Prozessführung, Sicherheitsanalyse und -vorhersage, Vermeidung der sicherheitskritischen Betriebszustände und der Havarieliqidierung. Die GBN gehören zu den komplizierten (oft sicherheitskritischen) dynamischen Systemen. Nichtlinearität der prozessbeschreibenden Funktionen, räumliche Verteilung von Prozessparametern, große, im Laufe des Objektbetriebs sich entwickelnde Dimensionen der Netze (Kantenmenge $m > 100$, Knotenmenge $n > 50$), ebenso mehrere aktive Elemente mit nichtlinearen stromabhängigen Charakteristiken, wesentliches mehrfaches und hierarchisches Zusammenwirken der regelbaren Prozessparametern, sowie gleichzeitige Einflüsse von deterministischen und stochastischen Störungen sind die Hauptmerkmale dieser Komplexität. Nur

wenige, sehr vereinfachten Aufgabe der dynamischen Netzobjekte kann man jedoch analytisch lösen. Deshalb haben die Methoden und Mittel der Modellierung und Simulation dieser Objektklasse sowohl bei der Projektierung als auch während des Betriebes eine zunehmende theoretische und praktische Bedeutung.

Topologisch wird GBN als Graph $G(m, n)$ dargestellt und durch Tabelle 1 mit m Zeilen und $s + 5$ Spalten kodiert. Hier sind: QJ – ein Luftstrom in der J-Kante; AKI und EKK – Anfangs- und Endknoten der J-Kante; $(I, K) \in (1, 2, \dots, n)$, $J \in (1, 2, \dots, m)$; $PAR(PJ_1, PJ_2, \dots, PJ_s)$ – Menge von s Parametern PJ der Kante; AEJ – aktives Element in der J-Kante; VECOMJ – Kommentar zur technologische Funktion der J-Kante.

Tabelle 1. Kodierung des Graphen

AKI	EKK	QJ	PAR(PJ ₁ , PJ ₂ , ..., PJ _s)	AEJ	VECOMJ
-----	-----	----	--	-----	--------

Modell der luftdynamischen Prozesse in der j -Kante ohne Luftverlusten durch die Wände wird von den Gleichungen

$$\begin{cases} -\frac{\partial P_j}{\partial \xi} = r_j Q_j^2 + \frac{\rho}{F_j} \frac{\partial Q_j}{\partial t} + r_j(\xi_r, t) Q_j^2, \\ -\frac{\partial P_j}{\partial t} = \frac{\rho a^2}{F_j} \frac{\partial Q_j}{\partial \xi}, \end{cases} \quad (1)$$

beschrieben. Hier sind: P_j , Q_j – Druck und Luftstrom der Koordinate ξ entlang, die von AKI- bis zum EKK-Knoten errechnet wird; r_j – spezifischer aerodynamischer Widerstand; F_j – die Querschnittsfläche der Kante (Luftwegstrecke); ρ – Luftdichte; a – die Schallgeschwindigkeit im Luft; $r_j(\xi_r, t)$ – regelbarer Widerstand; ξ_r – die Ortskoordinate des regelbaren Widerstands (z. B., ein Schieber).

Die Randbedingungen für (1) sind die Druckfunktionen P_{AKI} , P_{EKK} in den Knoten der j -Kante. Es sind drei Kanten- und Knotenarten nach Randbedingungen in GBN zu unterscheiden:

- die Kanten, die den inneren n_I GBN-Knoten inzident sind; hier werden die Druckwerten während des Lösen des GBN-Gleichungssystems entsprechend den dynamischen Knotenbedingungen

$$-\frac{\partial P_{wi}}{\partial t} = \frac{\rho a^2}{F_{wi}} \frac{\partial Q_{wi}}{\partial \xi} \quad (2)$$

berechnet; hier sind P_{wi} – Druck im WI -Knoten; Q_{wi} – Gesamtluftstrom durch WI -Knoten; F_{wi} – Querschnittsfläche des Knotenraums;

- die Kanten, die den n_2 Knoten der Ventilatorenanschlüsse inzident sind; hier wird Druck als die Ventilatorcharakteristik vorgegeben

$$P_{wi} = P_{AEJ}(QJ); \quad (3)$$

- die Kanten, die den n_3 Knoten der Atmosphärenanschlüsse inzident sind:

$$P_{wi} = P_{ATM} = const. \quad (4)$$

GBN hat insgesamt

$$n = n_1 + n_2 + n_3 \quad (5)$$

Knoten und entsprechend die n Randbedingungen. Die Anfangsbedingungen sind

$$P_j(\xi, 0), Q_j(\xi, 0) \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (6)$$

Problemstellung: für GBN, dessen Graph wird mit der topologischen Tabelle 1 kodiert und jede Kante wird mit den Gleichungssysteme (1) und Randbedingungen (2), (3), (4) bei den Anfangsbedingungen (6) beschrieben, sollen die parallelen algorithmischen, hardware- und softwaretechnischen Simulationsmitteln entwickelt und implementiert werden, die adäquat die dynamischen Prozesse $P_j(\xi, t)$, $Q_j(\xi, t)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) mit der Berücksichtigung von definierten Arbeitsbedingungen, Störungen und Regelungen von Luftströmen widerspiegeln.

Die GBN-relevante ParSimTech Definitionen

Definition 1: Das Modell des GBN ist eine formale KDN-Beschreibung, die notwendige Topologiedarstellung und entsprechende Gleichungssysteme der physikalischen Prozesse beinhaltet und durch die gemeinsamen Vektor-Matrix-Ausdrücke und -Operationen diese Mittel vereinigt.

Definition 2: Das GBN-Simulationsmodell ist das umgewandelte GBN-Modell zur Form, die Anwendung von numerischen Lösungsverfahren erlaubt.

Die erhaltenen Simulationsmodelle dienen für weitere Schritte der parallelen Simulationstechnik, die mit folgenden Definitionen verbunden sind.

Definition 3: Parallele GBN-Modellierung ist ein Vorgang, der zielgerichtet zur Realisierung der GBN-Simulationsmodelle auf dem vorgegebenen parallelen Rechnersystem führt.

Definition 4: Virtueller MIMD-Prozess ist ein relativ autonomes Programm, das den Lösensalgorithmus des Gleichungssystemteils realisiert und mit den in dem Lösen des Gesamtgleichungssystems beteiligten Prozesse kommuniziert.

Die Körnigkeit des virtuellen Prozesses charakterisiert den Umfang der Berechnungs- und Hilfsoperationen, die im Prozess programmiert werden. Dieser Begriff ist mit der GBN-Dekomposition (Topologie und Modelle) sowie mit der örtlichen GBN-Approximation verbunden, weil während der Dekomposition bekommen wir die GBN-Einheiten, die in den weiter nicht zerlegbaren Elementen diskretisiert werden. Die Körnigkeit der virtuellen Prozesse wird nach der Betrachtung der Gleichungssysteme aller nach der Dekomposition erhaltenen GBN-Komponenten und Approximationselementen definiert.

Definition 5: Die minimalkörnigen virtuellen Prozesse beschränken sich mit den Lösensoperationen für die Gleichungen, die nach der Dekomposition und der Diskretisierung der GBN-Komponenten entstanden sind.

Die vorgeschlagene minimale Körnigkeit von Prozessen werden wir für die Erstellung der virtuellen parallelen Simulationsmodelle benutzen.

Definition 6: Virtuelles paralleles Simulationsmodell (VPSM) des GBN ist eine Abstraktion, die aus dem bezüglich den Ableitungsvektoren und den Vektoren der gesuchten algebraischen Unbekannten ausgelösten GBN-Gleichungssysteme und der nach einem Parallelisierungsansatz entwickelten Struktur der virtuellen MIMD-Prozesse für paralleles Lösen der Gleichungssystemteile besteht. **Diskretes GBN-VPSM** entsteht nach Anwendung des numerischen Verfahrens.

