JANAP - EIN PROGRAMM ZUR SIMULATION DES ZEITVERHALTENS VON NICHTLINEAREN ELEKTRISCHEN SCHALTUNGEN

J.Demel und S.Selberherr
Abteilung für Physikalische Elektronik
Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik
TU Wien / Österreich

1. Einleitung

Die derzeit hauptsächlich in Verwendung stehenden Netzwerkanalyseprogramme wie SPICE /1/, ASTAP /2/ und NAP2 /3/, sind alle Anfang der 70iger Jahre entwickelt worden. Danach sind im wesentlichen nur mehr Programme entstanden, die sich auf spezielle Aspekte wie die Logik- oder Timing-Simulation digitaler Schaltungen /4/ oder Switched Capacitor Schaltungen /5/ konzentrieren und dadurch für diese Anwendungen eine sehr hohe Wirkung erzielen, jedoch für allgemeine Anwendungen der Netzwerksimulation nicht einsetzbar sind.
Die Nachteile der derzeit verfügbaren Netzwerkanalyseprogramme können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Durch die verwendeten Simulationsmethoden werden zum Teil sehr große Einschränkungen bei den darstellbaren Bauelementen, insbesondere bei der Modellierung von nichtlinearen Bauelementen, gemacht.
- Die Modelle für die Halbleiterbauelemente sind meistens fix in das Programm und die verwendeten Algorithmen eingebaut und sind daher nur sehr schwer änderbar, wenn neue Modelle auszuprobieren sind.
- Die verwendeten numerischen Algorithmen entsprechen infolge des Alters der Programme häufig nicht dem Stand der Technik.

Das Ziel von JANAP ist die Entwicklung eines allgemeinen Programms zur Simulation von nichtlinearen elektrischen Netzwerken mit den Schwerpunkten:

- Keine unnötigen Einschränkungen bei der Beschreibung der Bauelemente, insbesondere auf dem Gebiet der Nichtlinearitäten.
- Eine sehr flexible Modellierung von Halbleiterbauelementen bis zu Macromodellen.
- Verwendung des aktuellen Standes auf dem Gebiet der mathematischen Methoden.

2. JANAP aus der Sicht des Anwenders

Der folgenden Tabelle sind die in JANAP direkt realisierten Bauelemente und deren Elementgleichungen zu entnehmen:

	Bezeichnung	i	v	q	φ	r	s
I	Stromquelle	I		0	0	0	
V	Spannungsquelle		V	0	0		0
R	Widerstand		$R \cdot i$	0	0		
G	Leitwert	$G \cdot v$		0	0		
C	Kondensator	$\frac{dq}{dt}$		$C \cdot v$	0	0	
L	Induktivität		$\frac{d\varphi}{dt}$	0	$L \cdot i$		0
S	Schalter offen	0		0	0	0	
	Schalter zu		0	0	0		0
M	Kopplung				$+k_{ij} \cdot \varphi_i$		
U	Universalelement	f	f	f	f	f	f

Bei der Angabe des Wertes eines Bauelements kann neben der bei allen Netzwerkanalyseprogrammen unterstützten Konstanten auch ein praktisch beliebiger Ausdruck angegeben werden, der auch Funktionen, Tabellen und Werte von anderen Bauelementen enthalten kann. Neben einer Reihe von Standardfunktionen kann der Benutzer eigene Funktionen und externe Funktionen verwenden.
Zusätzlich steht das "Universalelement" zur Verfügung, mit dem die Darstellung praktisch beliebiger Bauelemente möglich ist.
Schaltungsteile können zu Subcircuits zusammengefaßt werden, die wieder zu Subcircuit-Bibliotheken zusammengefaßt werden können. Bei der Verwendung eines Subcircuits werden neben der aktuellen Knotenliste dem Subcircuit auch noch Parameter-Werte, Funktions- und Tabellennamen übergeben, die bei der Beschreibung der Bauelemente verwendet werden können.
JANAP hat keine eingebauten Modelle für Halbleiterbauelemente wie z.B. SPICE, sondern die Modelle sind durch Subcircuits, die in Standardbibliotheken zur Verfügung stehen, beschrieben.
Als Simulationsmethoden stehen dem Anwender neben der DC-Analyse die Simulation des Transienten und des Steady-State Verhaltens zur Verfügung. Während aller Simulationen können die Sensitivität bestimmt,

die Parameter variiert oder die Werte der Bauelemente nach einer statistischen Verteilungsfunktion modifiziert werden.

