

Hana- Michael Hanisch

Technische Hochschule "Carl Schorlemmer"
Leuna- Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik
Otto- Nuschke- Straße
Merseburg, 4200
DDR

KOORDINIERUNGSSTEUERUNG FLEXIBLER PRODUKTIONSSYSTEME DER CHEMISCHEN INDUSTRIE MITTELS PETRI- NETZEN

Zusammenfassung. Im Beitrag wird die Anwendung von Petri- Netzen für die Modellierung, Analyse und Simulation diskontinuierlicher flexibler Produktionssysteme der chemischen Industrie gezeigt. An einem konkreten betrieblichen Anwendungsbeispiel werden die Modellierung beschränkter Ressourcen und die Kopplung mit kontinuierlich betriebenen Teilsystemen sowie die Auswirkungen solcher Kopplungen auf das Gesamtverhalten des Systems dargestellt. Auf der Grundlage solcher Untersuchungen lassen sich geeignete Steuerstrategien des Systems sowohl für den ungestörten als auch den gestörten Betrieb ableiten.

1. Einleitung

Flexible Produktionssysteme der chemischen Industrie stellen eine große Anzahl sehr mannigfaltiger Steuerungsaufgaben, die in dem im Bild 1 dargestellten hierarchischen System geordnet werden können.

Solche Produktionssysteme bestehen gewöhnlich aus mehreren, vorwiegend diskontinuierlich betriebenen Teilsystemen, die unterschiedliche Teilprozesse realisieren. Typisch sind solche Teilprozesse wie Dosierung, Reaktion, Kristallisation, Filtration, Trocknung, die z.T. in demselben, meist jedoch in verschiedenen Apparaten parallel zueinander ausgeführt werden.

Auf Grund der diskontinuierlichen Teilprozesse sind auch die technologisch notwendigen Stoff- und Energieflüsse zwischen den Teilsystemen diskontinuierlich, d.h., sie beginnen und enden zu diskreten Zeitpunkten. Beginn und Ende der Stoff- und Energieflüsse sind abhängig von den Zuständen der zu koppelnden Teilsysteme.

Weitere Kopplungen ergeben sich durch beschränkte Ressourcen, wie z.B. Dosiervorlagen, Heiz- und Kühlsysteme usw., die oft nur von jeweils einem, zumindest aber nicht von allen Teilsystemen gleichzeitig genutzt werden dürfen.

Die aus diesen Kopplungen resultierenden Steuerungsaufgaben sind der Synchronisations- und Koordinierungsebene zuzuordnen (Bild 1). Die

Kommunikation zwischen den Steuerungsprozessen auf der Synchronisations- und Koordinierungsebene und denen der untergeordneten Steuerungsebenen erfolgt durch diskrete (meist binäre) Signale, die sehr komplexe Zustände des Steuerungsobjektes ausdrücken (Prozeßinformationen) bzw. umfangreiche Abläufe im Steuerungsobjekt auslösen (Steuerinformationen).

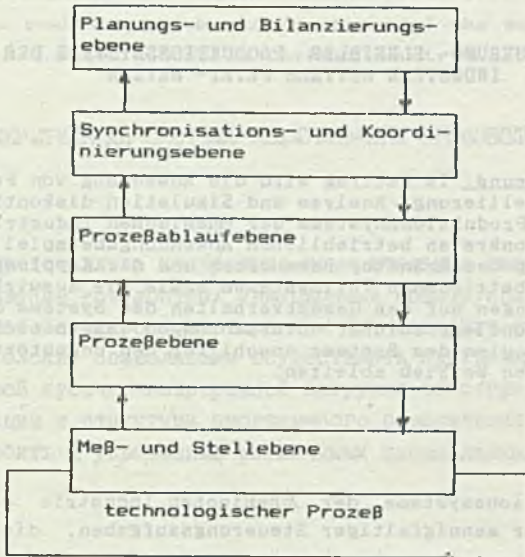


Bild 1: Hierarchisches Steuerungssystem

Das Problem besteht somit in der Steuerung diskreter paralleler Prozesse. Aufgabe der Koordinierungssteuerung ist es, die Abläufe in den einzelnen Teilsystemen so zu steuern, daß

1. Überlastungen beschränkter Ressourcen ausgeschlossen werden
2. die notwendigen Stoff- und Energieflüsse realisiert werden
3. eine das Produktionsziel kennzeichnende Zielfunktion extremiert wird.