Minimaler Gleichungssystemteil ist eine gewöhnliche Differentialgleichung (oder eine algebraische Gleichung), für deren

numerischen Lösung ein minimalkörnigen MIMD-Prozess zuständig ist.

Definition 7: Das Zielrechnersystem (ZRS) ist die Menge der installierten vollfunktionellen Prozessoren mit lokalem oder/und gemeinsamem Speicher und verfügbarem vordefiniertem programmgesteuertem Verbindungsnetzwerk, die dem Modellentwickler zur Verfügung steht und nach MIMD-Prinzip funktioniert.

Definition 8: Paralleler GBN-Simulator ist vorgegebenes Ziel der parallelen Modellierung und wird als eine Hardware/Software Systemsorganisation definiert, welche den Modellierungsvorgang und diskretes virtuelles paralleles Simulationsmodell auf dem Zielrechnersystem softwaretechnisch effizient realisiert und den Modellentwicklern sowie den Modellanwendern benutzerfreundliche Kommunikation mit den Modellierungs- und Simulationsressourcen erlaubt.

Definition 9: Eine Devirtualisierung des diskreten GBN-VPSM ist eine Umwandlung, die zur Simulatorrealisierung auf gegebenen ZRS eindeutig führt.

Anforderungen an Mittel der Modellierung und Simulation

GBN als dynamische Systeme mit verteilten Parametern stellen die folgenden Anforderungen an Modellierungs- und Simulationsmittel:

– Berücksichtigung der Tatsache, daß die **formale GBN-Beschreibung (GBN-Modelle)** aus einer Topologiedarstellung sowie der großdimensionalen Systeme von algebraischen, gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen besteht;

– **Benutzerfreundlichkeit:** die hochentwickelte Benutzeroberfläche (BOF), rechnerunterstützte Modellerstellung und Modelldebugging für GBN, die dem Benutzer zur Verfügung stehende Simulationssprache mit einer domänenabhängigen Modellspezifikation und leichter Erlernbarkeit;

– Hochintellektuelle interaktive Unterstützung des Modellentwicklers (Benutzers) bei der Modellierung und Simulation von GBN:

- Spezifikation der Simulationsobjekte durch die für Modellentwickler klare Sprachmittel; Minimierung des Aufwandes von Routinearbeiten bei der ursprünglichen

Beschreibung und Kodierung der GBN-Topologien;

- Topologische Analyse der Spezifikationen und automatische Generierung der formalen Darstellung von GBN-Strukturen und ihren Parametern;

- Automatische Generierung der GBN-Gleichungssysteme nach Ergebnisse der Topologieanalyse (GBN-Modell) und eine Umwandlung der Gleichungen zur für die numerische Lösung geeigneten Form (GBN-Simulationsmodell);

- Implementierung der von Modellentwickler ausgewählten numerischen Verfahren und Lösen der Gleichungssysteme (GBN-Simulator);

- Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten entsprechend dem GBN-Untersuchungsprogramm;

- Visualisierung und Dokumentierung der Simulationsergebnisse;

- Archivierung der GBN-Modelle für ihre Wiederverwendung

– **Objektorientierte Modellspezifikation** für Struktur, Verhalten und Parameter von GBN, objektimplementierte Modellierungs- und Simulationssoftware;

– **Vorhandensein der Bibliothek von numerischen Verfahren** für die Modellierung und Simulation der komplexen industriellen GBN;

– **Moderne Mittel der Visualisierung und Dokumentation** der Modelle, Simulationsmodelle und Simulationsergebnisse;

– **Vorhandensein der HW/SW-Ressourcen, die für Simulation der real komplexen GBN genügend sind;**

– **Echtzeitfähigkeit** zur Kopplung mit den realen GBN- und Automatisierungskomponenten;

– **Integrationsfähigkeit** mit den Werkzeugen für die rechnergestützte GBN-Projektierung;

– **Möglichkeit zur Erstellung der GBN-orientierten Simulationsumgebung;**

– **Vorhandensein der Mittel für die Schulung** von Modellentwicklern und Realisierung der Trainingssimulatoren;

– **Eine Systemorganisation** der Modellierungs- und Simulationsressourcen aufgrund der modernen Informationstechnologien.

Entwicklung des GBN-Simulators

Durch die Approximation der Gleichungen (1) nach **Linienverfahren** mit der Ortschrittweite $\Delta\xi^z$ erhalten wir für k -Element der j -Kante das Gleichungssystem:

$$\begin{cases} \dot{Q}_{jk} = \alpha_j(P_{jk} - P_{j,k+1}) - \beta_j Q_{jk} |Q_{jk}| - \beta_{rj} Q_{jk} |Q_{jk}|, \\ \dot{P}_{j,k+1} = g_j(Q_{jk} - Q_{j,k+1}). \end{cases} \quad (7)$$

Die $\alpha_j, \beta_j, \beta_{rj}, g_j$ sind die von aerodynamischen j -Kanteparametern abhängigen Koeffizienten.

Die inneren Randbedingungen von Type (2) werden so dargestellt:

$$-\frac{dP_{wi}}{dt} = \frac{\rho a^2 Q_{jk} - \sum_{jwi} (Q_{jwi1} - Q_{jwiM_j})}{F_{wi} \Delta\xi_{jk}} \quad (8)$$

Hier sind: $P_{wi} = P_{jM_{j+1}}$ – Druck im Endknoten des letzten Elementes $Q_{jk} = Q_{jM_j}$ des j -Kantestroms, der in wi -Knote fließt; $jwiM_j$ – die Kantenummern aus Menge $j=1, 2, \dots, m$, die dem Knoten wi inzident sind; dabei $jwi1$ ist erstes Element der j -Kante mit den wi als Anfangsknoten (Ausfluß), während $jwiM_j$ letztes Element mit den wi als Endknoten (Zufluß) ist. Jede Kante wird bei der Approximation nach M_j Elementen Q_{j1}, \dots, Q_{jM_j} zerteilt. Dabei wird die Nummerierung der Druckwerte als $P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jM_j+1}$ erfolgt. Es ist wichtig zu erwähnen, dass j -Kante eine Anfangsknote wi mit dem Druck $P_{wi} = P_{j1}$ und die Endknote $wi + b$ ($b = const$) mit dem Druck $P_{wi+b} = P_{jM_j+1}$ hat. Für GBN als dynamisches Objekt mit verteilten Parametern wird jede Kante nach obige Approximation durch zwei Vektoren Q_j, P_j ($j = 1 \dots m$) präsentiert:

$$Q_j = (Q_{j1}, Q_{j2}, \dots, Q_{jM_j})^T \quad (9)$$

ist Luftstrom in j -Kante,

$$P_j = (P_{j1}, P_{j2}, \dots, P_{jM_j+1})^T \quad (10)$$

ist Druck in j -Kante. Dabei wird M_j – die Menge die Elemente in den Kanten – abhängig von der Kantenlängen l_j bei der gleichen Ortschrittweite $\Delta\xi$ für ganzes Objekt als $M_j = l_j / \Delta\xi$ berechnet.

