

активное состояние → естественное прерывание;  
естественное прерывание → ожидание управления (после окончания операций ввода-вывода);  
пассивное → ожидание управления (после получения запроса на обслуживание).

Следует отметить, что виртуальный процессор может перейти в активное состояние лишь в результате передачи управления от планирующей программы; при этом происходит восстановление состояния реального процессора и настройки базового регистра редактирующей программы на рабочее поле текущего пользователя.

**Механизм защиты.** Защита программных компонент от взаимного влияния виртуальных процессов основана на применении инвариантной редактирующей программы, так как она не может сама себя модифицировать, а ячейки памяти, изменяемые ею, разнесены по рабочим полям всех пользователей. Каждому рабочему полю соответствует свое значение базового регистра редактирующей программы. Когда базовый регистр редактирующей программы настроен на рабочее поле текущего пользователя, то доступ осуществляется лишь к этому рабочему полю. Поскольку виртуальным процессорам не разрешено изменять содержимое базового регистра, то гарантируется их взаимная изоляция.

**Управление памятью.** Функционально память можно разбить на три класса: рабочая, промежуточная, архивная.

А. Рабочая память (речь идет об оперативной памяти). В ней находится программа и рабочие поля каждого пользователя.

Б. Промежуточная память. Ограниченный объем рабочей памяти не позволяет хранить в ней совокупность наборов данных. Поэтому используется промежуточная память. В каждый момент времени лишь один виртуальный процессор может быть активным. При передаче управления от одного виртуального процессора к другому может возникнуть необходимость в обмене информацией между рабочей и промежуточной памятью. Так как такая ситуация возникает, как правило, часто, то промежуточная память должна быть достаточно быстрой, потому что именно характеристики промежуточной памяти фактически определяют производительность всей системы. Согласно этим соображениям, использованы метод прямого доступа к информации на магнитном диске и сегментная организация памяти на устройстве прямого доступа. Информация о начальных адресах и длинах сегментов организована в линейный список, для управления которым написаны макрокоманды обработки линейных списков [3].

В. Архивная память. Пользователи имеют возможность проводить запись массивов в архив. В нашем случае под архивом понимается стандартная библиотека исходных программ [4]. Для записи, считывания и удаления исходных программ специально написаны подпрограммы, реализующие библиотечный метод доступа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уилкс М. Системы с разделением времени. М., Мир, 1972.
2. Бергэн Ж., Риту М., Ружие Ж. Работа ЭВМ с разделением времени. М., Наука, 1972.
3. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. М., Мир, 1976.
4. Дисковая операционная система ДОС АСВТ. Т. VI. Служебные программы. Кн. I. М., ИЭУМ, 1974.

*Поступило в редакцию 4 октября 1979 г.*

УДК 621.372.001.24 : 681.3

В. В. ЕФИМЕНКО, Ю. А. СТУКАЛИН  
(Новосибирск)

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМ

При машинном проектировании нелинейных электронных схем важной задачей является анализ переходного и установившегося (стационарного) режимов нелинейных систем с периодическим входом. К настоящему времени создан ряд универсальных программных комплексов (см., например, [1]), успешно решающих задачу анализа нелинейных систем. Однако необходимо отметить, что использование

таких комплексов для расчета слабодемпфированных систем требует значительных затрат машинного времени и в этом смысле малоэффективно.

В последнее время был предложен ряд методов [2, 3], которые позволяют существенно сократить объем вычислений при анализе схем с периодическим входным воздействием; при этом результаты работы [2] дают возможность вычислять стационарное состояние схем, а результаты [3] — стационарное состояние и переходный режим. При создании данного комплекса программ использовались некоторые идеи работы [3].

Уменьшение объема вычислений связано с тем, что интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающей схему, осуществляется не непрерывным во времени образом, а по периодам; при этом на некоторых временных интервалах, каждый из которых состоит из нескольких периодов, интегрирование не проводится.

Длины «исключаемых» временных интервалов зависят от поведения низкочастотных переменных системы дифференциальных уравнений и в данном комплексе вычисляются соответствующей подпрограммой. Подобная организация вычислительного процесса дает возможность исследовать переходный режим и стационарное состояние схемы.

В рассматриваемом комплексе программ реализован неявный метод интегрирования второго порядка, для которого

$$\dot{x}_n = H1 x_{n-2}/H2(H1+H2) - (H1+H2)x_{n-1}/H1H2 + (2H1+H2)x_n/H1(H1+H2). \quad (1)$$

Здесь  $H1, H2$  — последовательные шаги интегрирования (кратные периоду);  $x_{n-2}, x_{n-1}, x_n$  — последовательные значения решения системы дифференциальных уравнений в  $n-2, n-1, n$ -й точках.