Sowohl für die Analyse des Steuerungsobjektes als auch für den Entwurf der Steuereinrichtung sind geeignete mathematische Modelle notwendig, die vor allem die Beschreibung paralleler Abläufe ermöglichen. Dafür haben sich Petri-Netze als die beste Modellform erwiesen.

2. Petri- Netz- Modellierung

2.1. Modellform

Oft werden Petri- Netze mit Bedingung/Ereignis- Systemen (abgekürzt: B/E- Systemen) gleichgesetzt. Tatsächlich sind B/E- Systeme jedoch nur eine, nämlich die einfachste Klasse von Petri- Netzen. Die Modellierungsmöglichkeiten der einzelnen Netzklassen unterscheiden sich beträchtlich:

- B/E- Systeme können für einfache Kopplungen in Systemen geringer Größenordnung Anwendung finden.
- Stellen/Transitionen- Netze (abgekürzt: S/T- Netze) eignen sich für die Modellierung von Systemen mittlerer Größenordnung und Komplexität.
- Prädikat/Transitionen- Netze (abgekürzt: Pr/T- Netze) werden für die Modellierung komplizierter Kopplungen in sehr großen Systemen (typisch: Mehrprodukt- oder Mehrzweckanlagen) herangezogen.

Die größeren Modellierungsmöglichkeiten der S/T- Netze und vor allen der Pr/T- Netze werden durch einen gegenüber den B/E- Systemen wesentlich komplizierteren mathematischen Formalismus erreicht, der in /1-4/ beschrieben ist.

Um den formalen mathematischen Apparat der Petri- Netze auf konkrete Problemstellungen anwenden zu können, müssen den Netzelementen und Netzeigenschaften Elemente und Eigenschaften des zu modellierenden Systems bzw. der Klasse zu modellierender Systeme zugeordnet werden. Eine solche Zuordnung heißt in der Terminologie der Petri- Netze eine Interpretation. Eine spezielle Interpretation zur Petri- Netz- Modellierung technologischer Prozesse für alle drei Netzklassen wird in /5-7/ angegeben. Damit lassen sich die Aufgaben 1. und 2. (vgl. Abschnitt 1.) der zu entwerfenden Koordinierungssteuerung lösen. Durch die Interpretation beschreibt das Netzmodell die Einheit von Steuerungsobjekt und Steuereinrichtung, wodurch die zu realisierende Koordinierungssteuerung eindeutig im Modell dargestellt ist. Eine solche Vorgehensweise eignet sich dann, wenn durch das Modell lediglich bereits vorhandene Vorstellungen zur Funktion der Koordinierungssteuerung formal dargestellt und auf ihre logische Korrektheit und Sinnfälligkeit getestet werden sollen.

2.2. Zeitbewertung

Bezüglich der Aufgabe 3. ist die Vorgehensweise bei der Modellierung und Analyse des Steuerungsobjektes sowie der Bestimmung der optimalen Steuerung in /8-10/ dargelegt. Bei solchen Untersuchungen geht es darum, eine a priori unbekannte Steuerung auf der Grundlage eines Modells des Steuerungsobjektes zu ermitteln. Grundlage für solche und auch für einfachere Untersuchungen zu Leistungskenngrößen des gesteuerten Systems (Durchsatz, Ressourcenauslastung u.ä.) ist eine Zeitbe-

wertung ausgewählter Netzelemente mit den Zeitdauern der korrespondierenden technologischen Teilprozesse.

Verschiedene Zeitbewertungskonzepte für B/E-Systeme und S/T-Netze werden in /11/ beschrieben. Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf S/T-Netze, da auch das Beispiel im Abschnitt 3. mittels S/T-Netzen modelliert wurde.