3. Methode

Das interne Konzept von JANAP ist darauf ausgelegt, möglichst ohne Einschränkungen bei der Beschreibung eines elektrischen Netzwerkes auszukommen. Daraus resultiert, daß bei der Aufstellung des beschreibenden Gleichungssystems keine Vereinfachungen vorgenommen werden, die Bauelement-spezifisch sind. Jedes Bauelement wird auf das "Universalelement" zurückgeführt, welches durch 6 Größen bestimmt wird:

- i Strom durch das Bauelement
- v Spannung am Bauelement
- q im Bauelement gespeicherte Ladung
- φ vom Bauelement aufgebauter Fluß
- r,s Hilfsgrößen in Zusammenhang mit dem Schalter

Die Hinzunahme von Ladung und Fluß vereinfacht die Darstellung einiger Bauelemente und bietet Vorteile während der transienten Simulation von Unstetigkeiten. Die Größen r und s sind Hilfsgrößen, die die Topologie-Änderungen in Zusammenhang mit dem Öffnen und Schließen eines Schalters formalisieren.
Als Formulierung der Netzwerkgleichungen wird eine Erweiterung des "Sparse Tableau Approaches" /6/ verwendet, im folgenden "Complete Tableau Approach" (CTA) genannt. Die prinzipielle Struktur des resultierenden Gleichungssystems ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.
Das Gleichungssystem sieht auf den ersten Blick sehr groß aus; es enthält immerhin für jeden Zweig 6 Unbekannte. Es läßt sich jedoch unmittelbar durch einfache symbolische Reduktionen vereinfachen:
Wie der Tabelle in Kapitel 2 zu entnehmen ist, haben die Größen q, φ, r und s bei den meisten Bauelementen den Wert 0. In diesen Fällen ist es daher gar nicht notwendig, die Größen als Unbekannte in das Gleichungssystem aufzunehmen, da sie a priori ausgerechnet werden können. Eine ähnliche Situation ergibt sich bei Strom- und Spannungsquellen. Durch diese symbolische Vereinfachung des Gleichungssystems gelangt man zu einer mit den traditionellen Simulationsmethoden Nodal und Sparse Tableau Formulierung vergleichbaren Größe, hat jedoch nicht die Einschränkungen bei der Beschreibung des Netzwerkes durch den Anwender und erhält bessere numerische Eigenschaften des Gleichungssystems.

$$
\begin{bmatrix}
-1 & G & \frac{d}{dt} & & & \\
R & -1 & & \frac{d}{dt} & & \\
 & C & -1 & & & \\
L+M & & & -1 & & \\
 & & & & -1 & \\
 & & & & & -1 \\
A & & & & & \\
 & B & & & & \\
 & & A & & A & \\
 & & & B & & B
\end{bmatrix}
\times
\begin{bmatrix} i \\ u \\ q \\ \varphi \\ r \\ s \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix} -I \\ -U \\ -Q \\ -\phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
$$

Das in symbolischer Form vorliegende reduzierte Gleichungssystem wird nun zur Bestimmung der Jacobi-Matrix symbolisch differenziert. Nach diesem Schritt ist jedes Element der Jacobi-Matrix in eine der folgenden vier Klassen einzuordnen:

0
Konstante
durch Formel berechenbar
numerische Differenzierung notwendig

Erwartungsgemäß ist der Anteil der Elemente, deren Wert nur durch symbolische Differenzierung ermittelt werden kann, sehr gering. An Hand obiger Klassifizierung kann das Besetzungsmuster der Jacobi-Matrix bestimmt und die Faktorisierung vorbereitet werden.
Das Gleichungssystem wird mit einem auf den BDF-Formeln /7/ basierenden Integrator und einem eingebetteten gedämpften Newton-Verfahren /8/ gelöst.

4. Zusammenfassung

Es wurde das Konzept von JANAP dargestellt. Trotz einer für den Anwender sehr flexiblen Beschreibungsmöglichkeit von elektrischen Netzwerken konnte gezeigt werden, daß ein beherrschbares Gleichungssystem entsteht.

Literatur

/1/ L.Nagel,
"SPICE 2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits", University of California, 1975

/2/ W.Weeks, et al.,
"Algorithms for ASTAP - A Network-Analysis Program", IEEE CT-20, 1973

/3/ T.Rübner-Petersen,
"NAP2, a Nonlinear Analysis Program for Electronic Circuits, Version 2", Technical University of Denmark, 1973

/4/ R.Newton, D.Peterson,
"A Simulation Program with Large Integrated Circuit Emphasis (SPLICE)", Proc. ISCAS 1978

/5/ T.Rübner-Petersen,
"SCNET - A Program for Analysis of Switched Capacitor Networks by Means of Poles and Zeros", Proc. ISCAS 1980

/6/ G.Hachtel, R.Brayton, F.Gustavson,
"The Sparse Tableau Approach to Network Analysis and Design", IEEE CT-18, 1971

/7/ C.Gear,
"The Automatic Integration of Stiff Differential Equations", Information Processing, 1969

/8/ P.Deuflhard,
"A Modified Newton Method for the Solution of Ill-conditioned Systems of Nonlinear Equations with Application to Multiple Shooting", Numerische Mathematik 22, 1974