Bei der Entwicklung des ortsdiskretisierten Simulationsmodells des ganzen Netzobjektes sollen wir m Gleichungssysteme von Type (7) für alle Kanten, d. h. $j=1, 2, \dots, m$, darstellen:

$$\begin{cases} \dot{Q}_{1k} = \alpha_1(P_{1k} - P_{1,k+1}) - \beta_1 Q_{1k} |Q_{1k}| - \beta_{r1} Q_{1k} |Q_{1k}|; \\ \dot{P}_{1,k+1} = g_1(Q_{1k} - Q_{1,k+1}); \\ k = 1, 2, \dots, M_1; \\ \dots \\ \dot{Q}_{mk} = \alpha_m(P_{mk} - P_{m,k+1}) - \beta_m Q_{mk} |Q_{mk}| - \beta_{rm} Q_{mk} |Q_{mk}|; \\ \dot{P}_{m,k+1} = g_m(Q_{mk} - Q_{m,k+1}); \\ k = 1, 2, \dots, M_m. \end{cases} \quad (11)$$

Entsprechend der Gleichung (8) formulieren wir n_1 Randbedingungen für inneren Knoten des Netzobjektes ($wi=1, 2, \dots, n_1$):

$$\begin{cases} \frac{dP_{w1}}{dt} = \frac{\rho a^2 Q_{jk} - \sum_{jw1} (Q_{jw11} - Q_{jw1M_1})}{F_{w1} \Delta\xi_{jk}}; \\ \dots \\ \frac{dP_{wn_1}}{dt} = \frac{\rho a^2 Q_{jk} - \sum_{jwn_1} (Q_{jwn_11} - Q_{jwn_1M_1})}{F_{wn_1} \Delta\xi_{jk}}. \end{cases} \quad (12)$$

Die Ventilatorencharakteristiken bilden nach (3) n_2 weitere Randbedingungen

$$\begin{cases} P_{wi} = P^1_{AEJ}(Q_j); \\ \dots \\ P_{wi} = P^{n_2}_{AEJ}(Q_j). \end{cases} \quad (13)$$

Dabei ist $wi = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n_1 + n_2$, wenn die Nummerierung der Knoten fortlaufend von inneren Knoten durchgeführt wird. Aktive Elemente (Ventilatoren) sind in (13) von 1 bis n_2 zusätzlich nummeriert.

Für n_3 Knoten der Atmosphäreanschlüsse gelten die Randbedingungen nach (4):

$$\begin{cases} P_{wi} = P_{(n_1+n_2)+1} = P^1_{ATM} = const; \\ \dots \\ P_{wi} = P_n = P^{n_3}_{ATM} = const. \end{cases} \quad (14)$$

Die Gleichungen (11) bilden zusammen mit den Randbedingungen (12), (13), (14) ortsdiskretisiertes GBN-Simulationsmodell. Für die industrienahen GBN ($m \geq 1000, n \geq 300, M_j \geq 50$) ist aktuell die rechnergestützte Erstellung der GBN-Simulationsmodelle mit Hilfe des Topologieanalytators und des Gleichungsgenerators zu realisieren.

In Abb. 1 werden die Dekomposition des Grubenbewetterungsnetzes und Diskretisierung der Luftwege (Kanten des Netzgraphen) erläutert.

Die Definition der minimalkörnigen Prozesse im Zusammenhang mit der Dekomposition und der Ortsdiskretisierung des GBN führt zu dem virtuellen parallelen GBN-Simulationsmodell. Es werden folgende

Ansätze zur Parallelisierung der GBN-Simulationsmodelle vorgeschlagen, die in der Abb. 2 sind als möglichen Parallelitätsebenen (PE 1, 2, 3, 4) der virtuellen parallelen Simulationsmodelle zusammengefasst.

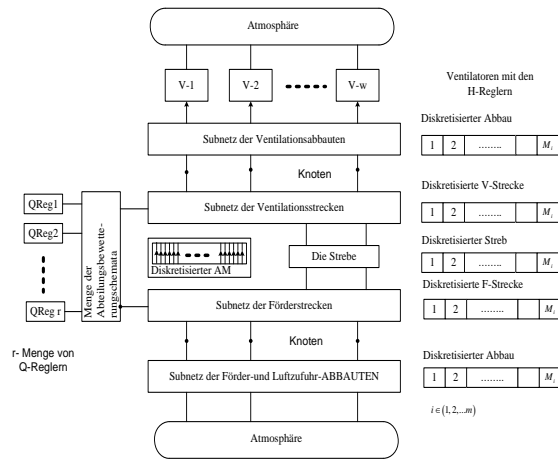


Abbildung 1. Dekomposition und Diskretisierung des GBN nach Ortskoordinaten

Es wurde paralleler GBN-Simulator (Abb. 3) entwickelt und für Realisierung im Simulations- und Servicezentrum für die Kohleindustrie [5] vorgeschlagen.

Zentraler Bestandteil des Simulators ist Gleichungslöser, der ausgewähltes numerisches Verfahren realisiert. Die obigen Gleichungen des Simulationsmodells entsprechen den minimal-körnigen MIMD-Prozesse und können bezüglich jeder gesuchten Variablen als Cauchy-Aufgabe

$$x' = f(t, x), x(t_0) = x_0 \quad (15)$$

betrachtet werden. Durch Diskretisierung der Variable t mit gleichmäßigem Gitter $h: \{t_n = nh, n = 0, 1, 2, \dots\}$ und Approximation der Ableitungen bekommen wir eine Möglichkeit die angenäherte Lösung $u_n = u(t_n)$ von (15) zu finden. Die Qualität dieser Lösung bezüglich der genauen Lösung $x(t)$ wird durch Differenz

$$\epsilon_n = u_n - x_n$$

als die Lösungsfehler am Zeitschritt n charakterisiert.

Die Diskretisierung und Approximation wandeln die Kante- und GBN-Simulationsmodelle zur Form der **diskreten Simulationsmodelle (DSM)** um, die nach beiden Koordinaten diskretisiert werden. DSM-

Art und entsprechendes Suchverfahren der Lösungen des Cauchy-Problems (15) sind von

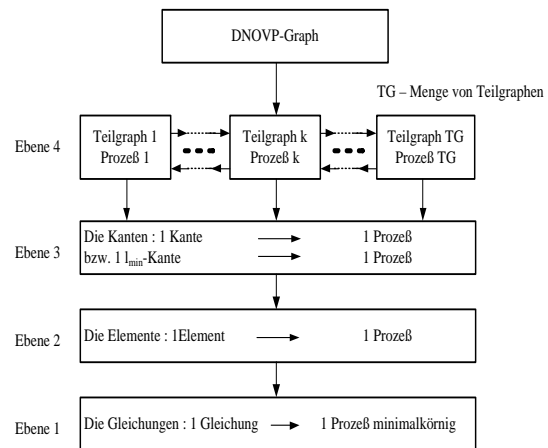


Abbildung 2. Die virtuellen Parallelitätsebenen des GBN-Simulationsmodells

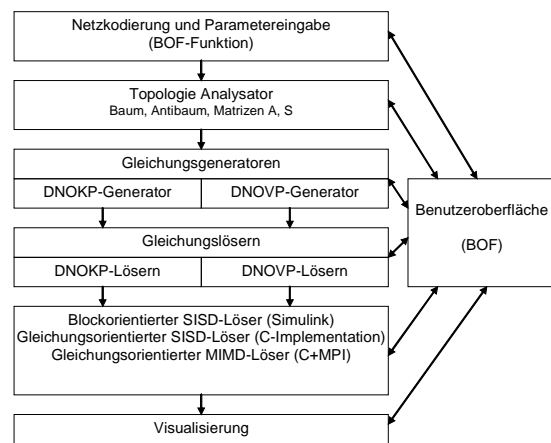


Abbildung 3. Struktur des GBN-Simulators

den angewendeten numerischen Lösungsverfahren abhängig. Bei der Anwendung von konventionellen expliziten numerischen Verfahren (RuKu - Runge-Kutta, AB - Adams-Bashfort, Eu - Euler u. a.) wird ortsdiskretisiertes GBN-Simulationsmodell (11)...(14) in ein System der Berechnungsformeln umgewandelt, das uns direkten Berechnungen von allen gesuchten Variablen im Zeitschritt $n+1$ nach n -Zeitschrittsergebnisse erlaubt. Aufbau der parallelen Simulatoren mit den expliziten RuKu-, AB- und Eu-Gleichungslösern wurden in [6] durchgeführt und analysiert.