Für die Modellierung diskontinuierlicher Produktionssysteme hat es sich in vielen Fällen bewährt, den technologischen Teilprozesse verkörpernden Stellen Zeiten zuzuordnen, die angeben, wie lange eine Marke mindestens auf der Stelle verbleiben muß, ehe sie durch das Schalten einer Transition diese Stelle wieder verlassen darf. Dazu wird jeder zeitbewerteten Stelle eine lokale Uhr zugeordnet, die auf Null steht, falls die Stelle nicht markiert ist und anderenfalls die Zeit angibt, die seit der Markierung dieser Stelle schon vergangen ist /8/.

Eine Transition in einem zeitbewerteten Petri-Netz schaltet genau dann, wenn sie Konzession hat und gerade die letzte Uhr ihrer Vorstellen abgelaufen ist. Somit wird durch sukzessives Schalten der Transitionen ein diskreter Prozeß erzeugt, der das dynamische Verhalten des Steuerungsobjektes beinhaltet.

3. Anwendungsbeispiel

Gegenstand der Untersuchungen ist eine diskontinuierliche Anlage zur Kunstharzproduktion. Bild 2 zeigt das Blockschema. Die wesentlichen Teilprozesse sind in Tafel 1 beschrieben.

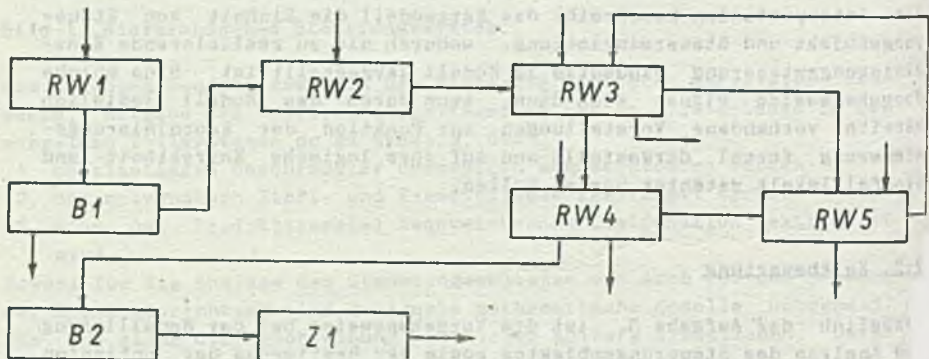


Bild 2: Blockschema

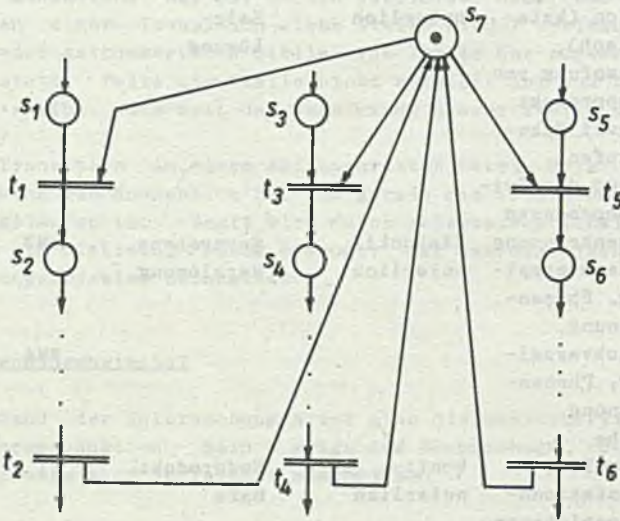
Verfahrens- stufe	wichtigste Teilprozesse	Betriebs- weise	Produktions- ergebnis	Apparate (Bild 2)
Grundstoff- synthese	Kondensation, Destillation (Normaldruck), Vakuumdestil- lation, Entwässerung	diskonti- nuierlich	Grundstoff	RW1
Harzsynthese	Vorkonden- sation (kata- lytisch), Abdampfung von Nebenprodukt in zwei Vaku- umstufen, Lösung des Zwi- schenprodukts	diskonti- nuierlich	Harz- Salz- Lösung	RW2
Phasentren- nung, Nach- verseifung, Wäsche	Phasentrennung, diskonti- nuierlich 1. Nachversei- fung, Phasen- trennung, 2. Nachversei- fung, Phasen- trennung, Wäsche		gewasohene Harzlösung	RW3
				RW4
Lösungsmi- telabdampfung	Abdampfung in Rotations- dünnschichtver- dampfern unter Vakuum	konti- nuierlich	Endprodukt Harz	Z1
Schlamm- aufbereitung	Waschen, Phasentrennung	diskonti- nuierlich	gelöste Harzphase, harzfreie Schlamm- phase	RW5

