

УДК 004.051

МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ИТЕРАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ БОЛЬШИХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ

© 2022 г. В. Н. Гридин^{1,*}, В. И. Анисимов^{1,2}, С. А. Васильев^{1,2}

Представлено академиком РАН Ю.С. Попковым

Поступило 09.02.2022 г.

После доработки 24.02.2022 г.

Принято к публикации 09.03.2022 г.

Рассматривается методика организации итерационных циклов при расчете динамических режимов больших электронных схем на основе декомпозиции моделируемой схемы на составляющие под-схемы. Использование предлагаемой методики дает возможность существенно повысить эффективность программного обеспечения, что имеет особенно большое значение при построении сервис-ориентированных систем автоматизированного проектирования, поскольку обеспечивается существенное уменьшение времени взаимодействия пользователей системы с сетью.

Ключевые слова: методы декомпозиции схем, сервис-ориентированные системы, схемотехнические САПР, моделирование схем, расчет схем по частям

DOI: 10.31857/S2686954322030031

Наиболее эффективным способом расчета динамических режимов больших электронных схем является их декомпозиция с последующим расчетом моделируемой схемы по частям [1–3]. Введем для каждого узла схемы узловое напряжение и из всех введенных узловых переменных v_p образуем вектор узловых потенциалов $X_0 = V_0 = [\dots, v_p, \dots]^t$. В каждой подсхеме выделим внутренние переменные x_i и образуем для каждой подсхемы вектор $X_k = [\dots, x_i, \dots]^t$. Тогда результирующий вектор всех переменных схемы будет иметь вид $X = [X_1^t, \dots, X_k^t, \dots, X_m^t, X_0^t]^t$.

Уравнение всей схемы в расширенном базисе узловых потенциалов при этом может быть записано в виде

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline W_{11} & & & & W_{10} \\ \hline & \dots & & & \dots \\ \hline & & W_{kk} & & W_{k0} \\ \hline & & & \dots & \dots \\ \hline & & & & W_{mm} & W_{m0} \\ \hline W_{01} & \dots & W_{0k} & \dots & W_{0m} & W_{00} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline X_1 \\ \hline \dots \\ \hline X_k \\ \hline \dots \\ \hline X_m \\ \hline X_0 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline S_1 \\ \hline \dots \\ \hline S_k \\ \hline \dots \\ \hline S_m \\ \hline S_0 \\ \hline \end{array} = 0 \quad (1)$$

Для k -й подсхемы в соответствии с k -й блочной строкой имеем уравнение

$$W_{kk}X_k + W_{k0}X_0 + S_k = 0, \quad k = \overline{1, m} \quad (2)$$

Отсюда получаем выражение для вектора внутренних переменных X_k подсхем

$$X_k = -W_{kk}^{-1}W_{k0}X_0 - W_{kk}^{-1}S_k, \quad k = \overline{1, m}$$

Обозначим

$$\bar{W}_{k0} = W_{kk}^{-1}W_{k0}, \quad \bar{S}_k = W_{kk}^{-1}S_k, \quad (3)$$

Тогда вектор внутренних переменных можно записать в виде

$$X_k = -\bar{W}_{k0}X_0 - \bar{S}_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Для определения вектора узловых потенциалов X_0 узлов разделения составим уравнение для всей схемы, используя последнюю блочную строку общего матричного уравнения (1) моделируемой схемы

$$\sum_{k=1}^m W_{0k}X_k + W_{00}X_0 + S_0 = 0. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (5) вектор внутренних переменных подсхем X_k , определяемый выражением (4), получим

$$\sum_{k=1}^m (-W_{0k}\bar{W}_{k0}X_0 - W_{0k}\bar{S}_k) + W_{00}X_0 + S_0 = 0.$$

¹ Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, г. Одиноково, Россия

² Санкт-Петербургский электротехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: info@ditc.ras.ru

Введем обозначения

$$\bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m W_{0k} \bar{W}_{k0}, \quad \bar{S}_0 = S_0 - \sum_{l=1}^m W_{0l} \bar{S}_l. \quad (6)$$

Тогда уравнение для вектора узловых потенциалов узлов разделения X_0 можно представить в следующем виде:

$$\bar{W}_{00} X_0 + \bar{S}_0 = 0.$$

Отсюда получим выражение для расчета узловых переменных узлов разделения

$$X_0 = -\bar{W}_{00}^{-1} \bar{S}_0. \quad (7)$$

Таким образом, в результате проведенной декомпозиции схемы на основании уравнения (7) могут быть определены все узловые переменные вектора X_0 , что позволяет найти на основании выражения (4) все внутренние переменные подсхем.