Es gibt zurzeit keiner GBN-Modellierungs- und Simulationserfahrung der Anwendung von impliziten numerischen konventionellen und parallelen blockartigen

Verfahren (BAV). Allgemeine theoretische Grundlagen aus [7, 8] erlauben uns die systematische Entwicklung und Untersuchung von GBN-BAV-Simulatoren durchzuführen. Als erster Schritt betrachten wir die diskreten Simulationsmodelle für einzelne Kante und für GBN aufgrund des blockartigen m -Schritts- und k -Punkt-Verfahrens. In Abb. 4 wird den Schablone des Einschritts- ($m = 1$) und k -Punkt- Differenzschemas dargestellt.

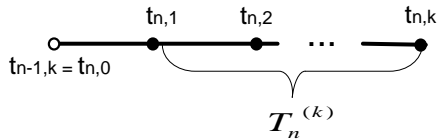


Abbildung 4. Einschritts- und k -Punktdifferenzschema

Die allgemeine Berechnungsformel für die Definition der neuen k Werte ist [7, 8]:

$$u_{n,i} = u_{n,0} + i\tau \left[b_i F_{n-1,j} + \sum_{j=1}^k a_{i,j} F_{n,j} \right]. \quad (16)$$

Für BAV mit $m = 1, k = 4$ gilt $F_{n-1,j} = F_{n,0}$ (siehe $t_{n-1,k} = t_{n,0}$, Abb. 4) und aus (16) bekommen wir die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} u_{n,1} &= u_{n,0} + \tau [b_1 F_{n,0} + \sum_{j=1}^4 a_{1,j} F_{n,j}], \\ u_{n,2} &= u_{n,0} + 2\tau [b_2 F_{n,0} + \sum_{j=1}^4 a_{2,j} F_{n,j}], \\ u_{n,3} &= u_{n,0} + 3\tau [b_3 F_{n,0} + \sum_{j=1}^4 a_{3,j} F_{n,j}], \\ u_{n,4} &= u_{n,0} + 4\tau [b_4 F_{n,0} + \sum_{j=1}^4 a_{4,j} F_{n,j}]. \end{aligned} \quad (17)$$

Hier ist $\tau = T_n/k$. Die Berechnungsformeln fürs BAV-Verfahren sehen so aus [7,8]:

$$\begin{aligned} U_{n,1} &= \frac{\tau}{720} (251F_{n,0} + 646F_{n,1} - 264F_{n,2} + 106F_{n,3} - 19F_{n,4}) + U_{n,0}; \\ U_{n,2} &= \frac{\tau}{90} (29F_{n,0} + 124F_{n,1} + 24F_{n,2} + 4F_{n,3} - F_{n,4}) + U_{n,0}; \\ U_{n,3} &= \frac{3\tau}{80} (9F_{n,0} + 34F_{n,1} + 24F_{n,2} + 14F_{n,3} - F_{n,4}) + U_{n,0}; \\ U_{n,4} &= \frac{2\tau}{45} (7F_{n,0} + 32F_{n,1} + 12F_{n,2} + 32F_{n,3} + 7F_{n,4}) + U_{n,0}; \end{aligned}$$

Für v -Kantelement haben wir die Gleichungen

$$\begin{cases} \dot{Q}_{jv} = \alpha_j (P_{jv} - P_{j,v+1}) - \beta_j Q_{jv} |Q_{jv}|; \\ \dot{P}_{j,v+1} = g_j (Q_{jv} - Q_{j,v+1}) \end{cases} \quad (18)$$

und sollen mit der Berücksichtigung $v = 1, 2, \dots, M_j$ die BAV-Berechnungsformeln anwenden. Bedeutung der notwendigen Indexe werden wir örtlich definieren und erklären, weil es um recht komplexen Gleichungsstrukturen geht. Einige von Indexbezeichnungen haben wir schon in den Simulationsmodellen (j – Kantenummer, m – Kantenmenge im GBN, n – Knotenmenge im GBN, k – Elementenummer in der approximierten Kante u.a.) benutzt.

Eine Struktur des virtuellen parallelen Simulationsmodells (VPSM) der nach Ortskoordinate mit M_j Elementen diskretisierten GBN-Kante wird in Abb. 5 dargestellt. Die hier gezeigte Kante kann in GBN verschiedene funktionelle Bedeutung haben.

Aus Abb. 5 und der zu lösenden Gleichungen (18) folgt, daß Q-Prozesse für v -Elemente der j -Kante ($v = 1, 2, \dots, M_{j-1}, M_j$) die

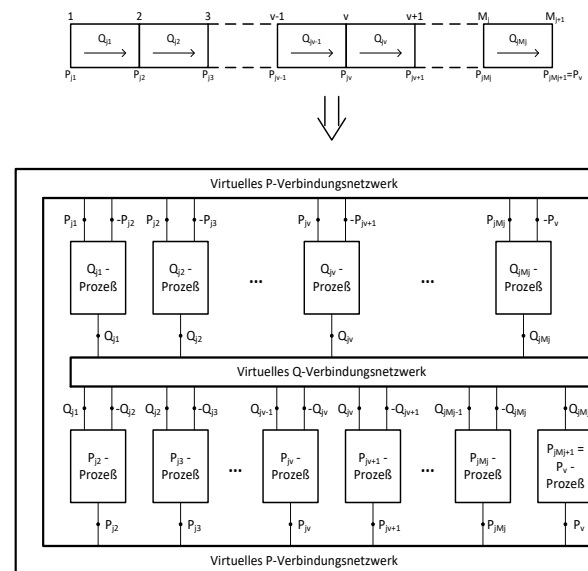


Abbildung 5. VPSM-Struktur der diskretisierten Kante des GBN-Graphen

folgenden Operationen erfüllen sollen:

- 1) Eingabe der Druckwerte P_v und P_{v+1} von Nachbarprozessen;
 - 2) Berechnung der Q_v -Werte
 - 3) Ausgabe der Q_v -Werte dem Nachbarprozess.
- Seitens P-Prozesse werden ähnliche Operationen erfüllt:
- 1) Eingabe der Luftstromwerte Q_v und Q_{v+1} von Nachbarprozessen;
 - 2) Berechnung der P_{v+1} -Werte
 - 3) Ausgabe der P_{v+1} -Werte dem Nachbarprozess.

Die Eingabe- und Ausgabeoperationen werden mit Hilfe von virtuellen Q- und P-Verbindungsnetzwerke (Abb. 5) erfüllt.

Programmtechnischer Inhalt der Prozesse ist voll von dem ausgewählten numerischen Verfahren abhängig. Betrachten wir die Rechenaufgaben für Prozesse, die BAV-Berechnungsgleichungen bei BAV-Parametern $m = 1$, $k = 4$ realisieren sollen. Für weitere Umformungen führen wir die folgenden Bezeichnungen ein:

$$\begin{cases} \dot{Q}_{jv} = F_{jv}; \\ F_{jv} = \alpha_j(P_{jv} - P_{j,v+1}) - \beta_j Q_{jv} |Q_{jv}| - \beta_{rj} Q_{jv} |Q_{jv}|; \\ \dot{P}_{j,v+1} = D_{j,v+1}; \\ D_{j,v+1} = g_j(Q_{jv} - Q_{j,v+1}). \end{cases}$$