Tafel 1: Teilprozesse

Außer durch Stoffflüsse sind die Teilprozesse durch Hilfs- und Nebenprozesse gekoppelt. Diese Hilfs- und Nebenprozesse stellen beschränkte Ressourcen dar, d.h., ihre Kapazitäten reichen nicht für alle Teilprozesse gleichzeitig aus. In hier betrachteten Beispiel sind solche beschränkten Ressourcen u.a.:

- Heizmittelsystem
- Vakuumsystem
- Stickstoffbeatmungssystem
- Kohlendioxidbeatmungssystem.

Bild 3 zeigt, wie solche beschränkten Ressourcen im Petri-Netz-Modell dargestellt werden. Die Transitionen t_1 , t_3 , t_5 stellen den Beginn jener Teilprozesse dar, in denen von jeweiligen Teilsystem eine beschränkte Ressource (z.B. das Heizmittelsystem) benötigt wird. Die Transitionen t_2 , t_4 , t_6 repräsentieren das Ende dieser Teilprozesse und die damit verbundene Ressourcenfreigabe. Im Beispiel wird angenommen, daß die Ressource exklusiv genutzt werden soll. Die Modellierung nichtexklusiver Ressourcennutzung wird in /5/ beschrieben.



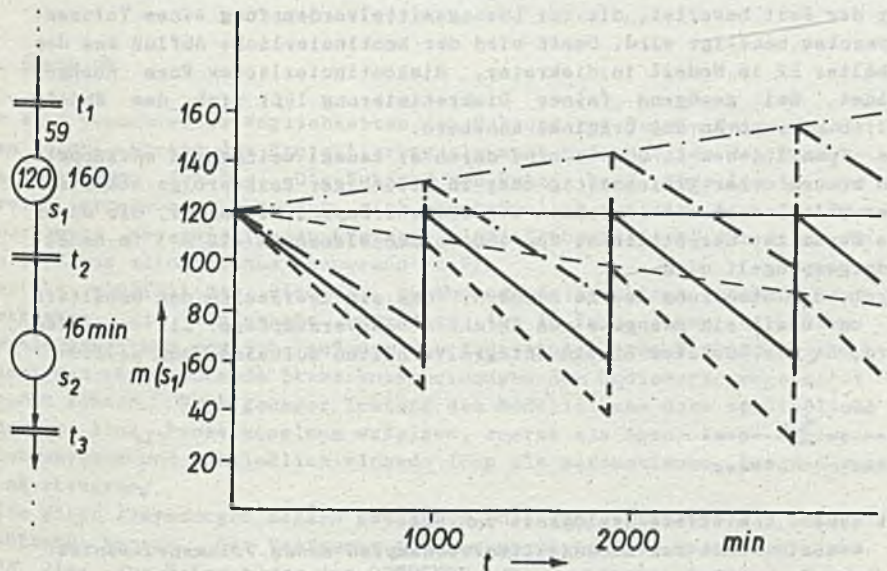
s_1	RW1 wartet auf freies Heizmittelsystem	t_1	Beginn des Heizens in RW1
s_2	RW1 benutzt Heizmittelsystem	t_2	Ende des Heizens in RW1
s_3	RW2 wartet auf freies Heizmittelsystem	t_3	Beginn des Heizens in RW2
s_4	RW2 benutzt Heizmittelsystem	t_4	Ende des Heizens in RW2
s_5	RW5 wartet auf freies Heizmittelsystem	t_5	Beginn des Heizens in RW5
s_6	RW5 benutzt Heizmittelsystem	t_6	Ende des Heizens in RW5
s_7	Heizmittelsystem frei		