Пусть  $H1$  — величина «исключенного» временного интервала. Подставив в (1) вместо  $\dot{x}_n$  ее аппроксимированное по трем величинам  $x_{n-1}, x_n, x_{n+1}$  значение и проведя незначительные преобразования, получим уравнение, связывающее  $x_n$  с  $x_{n-2}, x_{n-1}, x_{n+1}$ . Если в формулу Ньютона — Рафсона, задающую изменение  $x_{n+1}$  через  $x_n$  и матрицу чувствительности  $\frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n}$ ,

$$x_{n+1}^{i+1} = x_{n+1}^i + \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} \Big|_i (x_n^{i+1} - x_n^i),$$

подставить вытекающее из (1) уравнение связи  $x_n$  с  $x_{n-2}, x_{n-1}, x_{n+1}$ , то получим

$$x_n^{i+1} = \left( \frac{T + H1 + H2}{T} I - \frac{H1(H1 + H2)}{T(H1 + H2)} \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} \Big|_i \right)^{-1} \times \\ \times \left( -\frac{H1(H1 + H2)}{T(H1 + H2)} \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} \Big|_i x_n^i - x_{n-2} \frac{H1}{H2} + x_{n-1} \frac{(H1 + H2)(H1 + H2 + T)}{H2(H1 + T)} + \right. \\ \left. + x_{n+1}^i \frac{H1(H1 + H2)}{(H1 + T)T} \right). \quad (2)$$

где  $T$  — временной интервал между  $n$ -й и  $n+1$ -й точками, тождественно равный периоду;  $I$  — единичная матрица.

Уравнение (2) служит для итеративного вычисления значения решения в первой после «исключенного» временного интервала точке, т. е. дает возможность продолжить расчет переходного процесса несмотря на то, что на «исключенном» временном интервале интегрирование не проводилось.

На использовании (2) построен алгоритм, позволяющий ускорить машинный анализ систем с периодическим возбуждением путем уменьшения количества вычислительных операций.

Из формулы (2) видно, что для получения нового значения  $x_n^{i+1}$  требуется знать  $x_n^i, x_{n-1}, x_{n-2}$  (ранее вычисленные) и  $x_{n+1}^i, \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} \Big|_i$ . Матрица  $\frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} \Big|_i$  и вектор  $x_{n+1}^i$  вычисляются параллельно: матрица — путем решения группы вспомогательных систем уравнений, что соответствует методу, приведенному в [4], вектор — прямым интегрированием на временном интервале в один период при условии, что значение решения в  $n$ -й точке равно  $x_n^i$ . С целью экономии машинного времени для решения вспомогательных систем уравнений применена LU-факторизация.

Использованием соотношений (1), (2) были созданы и программно реализованы алгоритмы, которые легли в основу комплекса программ АУК (анализ установления колебаний). Комплекс АУК предназначен для пополнения пакета программ численного анализа электронных схем и систем из конечных элементов [1] и сохраняет все основные особенности пакета, касающиеся структуры, языка, организации библиотеки моделей элементов, входной и выходной информации. В АУК, как и в пакете, для решения задачи анализа схем реализован модифицированный узловый метод.

Для комплекса АУК разработаны проблемно-ориентированная библиотека моделей элементов (как часть общей библиотеки моделей элементов пакета) и несколько дополнительных модулей для решения задач численного анализа.

Описываемый программный комплекс позволяет вычислять стационарное состояние (причем контроль над ошибкой интегрирования гарантирует сходимость к реальному предельному устойчивому состоянию), а также дает возможность рассчитывать переходный процесс, фазо- и частотно-модулированные сигналы. Комплекс АУК реализован на языке ФОРТРАН на машине АСВТ М-4030. В качестве тестовых использовались примеры из работ [2, 3].

Необходимо отметить, что вычисление матрицы связано со значительными затратами машинного времени, поэтому в зависимости от того, как часто итеративный процесс (2) будет не сходиться, время интегрирования может существенно измениться. В связи с этим большое значение имеет стратегия выбора величины «исключенных» временных интервалов. Накопленный опыт использования программного комплекса АУК показывает, что имеет смысл интегрировать на нескольких первых периодах (количество определяется пользователем в соответствии с априорной информацией о характере решения), не используя (2). Кроме того, необходимо ука-

зать на существенное значение точности вычисления матрицы  $\frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n}$ . Всякая попытка занижения точности приводит к нарушению итерационного процесса (2).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Безносков Г. П., Ефименко В. В., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. Пакет программ численного анализа электронных схем и систем из конечных элементов.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. (Материалы Всесоюз. конф.) Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977, с. 41—45.
2. Aprille T. I., Trick T. N. Steady-State Analysis of Nonlinear Circuits with Periodic Input.— Proc. of the IEEE, 1972, vol. 60, N 1, p. 108—114.
3. Strohhband P. H., Laur R., Engl W. L. TNPT — an Efficient Method to Simulate Forced Nonlinear RF Networks in Time Domain.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1977, vol. SC-12, N 3, p. 243—246.
4. Trick T. N., Colon F. R., Fan S. P. Computation of Capacitor Voltage and Inductor Current Sensitivities with Respect to Initial Conditions for the Steady-State Analysis of Nonlinear Periodic Circuits.— IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1975, vol. CAS-22, N 5, p. 391—397.

Поступило в редакцию 2 ноября 1979 г.

УДК 62-503.5 : 519.2

Н. Н. БЕНДИЧ  
(Иркутск)

#### ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ АДАПТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Предлагается метод, позволяющий в режиме дуального управления программно осуществлять стабилизацию выходов объектов с неизвестным математическим описанием при обычных предположениях об управляемости.

Критерием качества стабилизации является максимум вероятности попадания выхода объекта в заданную область на каждом шаге управления при условии известного состояния на предыдущем шаге. Рассматривается случай, когда вектор выхода является наблюдаемым вектором состояния.

Областью допустимых управлений  $V$  будем считать множество всех ступенчатых ограниченных функций, таких, что  $u_i(t) = u_i[n\tau]$  для всех моментов времени  $t$ ,  $n\tau \leq t < (n+1)\tau$ , здесь  $u_i(t)$  —  $i$ -я координата управляющего воздействия,  $i = 1, m$ ;