Die BAV-Simulationsmodelle bei $\beta_{rj} = 0$ nach Verwendung der BAV-Berechnungsformeln sehen so aus:

$$\begin{aligned} Q_{jvn,1} &= \frac{\tau}{720} (251F_{jvn,0} + 646F_{jvn,1} - 264F_{jvn,2} + 106F_{jvn,3} - 19F_{jvn,4}) + Q_{jvn,0}; \\ Q_{jvn,2} &= \frac{\tau}{90} (29F_{jvn,0} + 124F_{jvn,1} + 24F_{jvn,2} + 4F_{jvn,3} - F_{jvn,4}) + Q_{jvn,0}; \\ Q_{jvn,3} &= \frac{3\tau}{80} (9F_{jvn,0} + 34F_{jvn,1} + 24F_{jvn,2} + 14F_{jvn,3} - F_{jvn,4}) + Q_{jvn,0}; \\ Q_{jvn,4} &= \frac{2\tau}{45} (7F_{jvn,0} + 32F_{jvn,1} + 12F_{jvn,2} + 32F_{jvn,3} + 7F_{jvn,4}) + Q_{jvn,0}. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} F_{jv,n,0} &= \alpha_j(P_{jv,0} - P_{jv+1,n,0}) - \beta_j Q_{jv,n,0} |Q_{jv,n,0}|; \\ F_{jv,n,1} &= \alpha_j(P_{jv,0} - P_{jv+1,n,1}) - \beta_j Q_{jv,n,1} |Q_{jv,n,1}|; \\ F_{jv,n,2} &= \alpha_j(P_{jv,0} - P_{jv+1,n,2}) - \beta_j Q_{jv,n,2} |Q_{jv,n,2}|; \\ F_{jv,n,3} &= \alpha_j(P_{jv,0} - P_{jv+1,n,3}) - \beta_j Q_{jv,n,3} |Q_{jv,n,3}|; \\ F_{jv,n,4} &= \alpha_j(P_{jv,0} - P_{jv+1,n,4}) - \beta_j Q_{jv,n,4} |Q_{jv,n,4}|; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P_{jv+1,n,1} &= \frac{\tau}{720} (251D_{jv+1,n,0} + 646D_{jv+1,n,1} - 264D_{jv+1,n,2} + 106D_{jv+1,n,3} - 19D_{jv+1,n,4}) + P_{jv+1,n,0}; \\ P_{jv+1,n,2} &= \frac{\tau}{90} (29D_{jv+1,n,0} + 124D_{jv+1,n,1} + 24D_{jv+1,n,2} + 4D_{jv+1,n,3} - D_{jv+1,n,4}) + P_{jv+1,n,0}; \\ P_{jv+1,n,3} &= \frac{3\tau}{80} (9D_{jv+1,n,0} + 34D_{jv+1,n,1} + 24D_{jv+1,n,2} + 14D_{jv+1,n,3} - D_{jv+1,n,4}) + P_{jv+1,n,0}; \\ P_{jv+1,n,4} &= \frac{2\tau}{45} (7D_{jv+1,n,0} + 32D_{jv+1,n,1} + 12D_{jv+1,n,2} + 32D_{jv+1,n,3} + 7D_{jv+1,n,4}) + P_{jv+1,n,0}. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} D_{jv+1,n,0} &= g_j(Q_{jv,n,0} - Q_{jv+1,n,0}); \\ D_{jv+1,n,1} &= g_j(Q_{jv,n,1} - Q_{jv+1,n,1}); \\ D_{jv+1,n,2} &= g_j(Q_{jv,n,2} - Q_{jv+1,n,2}); \\ D_{jv+1,n,3} &= g_j(Q_{jv,n,3} - Q_{jv+1,n,3}); \\ D_{jv+1,n,4} &= g_j(Q_{jv,n,4} - Q_{jv+1,n,4}). \end{aligned} \quad (20)$$

Die Werte $Q_{vn,0}$ und $P_{v+1,n,0}$ im Nullpunkt des Blocks n werden als die Werte im letzten Punkt des vorigen Blocks für $n > 1$ ($t_{n-1,k} = t_{n,0}$) definiert. Für jede Kante des Testnetzobjektes (Abb. 4) werden die Gleichungssysteme (19), (20) mit den entsprechenden Indexe $j = 1, 2, \dots, 8$ und $v = 1, 2, \dots, Mj$ generiert.

Die Randbedingungen $P_{U1} \dots P_{U4}$ werden mit den Knotengleichungen

$$\begin{aligned} \frac{dP_{u1}}{dt} &= \gamma_{u1}(Q_{1M1} - Q_{21} - Q_{51} - Q_{61}), \\ \frac{dP_{u2}}{dt} &= \gamma_{u2}(Q_{2M2} - Q_{31} - Q_{41}), \\ \frac{dP_{u3}}{dt} &= \gamma_{u3}(Q_{3M3} + Q_{4M4} - Q_{71}), \\ \frac{dP_{u4}}{dt} &= \gamma_{u4}(Q_{7M7} - Q_{81} + Q_{5M5} + Q_{6M6}), \end{aligned} \quad (21)$$

beschrieben. Entsprechend dem System (20) wird jede Knotengleichung in BAV-Form umgewandelt und ihre gesuchte Variable P_{Uw} ($w=1, 2, 3, 4$) wird im gesamten Rechenprozess berechnet.

Die Parameter des Testnetzobjektes (Abb. 6) sind für Ortschaftweite $\Delta\xi = 40\text{m}$ in Tabelle 2 zusammengefasst.

Es wurden die sequentiellen Gleichungslöser nach Blockdiagramm Abb. 7 implementiert, um die Arbeitsfähigkeit der blockartigen Verfahren zu prüfen und die erreichten Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der konventionellen Verfahren zu vergleichen. Hier sind BAV2 und BAV4 entsprechend die Einschrittsverfahren mit den $k = 2$ und $k = 4$ Berechnungspunkten im jeweiligen Block.

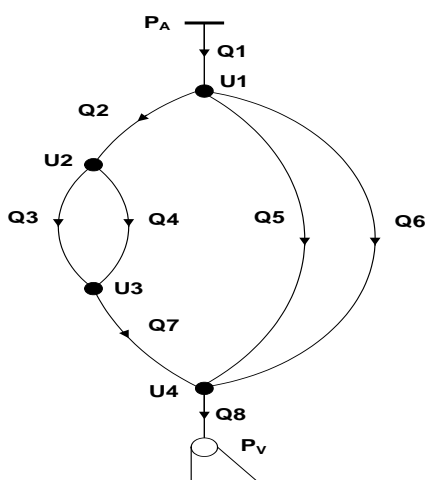


Abbildung 6. Graph des Testnetzobjektes mit 8 Kanten und 4 Knoten

Tabelle 2 – Parameter des Testobjektes

\Par Kante\	Lj	Fj	rj	$\Delta\xi, \text{m}$ Δx	Mj	α_j	β_j	γ_j	Test PA	Test PV	Test Q
Q1	800	6,5	0,000484	40	20	0,13	0,00252	523,6	0		71,6
Q2	150	6,5	0,000484	40	4	0,13	0,00252	523,6			28,9
Q7	150	6,5	0,000484	40	4	0,13	0,00252	523,6			28,9
Q8	650	6,5	0,000484	40	16	0,13	0,00252	523,6		-4100	71,6
Q3	1925	4,7	0,00105	40	48	0,09	0,004	728,6			14,4
Q4	1410	6	0,0019	40	35	0,12	0,009	569,1			14,9
Q5	1720	4,5	0,00112	40	43	0,09	0,004	756,2			19,2
Q6	934	5	0,00137	40	23	0,1	0,0055	684,7			23,7

In Abb. 8–11 sind die dynamischen Prozesse in der Kante Q8 dargestellt, die nach den schnellen Änderungen der Randbedingung von $P_V = 0$ bis zum $P_V = -4100$ (Tab. 2)

entstehen. In den allen anderen Kanten die Prozesse sehen ähnlich aus. Analyse der Simulationsergebnisse lässt uns folgendes feststellen:

- BAV4 zeigt richtig die Zeitverzögerungen in verschiedenen Kantenelementen, mit hoher Genauigkeit wird Q8-Testwert im stationären Zustand erreicht (Abb. 8); ähnliche Prozesse laufen in allen anderen Kanten;
- Alle Verfahren bei $\tau = 0.0001$ liefern die physikalisch korrekte Q- und P-Prozesse, es werden die richtigen Testwerte im stationären Zuständen erreicht (Abb. 9);
- Die Empfindlichkeit der Verfahren zur Vergrößerung der Zeitschrittweite zeigen Abb. 10 und Abb. 11: bei $\tau = 0.01$ bleiben nur BAV2, BAV4 und AB-Verfahren stabil und zeigen fast dieselben Prozesse; beide blockartige Verfahren erlauben noch größeren Schrittweiten (Abb. 11).