Bild 3: Kopplung durch eine beschränkte Ressource

Die Marke auf der Stelle s_7 gibt an, daß die Ressource verfügbar ist. Durch Schalten von t_1 oder t_3 oder t_5 (exklusiv) wird die Marke von s_7 entfernt. Dies widerspiegelt die Nutzung der Ressource im jeweiligen Teilprozeß. Andere Teilprozesse, die nun ebenfalls die Ressource nutzen wollen, müssen solange warten, bis der die Ressource beanspruchende Teilprozeß abgelaufen ist, d.h. in Modell durch das Schalten von t_2

oder t_4 oder t_6 die Stelle s_7 wieder markiert wurde. Bewerben sich mehrere Teilprozesse gleichzeitig um die Ressource, haben also mehrere der Transitionen t_1 , t_3 , t_5 Konzession, so liegt ein Konflikt vor. Im Rahmen des Modells ist nicht determiniert entscheidbar, welches der Teilsysteme die Ressource erhält und welches warten muß. Zur determinierten Konfliktlösung sind zusätzliche Informationen aus der Systemumgebung, d.h. Steuereingriffe, nötig.

Der Betrieb des Systems wird weiter dadurch verkompliziert, daß der Verdampfer Z1 (Bild 2) kontinuierlich betrieben wird und gesichert werden muß, daß in Behälter B2 ständig Produkt zur Verdampfung vorhanden ist.



- | | | | |
|-------|--|-------|--|
| s_1 | B2 enthält $n(s_1) \cdot 0,1 \text{ m}^3$ Produkt | t_1 | Ablassen einer Charge aus RW4 nach B2 |
| s_2 | Lösungsmittelverdampfung von $0,1 \text{ m}^3$ Produkt | t_2 | Start des Lösungsmittelverdampfens für $0,1 \text{ m}^3$ Produkt |
| | | t_3 | Ende des Lösungsmittelverdampfens für $0,1 \text{ m}^3$ Produkt |

- - - $trw_4 < 59 \cdot t_{verd}$
- $trw_4 = 59 \cdot t_{verd}$
- - - $trw_4 > 59 \cdot t_{verd}$

Bild 4: Kopplung diskontinuierlicher/kontinuierlicher Teilprozesse

Solche Kopplungen von kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitenden Teilsystemen lassen sich sehr vorteilhaft mittels S/T- Netzen modellieren, indem die Massenbilanz für einen Speicher diskretisiert und auf den Markenfluß im Modell abgebildet wird.

Bild 4 zeigt ein Beispiel. Die Stelle s_1 modelliert den Speicherbehälter B2. Die Zahl der auf s_1 befindlichen Marken gibt das Speichervolumen in diskreten Volumenelementen von $0,1 \text{ m}^3$ an. Durch die Transition t_1 werden die Kopplungen von vorhergehenden, diskontinuierlich arbeitenden Teilsystem RW4 modelliert. Beim Schalten von t_1 werden 59 Marken auf die Stelle s_1 gebracht. Das modelliert das Ablassen einer kompletten Charge mit einem Volumen von $5,9 \text{ m}^3$ aus RW4 in den Behälter B2. Die Transition t_2 beschreibt den Beginn und die Transition t_3 das Ende des Verdampfens eines Volumenelementes im nachgeschalteten Verdampfer Z1. Die dazwischenliegende Stelle s_2 wird mit der Zeit bewertet, die zur Lösungsmittelverdampfung eines Volumenelementes benötigt wird. Damit wird der kontinuierliche Abfluß aus dem Behälter B2 im Modell in diskreter, diskontinuierlicher Form nachgebildet. Bei genügend feiner Diskretisierung läßt sich das Modell beliebig genau an das Original annähern.