Построение математического описания для расчета динамических режимов на основе декомпозиции схемы выполняется на основе алгебро-дифференциального уравнения схемы, записанного в неявном виде $F(\dot{X}, X, t) = 0$, которое формируется в расширенном базисе узловых потенциалов. Для формирования алгебро-дифференциальных уравнений необходимо включить все полюса емкостных компонентов схемы в число узлов, а все полюса индуктивных компонентов – в число z -полюсов схемы, выделив эти элементы из структуры многополюсников. При этом уравнение моделируемой схемы можно записать в виде

$$(sD + W)X + S = 0.$$

Заменяя оператор s операцией дифференцирования, получим алгебро-дифференциальное уравнение моделируемой системы в неявной форме, которое для момента времени $t = k + 1$ имеет вид $F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$. Для исключения вектора производной \dot{X}^{k+1} следует воспользоваться формулами коррекции $\dot{X}^{k+1} = aX^{k+1} + b$ для многошаговых неявных методов высших порядков Адамса-Маултона или Гира [4, 5], что приводит к уравнению $F(aX^{k+1} + b, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$, которое можно решить методом Ньютона-Рафсона относительно вектора X^{k+1} , поскольку значения коэффициентов a и b к моменту времени $t = k + 1$ уже определены на предыдущих шагах расчета. В качестве начального приближения $(X^{k+1})^i = (X^{k+1})^0$ при этом обычно принимается значение вектора на предыдущем шаге X^k .

Процесс исключения значений производных целесообразно выполнять непосредственно в процессе формирования дискретизированных компо-

нентных уравнений $i_C^{k+1} = Y_C^k u_C^{k+1} + J_C^k$ и $u_L^{k+1} = R_L^k i_L^{k+1} + e_L^k$ для двухполюсников C и L , а также для частотно-зависимых управляемых источников [6].

В процессе обработки алгебро-дифференциального уравнения $F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$ необходимо решать методом Ньютона-Рафсона уравнение $F(aX^{k+1} + b, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$, которое в общем случае является нелинейным. Для решения этого уравнения целесообразно выполнить схемотехническую интерпретацию метода Ньютона-Рафсона, основанную на линеаризации нелинейных компонентов схемы в каждой точке итерационного процесса.

Так, если нелинейные компоненты в общем случае описываются уравнением $P_2 = F(Q_2)$, то разлагая это уравнение в ряд Тейлора в точке $Q_2 = Q_2^i$ и отбрасывая высшие производные, получим уравнение вида

$$P_2 = W_2^i Q_2 + S_2^i, \quad (8)$$

где $W_2^i = \left. \frac{\partial P_2}{\partial Q_2} \right|_{Q_2^i}$, $S_2^i = P_2^i - W_2^i Q_2^i$ – линеаризованные

в точке $Q_2 = Q_2^i$, $P_2 = P_2^i$ матрицы неавтономных и автономных параметров нелинейных компонентов.

Пусть нелинейная схема описывается уравнением

$$\Phi(X) = W_1 X + S_1 + S_2 = 0, \quad (9)$$

где W_1 и S_1 – матрица и задающий вектор линейной части схемы, $S_2 = P_2 = F(Q_2)$ – вектор фиктивных задающих источников, отображающих нелинейные характеристики компонентов.

Тогда на основании уравнения линеаризованных компонентов (8) и уравнения нелинейной схемы (9) можно получить матричное уравнение моделируемой схемы

$$(W_1 + W_2^i) X^{i+1} + S_1 + S_2^i = 0, \quad (10)$$

где W_1 и S_1 – матрица и задающий вектор линейной части схемы, W_2^i и S_2^i – матрица и задающий вектор линеаризованной в точке $Q_2 = Q_2^i$ нелинейной части схемы.

Организация итерационных процессов на основе декомпозиции большой схемы с расчетом схемы по частям может быть осуществлена двумя способами – путем построения сквозного вычислительного процесса для всей схемы или на основе автономных вычислительных процессов для отдельных подсхем с последующим расчетом временных связи подсхем.

Сквозной вычислительный процесс реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Ввод начальных значений $t^j = t^0$, $(X_k^j)^i = X_k^0$, $(X_0^j)^i = X_0^0$.

2. $t^{j+1} = t^j + h$.

3. Начало 1-го цикла $k = 1, m$.

4. Дискретизация частотно-зависимых компонентов в точке Q_s^j .

5. Ввод начального значения для линеаризации $(X_k^{j+1})^i = X_{np}$.

6. Линеаризация нелинейных компонентов в точке $(Q_f^{j+1})^i$.

7. Формирование блочных матриц $(W_{kk}^j)^i$, $(W_{k0}^j)^i$, $(W_{0k}^j)^i$, $(W_{00}^j)^i$ и векторов $(S_k^j)^i$, $(S_0^j)^i$ уравнения (1).

8. Преобразование диагональных подматриц $(W_{kk}^j)^i$ уравнения (1) к единичной матрице и расчет $(\bar{W}_{k0}^j)^i$, $(\bar{S}_k^j)^i$.

9. Вычисление поправок $(\Delta_k W_{00}^j)^i = (W_{0k}^j)^i (\bar{W}_{k0}^j)^i$, $(\Delta_k S_0^j)^i = (W_{0k}^j)^i (\bar{S}_k^j)^i$ и расчет новых значений блочной матрицы и задающего вектора для узлов связи

$$(\bar{W}_{00}^j)^i = (W_{00}^j)^i - \sum_{k=1}^m (\Delta_k W_{00}^j)^i,$$

$$(\bar{S}_0^j)^i = (S_0^j)^i - \sum_{k=1}^m (\Delta_k S_0^j)^i.$$

10. Окончание 1-го цикла $k = 1, m$.