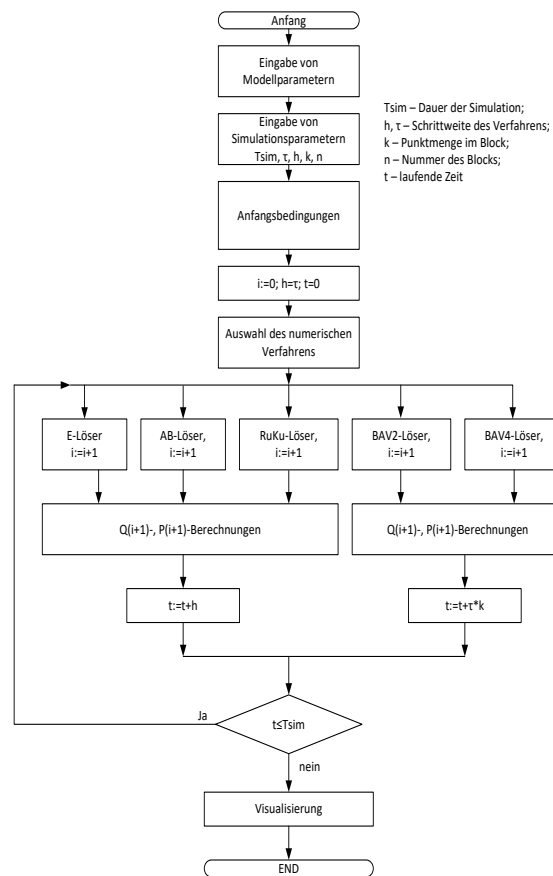


Abbildung 7. Blockdiagramm des sequentiellen Gleichungslöser

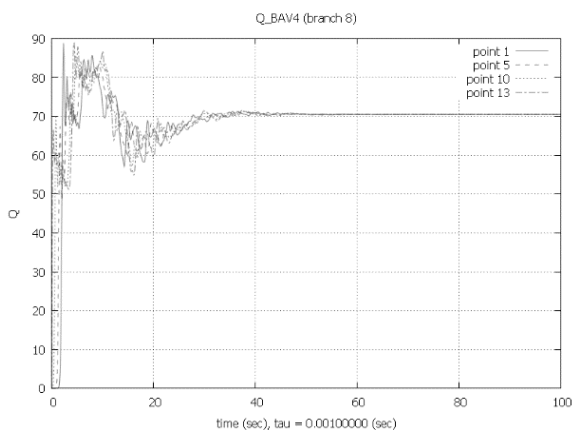


Abbildung 8. Dynamische Prozesse Q8 in den Kantelementen 1, 5, 10, 13 nach BAV4

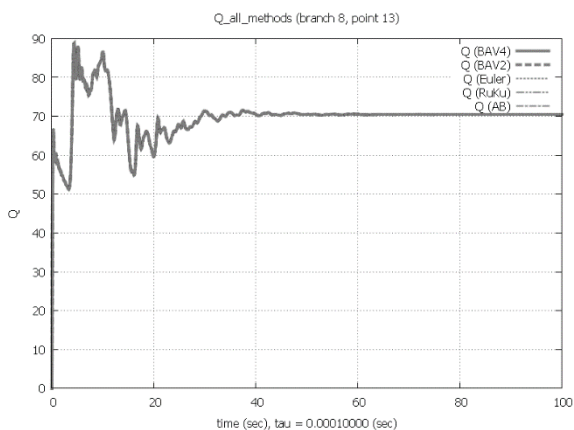


Abbildung 9. Dynamische Prozesse Q8, Kantelement 13, alle Verfahren, $\tau = 0.0001$

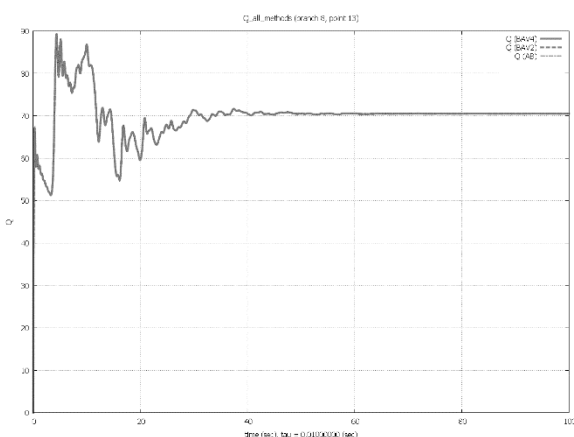


Abbildung 10. BAV und AB-Verfahren, $\tau = 0.01$

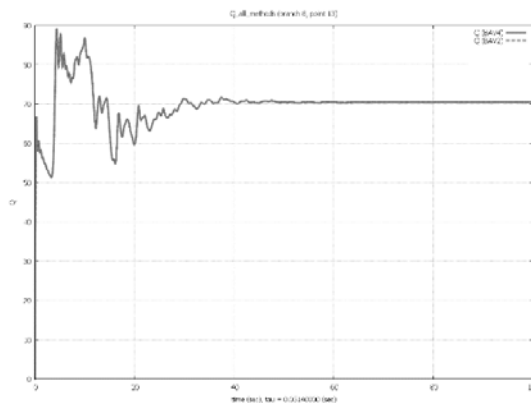


Abbildung 11. BAV2 und BAV4: andere Verfahren sind mit $\tau = 0.05$ nicht arbeitsfähig

Definition 10: Die **VPSU** (Abb.12) definieren wir als eine benutzerfreundliche simulationstechnische Systemorganisation der Hardware, der architekturelevanten Systemsoftware, der speziell zielgerichtet entwickelten Modellierungs- und Simulationssoftware sowie der modellierungs-, simulations- und systemtechnischbedingten Subsysteme, mit denen alle Etappen der parallelen Modellierung und Simulation von GBN mit der möglichst vollen Berücksichtigung der obigen Anforderungen unterstützt werden.

Die VPSU-Entwicklung wird als zentrales Problem der parallelen Simulationstechnik angesehen und von den beteiligten Institutionen nach der folgenden Konzeption durchgeführt:

- Berücksichtigung der GBN-Anforderungen an die Simulationsmittel;
- Nutzung der vorhandenen und künftigen parallelen Ressourcen von verschiedenen Architekturen als verteilten Rechensysteme;
- Entwicklung der funktionsvollständigen Modellierungs- und Simulationssoftware für VPSU entsprechend den formalen Beschreibungen von GBN und GBN-Anforderungen;
- Verwendung von denselben Lösensalgorithmen für die diskreten GBN-Simulationsmodellen mit oder ohne Berücksichtigung der Verteilung von Parametern;
- Parallele Simulationssoftware mit ähnlichen Eigenschaften wie bei den vorhandenen block- und gleichungsorientierten Simulationssprachen;

– GBN-orientierte VPSU wird als Teilprojekt betrachtet, das allgemeine Lösungen nutzt und Ergebnisse für mögliche Verallgemeinerungen liefert;

– GBN-VPSU wird als komplexes HW/SW-SYSTEM betrachtet, deren Entwicklung soll auf dem OO-Ansatz mit der UML-Technologie sowie mit der Dekomposition auf bestimmte Menge der funktionellen Subsysteme erfolgen. Solche Entwicklungsorganisation erlaubt nebenläufige Bearbeitung der Teilprojekte (Entwicklungsaufgaben) und eine Erhaltung der Zwischenergebnisse, die zu den arbeitsfähigen Versionen der Simulationsumgebung führen.