Die Transitionen t_1 und t_2 sind durch s_1 kausal weitgehend entkoppelt und können daher gleichzeitig oder in beliebiger Reihenfolge schalten. Dies gilt jedoch nur im Rahmen der Speicherkapazität von B2, die durch die Kapazität der Stelle s_1 von 160 Volumenelementen (16 m^3) im Modell widergespiegelt wird.

Durch die Steuerung ist zu sichern, daß ein Leerlaufen des Behälters B2 und damit ein zwangsweises Abfahren des Verdampfers Z1 vermieden wird. Da der Behälter B2 ein Integralverhalten aufweist, muß gelten:

$$\frac{59}{tr_{w4}} \geq \frac{1}{tv_{erd}} \quad /1/$$

mit tr_{w4} ... mittlere Zykluszeit von RW4

tv_{erd} ... Zeit zum Lösungsmittelverdampfen eines Volumenelementes.

Für den Fall, daß tr_{w4} kleiner als $59 \cdot tv_{erd}$ ist, läuft der Behälter B2 voll (siehe Bild 4). Die Folge davon ist, daß ein Produktstau in den vorgelagerten Teilsystemen auftritt, wodurch Beeinträchtigungen der Produktqualität entstehen können. Um dies zu vermeiden, müssen die Ansatzzeitpunkte für die nächsten Chargen in den vorgelagerten Teilsystemen verändert werden. Dies kann jedoch dazu führen, daß auf Grund der beschränkten Kapazitäten der Hilfs- und Nebenprozesse nunmehr zusätzliche Behinderungen der Teilprozesse untereinander entstehen (siehe Bild 3). Diese bewirken Verzögerungen in den Prozeßabläufen, damit eine Vergrößerung von tr_{w4} und letztendlich wieder das Leerlaufen von Behälter B2.

Gesucht ist somit ein solches Verhältnis von tr_{w4} und tv_{erd} , daß

59 1

1. die Beziehung $\frac{trw_4}{trw_4} = \frac{tv_{erd}}{tv_{erd}}$ gilt.

trw_4 tv_{erd}

2. trw_4 tatsächlich unter Berücksichtigung o.g. beschränkter Ressourcen in System realisiert werden kann

3. tv_{erd} minimiert wird.

Eine solche Steuerstrategie gewährleistet den maximalen Durchsatz des Systems und kann mit Hilfe des Petri- Netz- Modells durch Simulation oder auf analytischem Wege gefunden werden. Sie ist für das hier dargestellte Beispiel in /12,13/ angegeben.

Weiterhin können die verschiedensten Störungen mit in das Modell einbezogen und somit auch optimale Steuerungen für vorgegebene Störungen berechnet werden.

4. Abschluß

Es sind verschiedene Möglichkeiten der Nutzung von Petri- Netz- Modellen sowohl während der Projektierung als auch beim Betrieb von Produktionssystemen denkbar. Die Nutzung von Petri- Netz- Modellen in der Projektierungsphase bezieht sich hauptsächlich auf die formale Beschreibung der ablaufenden Prozesse als Aufgabenstellung für eine zu entwerfende automatische Steuerung /5-7/.

Weitaus vielfältiger sind die Anwendungsmöglichkeiten während des Betriebes. Die einfachste Anwendung ist in Form eines off- line- Beratungssystems möglich, auf dem die Auswirkungen von Störungen simuliert und entsprechende Steuerentscheidungen des Bedieners abgeleitet werden können. Nach genauer Testung des Modells kann dann schließlich eine on- line- Prozeßkopplung erfolgen, zuerst als open- loop- Überwachungssystem und schließlich closed- loop als automatische Koordinierungssteuerung.

Alle diese Anwendungen setzen geeignete Software- Werkzeuge als Unterstützung voraus. Der Verfasser nutzt gegenwärtig die Programmsysteme PAN /14/ zur Netzanalyse und PETRINET /15/ zur Simulation. Beide Systeme sind auf Personal- Computern implementiert und nicht on- line nutzbar. Zumindest läßt sich durch die bisherigen Untersuchungen die Möglichkeit einer on- line- Steuerung auf der Basis von Petri- Netz- Modellen im Echtzeitbetrieb bestätigen. Für eine solche Steuerung muß jedoch andere Softwareunterstützung entwickelt und implementiert werden. Grundlegende Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit leistungsfähiger, freiprogrammierbarer PC- Technik mit entsprechender Prozeßkopplung.