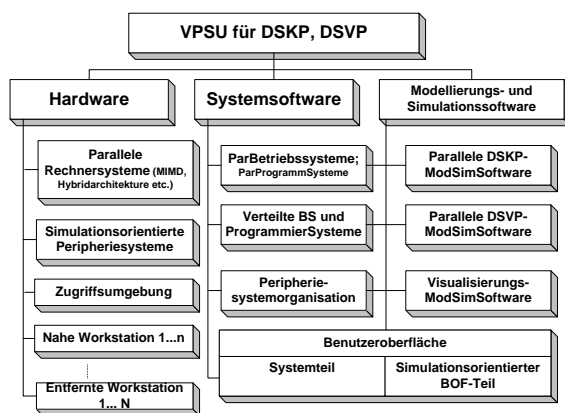


Abbildung 12. Systemorganisation der VPSU

Definition 11: Ein **VPSU-Subsystem** ist eine Teilkomponente der Hardware, Systemsoftware, Modellierungs- und Simulationssoftware, die benutzerfreundlich eine gewisse Gruppe von inhaltlich nahen Funktionen auf entsprechenden GBN-Modellierungs- und Simulationsetappen erfüllt.

Unsere Realisierungserfahrung von VPSU bestätigt die Produktivität und Entwicklungsperspektive vorgeschlagener Konzeption.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Grubenbewetterungsnetze als Objekte der Automatisierung sind komplexe dynamische Systeme mit verteilten Parametern. An DonNTU wurde die umfangreiche mathematische Beschreibung der gas- und luftdynamischen Prozesse entwickelt und in Kohleindustrie bei Inbetriebnahme des Automatisierungssystems ATMOS verwendet. Für reale Grubenbewetterungsnetze ist aktuell,

die neue parallele Verfahren und Werkzeuge zur Modellierung und Simulation zu benutzen. Die parallelen Simulatoren werden für modellgestützte Aufbau der Automatisierungssysteme in Kohlegruben als Objekte der Industrie-4.0 verwendet. Die vorgestellten Ergebnisse liefern einen Beitrag zur Entwicklung der GBN-orientierten verteilten parallelen Simulationsumgebung (VPSU). Es wurden die luftdynamischen Prozesse in GBN als Objekte mit verteilten Parametern betrachtet und die Ansätze für effizientes paralleles Lösen der Gleichungssysteme, die in der Form von Simulationsmodellen dargestellt werden, vorgeschlagen. Die Implementierungserfahrung der rechnergestützten Erstellung von Modellen, Simulationsmodellen und Gleichungslösern hat gezeigt, dass die Anwendung von blockartigen parallelen numerischen Verfahren gute Perspektive hat. Diese Verfahren haben höhere Genauigkeit und Konvergenz, besseres Verhältnis „Genauigkeit-Geschwindigkeit“ im Vergleich mit traditionellen Verfahren. Bei der Erweiterung der GBN-Modelle mit den Gleichungen der gasdynamischen Prozesse werden die vorgeschlagenen Ansätze auch gelten. Die erhaltene Erfahrung der parallelen Modellierung und Simulation der Grubenbewetterungsnetze dient für weitere Arbeiten in Forschung und Lehre in der parallelen Simulationstechnik sowie in Anwendungsgebiete wie Bergbautechnik, Energetik, Hüttenwesen und Verfahrenstechnik.

Literatur

1. Абрамов, Ф А, Фельдман, Л П, & Святный, В А. (1981). Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. Киев: Наукова думка.
2. Weyrich, M., Diedrich, Ch., Fay, A., Wollschlaeger, M. and Kowalewski, S., Göhner, P. and Vogel-Heuser, B., "Industrie 4.0 am Beispiel einer Verbundanlage - Aspekte der Modellierung und dezentralen Architektur", In atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, vol. 07-08, no. 56, pp. 52-61, 2014.
3. Молдованова ОВ. Способи організації паралельних обчислень в задачах моделювання шахтних вентиляційних мереж [дисертація]. Донецьк: ДонНТУ; 2008. 150 с.
4. Kushnarenko, V., Resch, M., Svjatnyj, V. & Wesner, S., "Zur Entwicklung des Gleichungslösersubsystems der verteilten parallelen Simulationsumgebung" (2014). ASIM 2014-22.

Symposium Simulationstechnik: 3. bis 5. September 2014; HTW Berlin. Wien: Argesim/Asim.

5. Дмитрієва, ОА. Паралельне моделювання динамічних об'єктів зі сконцентрованими параметрами [Текст] / О.А. Дмитрієва. – Харків : «Нолідж». – 2014. – 336 с. – ISBN 978-617-579-990-1.

6. Dmitrieva, O. & Feldman, L. (2013). Parallel Step Control Development of parallel algorithms of the step variation for simulation of stiff dynamic systems. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

7. Dmitrieva, O. & Firsova, A. (2012). Parallel Algorithms Of Simulation Increase of simulation of dynamic objects with the lumped parameters into parallel computer systems. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

8. Ishak F., Suleiman M.B., Majid Z.A. (2014) Numerical Solution and Stability of Block Method for Solving Functional Differential Equations. In: Yang GC., Ao SI., Gelman L. (eds) Transactions on Engineering Technologies. Springer, Dordrecht.

References

1. Abramov, F A, Feldman, L P & Svyatnyy, V A. (1981). Simulation of dynamic processes of mine aerology [Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov rudnichnoy aerologii]. Kiev: Naukova dumka.

2. Weyrich, M., Diedrich, Ch., Fay, A., Wollschlaeger, M. and Kowalewski, S., Göhner, P. and Vogel-Heuser, B., "Industrie 4.0 am Beispiel einer Verbundanlage - Aspekte der Modellierung und dezentralen Architektur", In atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, vol. 07-08, no. 56, pp. 52-61, 2014.

3. Moldovanova OV. Ways of organizing parallel computations in the problems of modeling mine venting networks [Sposoby orhanizatsii paralelnykh obchyslen v zadachakh modeliuvannia shakhtnykh ventilyatsiinykh merezh] [Dissertational work], Donetsk: DonNTU; 2008. 150 p.

4. Kushnarenko, V., Resch, M., Svjatnyj, V. & Wesner, S., "Zur Entwicklung des Gleichungslösersubsystems der verteilten parallelen Simulationsumgebung" (2014). ASIM 2014-22. Symposium Simulationstechnik: 3. bis 5. September 2014; HTW Berlin. Wien: Argesim/Asim.

5. Dmytriieva, OA. Parallel simulation of dynamic objects with lumped parameters [Paralelne modeliuvannia dynamicnykh ob'ektiv iz zoseredzhenymy parametramy] [Text] // O.A. Dmytriieva. – Kharkiv: «Noulidzh». – 2014. – 336 p. – ISBN 978-617-579-990-1.

6. Dmitrieva, O. & Feldman, L. (2013). Parallel Step Control Development of parallel algorithms of the step variation for simulation of stiff dynamic systems. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

7. Dmitrieva, O. & Firsova, A. (2012). Parallel Algorithms Of Simulation Increase of simulation of dynamic objects with the lumped parameters into parallel computer systems. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing.

8. Ishak F., Suleiman M.B., Majid Z.A. (2014) Numerical Solution and Stability of Block Method for Solving Functional Differential Equations. In: Yang GC., Ao SI., Gelman L. (eds) Transactions on Engineering Technologies. Springer, Dordrecht.

Надійшла до редакції 29.04.2018

Рецензент д-р. техн. наук, проф. С.В.Подкопаєв.