LITERATUR

- /1/ Brauer, W. (Edit.): Net Theory and Applications. Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- /2/ Starke, P.: Petri-Netze. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1980.
- /3/ Reisig, W.: Petri-Netze. Eine Einführung. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1982.
- /4/ Genrich, H.J.; Lautenbach, K.: System Modelling With High-Level Petri Nets. Theoretical Computer Science, 13 (1981), 109-136.
- /5/ Hanisch, H.-M.: Mathematische Modellierung diskreter Steuerungsaufgaben in diskontinuierlichen verfahrenstechnischen Systemen. Dissertation(A), Technische Hochschule Leuna-Merseburg, 1987.
- /6/ Helms, A.; Hanisch, H.-M.; Stephan, K.: Steuerung von Chargenprozessen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1989.
- /7/ Hanisch, H.-M.: Coordination Control Modelling in Batch Production Systems by means of Petri Nets. Computers & Chemical Engineering, to appear.
- /8/ Hanisch, H.-M.: Dynamik von Koordinierungssteuerungen in diskontinuierlichen verfahrenstechnischen Systemen. at, erscheint demnächst.
- /9/ Hanisch, H.-M.: Operative Steuerung in diskontinuierlichen Produktionssystemen auf Petri-Netz-Basis. Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, erscheint demnächst.
- /10/ Hanisch, H.-M.: Dynamische Analyse diskreter Koordinierungssteuerungen in diskontinuierlichen verfahrenstechnischen Systemen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Leipzig, erscheint demnächst.
- /11/ König, R.; Quäck, L.: Petri-Netze in der Steuerungstechnik. VEB Verlag Technik, Berlin, 1988.
- /12/ Thiemicke, K.; Hanisch, H.-M.: Prozeßanalyse einer diskontinuierlichen Anlage zur Kunstharzproduktion mit Petri-Netzen. msr(Berlin), erscheint demnächst.
- /13/ Thiemicke, K.: Weiterführende Untersuchungen zur Koordinierungssteuerung einer diskontinuierlichen Produktionsanlage bei Störungen. Diplomarbeit, Technische Hochschule Leuna-Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik, 1980.
- /14/ Der NET-Analysator PAN. PSI GmbH (1989).
- /15/ Hanisch, H.-M.: Programmsystem PETRINET (Version 2.2. DCP), Bedienungsanleitung, Technische Hochschule Leuna-Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik, 1989.

Recenzent: Prof.dr inż.H.Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1990-04-30.

STEROWANIE KOORDYNUJĄCE ELASTYCZNYM SYSTEMEM PRODUKCYJNYM W PRZEMYSŁE CHEMICZNYM Z WYKORZYSTANIEM SIECI PETRIEGO**S t r e s z c z e n i e**

W artykule przedstawiono zastosowanie sieci Petriego do modelowania, analizy i symulacji nieciągłych elastycznych systemów produkcyjnych w przemyśle chemicznym. Na przykładzie konkretnego zastosowania pokazano modelowanie ograniczonych zasobów, sprzężenie z funkcjonującymi ciągle podsystemami, jak i oddziaływanie takich sprzężeń na działanie systemu. Na podstawie tych badań sformułowano odpowiednie strategie sterowania systemem dla pracy bez zakłóceń i dla pracy z zakłóceniami.

КООРДИНИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ГПС ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ**Р е з ю м е**

В статье представлены проблемы применения сетей Петри для математического моделирования, анализа и имитационного моделирования дискретных ГПС в химической промышленности. На примере конкретного применения показаны: моделирование ограниченных ресурсов, сопряжение с действующими непрерывно подсистемами, а также воздействие таких сопряжений на действие всей системы. На основе этих исследований дана формулировка соответствующих стратегии управления системой в случае работы системы без помех и в случае работы с помехами.