Svyatnyy Volodymyr Andriiovych – doctor of technical sciences, professor, Head of Computer Engineering Department, SHEE “Donetsk National Technical University” (Shibankova sq., 2, Pokrovsk, 85302, Ukraine)

E-mail: svsвятныj@gmail.com

Kushnarenko Volodymyr Hennadiiovych – academic employee, Institute of Information Resource Management, Ulm University (Albert-Einstein-Allee, 43, 89081 Ulm, Germany).

E-mail: volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

Miroshkin Oleksandr Mykolaiovych – candidate of technical sciences, docent, academic employee, Infrastructure department, Kommunikation and Information Centre, Ulm University (Albert-Einstein-Allee, 11, 89081 Ulm, Germany).

E-mail: miroshkinan@gmail.com

РОЗРОБКА ПАРАЛЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ШАХТНИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Стаття має за мету презентувати шахтні вентиляційні мережі (ШВМ) як об'єкти автоматизації та складні динамічні системи з розподіленими параметрами, запропонувати підходи до паралельного моделювання аеродинамічних процесів і ШВМ-орієнтовані паралельні засоби для модельної підтримки вирішення задач безпеки підземних робіт. Методологічно розрізняються аеро- і газодинамічні процеси. Математична модель аеродинаміки ШВМ описується диференціальними рівняннями в частинних похідних. Зовнішні і внутрішні граничні умови сформульовано з врахуванням структури графа мережі і наявності засобів регулювання

повітряних потоків. Декомпозиція ШВМ дозволяє вивести рівняння для всіх видів шахтних виробок з врахуванням гірничо-технічних умов. Шляхом апроксимації гілок графа ШВМ за методом прямих отримуються дискретизовані вздовж просторових координат моделі і simulation-моделі ШВМ як об'єкта з розподіленими параметрами. Формулюються важливі з позиції технології паралельного моделювання визначення МІМД-процесів мінімальної гранулярності, віртуальних паралельних ШВМ-simulation-моделей, процесу девіртуалізації та паралельного ШВМ-симулятора. В якості нової важливої компоненти паралельного ШВМ-симулятора пропонується вирішувач рівнянь, побудований на основі блокових обчислювальних методів (БОМ), що імplementований, випробуваний і проаналізований на прикладі тестової мережі. Результати моделювання показують, що застосування БОМ має хороші перспективи. Блокові методи відрізняються від традиційних послідовних методів вищою точністю і сходимістю, кращим співвідношенням між точністю й швидкістю. Пропонується новий підхід до розпаралелювання ШВМ як об'єкта паралельного моделювання: віртуальні БОМ-дискретизовані ШВМ-simulation-моделі реалізуються на чотирьох рівнях розпаралелювання: „Одне рівняння – один МІМД-процес“, „Один елемент апроксимації – один МІМД-процес“, „Одна гілка – один МІМД-процес“ та „Один фрагмент графа – один МІМД-процес“. На основі моделей, simulation-моделей, симуляторів і віртуальних рівнів розпаралелювання запропоновано концепцію ШВМ-орієнтованого розподіленого паралельного моделюючого середовища (РПМС) як нової системної організації паралельних обчислювальних ресурсів. Паралельні РПМС-симулятори будуть застосовуватись для модельної підтримки розробок автоматизованих вугільних шахт як об'єктів індустрії-4.0. Запропоновані підходи та рішення дійсні і для моделей газодинамічних процесів ШВМ. Отриманий досвід паралельного моделювання ШВМ слугує розвитку подальших робіт в галузі технологій паралельного моделювання (ParSimTech), а також в таких областях ParSimTech-застосувань як гірництво, енергетика, металургія, машинобудування та різних технологій.

Ключові слова: шахтна вентиляційна мережа; модель аеродинаміки; паралельні технології моделювання; віртуальні рівні розпаралелювання; девіртуалізація; паралельний симулятор; розподілене паралельне моделююче середовище.

Святний Володимир Андрійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, кафедра комп'ютерної інженерії, ДВНЗ “Донецький національний технічний університет” (пл. Шибанкова, 2, Покровськ, 85302, Україна)

E-mail: vsvjatnyj@gmail.com

Кушнарєнко Володимир Геннадійович – науковий співробітник, Інститут організації та управління інформаційними системами, Університет Ульма (Алея Альберта Ейнштейна, 43, 89081 Ульм, Німеччина).

E-mail: volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

Мірошкін Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник, Відділ інфраструктури, Комунікаційно-інформаційний центр, Університет Ульма (Алея Альберта Ейнштейна, 11, 89081 Ульм, Німеччина).

E-mail: miroshkinan@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ

Статья имеет целью представить шахтные вентиляционные сети (ШВС) как объекты автоматизации и сложные динамические системы с распределенными параметрами, предложит подходы к параллельному моделированию аэродинамических процессов и ШВС-ориентированные параллельные средства для модельной поддержки решения задач безопасности подземных работ. Методологически различаются аэро- и газодинамические процессы. Математическая модель аэродинамики ШВС описывается дифференциальными уравнениями в частных производных. Внешние и внутренние граничные условия сформулированы с учетом структуры графа сети и наличия средств регулирования воздушных потоков. Декомпозиция ШВС позволяет вывести уравнение для всех видов шахтных выработок с учетом горно-технических условий. Путем аппроксимации ветвей графа ШВС по методу прямых получают дискретизованные вдоль пространственных координат модели и simulation-модели ШВС как объекта с распределенными параметрами. Формулируются важные с позиций технологий параллельного моделирования определения МІМД-процессов минимальной гранулярности, виртуальных параллельных ШВС-simulation-моделей, процесса девіртуалізації и параллельного ШВС-симулятора. В качестве новой важной компоненты параллельного ШВС-симулятора предлагается решатель уравнений, построенный на основе блочных числительных методов (БЧМ), что имплементирован, испытан и проанализирован на примере тестовой сети. Результаты моделирования показывают, что применение БЧМ имеет хорошие перспективы. Блочные методы отличаются от традиционных последовательных методов высокой точностью и сходимостью, лучшим соотношением между точностью и скоростью. Предлагается новый подход к распараллеливанию ШВС как объекта параллельного

моделирования: виртуальные БЧМ-дискретизированные ШВС-simulation-модели реализуются на четырех уровнях распараллеливания: "Одно уравнение – один МІМD-процесс", "Один элемент аппроксимации – один МІМD-процесс", "Одна ветвь – один МІМD-процесс" и "Один фрагмент графа – один МІМD-процесс". На основе моделей, simulation-моделей, симуляторов и виртуальных уровней распараллеливания предложена концепция ШВС-ориентированной распределенной параллельной моделирующей среды (РПМС) как новой системной организации параллельных вычислительных ресурсов. Параллельные РПМС-симуляторы будут применяться для модельной поддержки разработок автоматизированных угольных шахт как объектов индустрии-4.0. Предложенные подходы и решения действительны и для моделей газодинамических процессов ШВС. Полученный опыт параллельного моделирования ШВС служит развитию дальнейших работ в области технологий параллельного моделирования (ParSimTech), а также в таких областях ParSimTech-применений как горная промышленность, энергетика, металлургия, машиностроение и различных технологий.

Ключевые слова: шахтная вентиляционная сеть; модель аэродинамики; параллельные технологии моделирования; виртуальные уровни распараллеливания; девиртуализация; параллельный симулятор; распределенная параллельная моделирующая среда.

Святный Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра компьютерной инженерии, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, Покровск, Украина)

E-mail: vsvjatnyj@gmail.com

Кушнарено Владимир Геннадьевич – научный сотрудник, Институт организации и управления информационными системами, Университет Ульма (Аллея Альберта Эйнштейна, 43, 89081 Ульм, Германия).

E-mail: volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

Мирошкин Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Отдел инфраструктуры, Коммуникационно-Информационный Центр, Университет Ульма (Аллея Альберта Эйнштейна, 11, 89081 Ульм, Германия).

E-mail: miroshkinan@gmail.com