11. Решение уравнения $(\bar{W}_{00}^j)^i (X_0^{j+1})^{i+1} + (\bar{S}_0^j)^i = 0$ для переменных узлов связи.

12. Начало 2-го цикла $k = 1, m$.

13. Расчет вектора $(X_k^{j+1})^{i+1} = -(\bar{W}_{k0}^j)^i (X_0^{j+1})^{i+1} - (\bar{S}_k^j)^i$ внутренних переменных подсхем.

14. Конец 2-го цикла $k = 1, m$.

15. Вычисление нормы $N = \|(X_k^{j+1})^{i+1} - (X_k^{j+1})^i\|$.

16. Если $N > \epsilon$, то переопределение векторов внутренних переменных подсхем $(X_k^{j+1})^i = (X_k^{j+1})^{i+1}$ и вектора переменных узлов связи $(X_0^{j+1})^i = (X_0^{j+1})^{i+1}$ и возврат к 5, иначе вывод векторов внутренних переменных подсхем $(X_k^{j+1})^{i+1}$ и переменных связи $(X_0^{j+1})^{i+1}$.

17. Если $t^{j+1} < t_{\text{оконч}}$, то переход к 2, иначе конец расчета.

Реализация программного обеспечения для расчета динамического режима на основе органи-

зации автономных вычислительных процессов для отдельных подсхем оказывается целесообразной в случаях, когда отдельные подсхемы имеют существенно отличные свойства от других подсхем. Сущность автономного вычислительного процесса заключается в том, что для каждой подсхемы выбирается свой шаг расчета h_k и с этим шагом выполняется расчет вектора внутренних переменных подсхем X_k^{j+1} . При этом выбираются точки синхронизации с шагом $H > h_k$, в которых расчет процессов в подсхемах прекращается и начинается расчет вектора переменных узлов связи X_0^{j+1} с последующим уточнением вектора внутренних переменных X_k^{j+1} .

Алгоритм расчета динамических режимов линейных электронных схем на основе декомпозиции и построения автономных вычислительных процессов может быть представлен в следующем виде:

1. Ввод начальных значений $T^j = T^0$, $X_k^j = X_k^0$, $X_0^j = X_0^0$.

2. Начало 1-го цикла $k = 1, m$.

3. $t^j = T^j$.

4. $t^{j+1} = t^j + h_k$.

5. Дискретизация частотно-зависимых компонентов в точке Q_s^j .

6. Формирование блочных матриц W_{kk}^j , W_{k0}^j , W_{0k}^j , W_{00}^j и векторов S_k^j , S_0^j подсхем уравнения (1).

7. Преобразование диагональных блочных матриц W_{kk}^j к единичной матрице и расчет $(\bar{W}_{k0}^j)^i$, $(\bar{S}_k^j)^i$.

8. Расчет вектора внутренних переменных подсхем $X_k^{j+1} = -\bar{W}_{k0}^j X_0^j - \bar{S}_k^j$.

9. Если $t^{j+1} \leq H$, то $t^j = t^{j+1}$, $X_k^j = X_k^{j+1}$ и возврат к 4, иначе переход к 10.

10. Вычисление поправок $\Delta_k W_{00}^j = W_{0k}^j \bar{W}_{k0}^j$, $\Delta_k S_0^j = W_{0k}^j \bar{S}_k^j$ и расчет новых значений блочной матрицы и задающего вектора переменных узлов связи

$$\bar{W}_{00}^j = W_{00}^j - \sum_{k=1}^m \Delta_k W_{00}^j, \quad \bar{S}_0^j = S_0^j - \sum_{k=1}^m \Delta_k S_0^j.$$

11. Окончание 1-го цикла $k = 1, m$.

12. $t^{j+1} = T^j + H$.

13. Решение уравнения $\bar{W}_{00}^j X_0^{j+1} + \bar{S}_0^j = 0$ для переменных узлов связи.

14. Начало 2-го цикла $k = 1, m$.

15. Уточнение вектора внутренних переменных подсхем $X_k^{j+1} = -\bar{W}_{k0}^j X_0^{j+1} - \bar{S}_k^j$.

16. Окончание 2-го цикла $k = 1, m$.
17. Вывод $t^{j+1}, X_k^{j+1}, X_0^{j+1}$.
18. Если $t^{j+1} < t_{\text{оконч}}$, то переопределение переменных $T^j = t^{j+1}, X_k^j = X_k^{j+1}, X_0^j = X_0^{j+1}$ и возврат к 2, иначе конец расчета.

Для нелинейных схем алгоритм дополняется шагами линеаризации компонентов.

Организация автономных вычислительных процессов дает значительный выигрыш при расчете схем, в которых можно выделить “быстрые” и “медленные” подсхемы, поскольку для расчета “быстрых” подсхем можно выбрать малые шаги расчета h_k . Пусть, например, схема содержит 2 подсхемы – “быструю”, которую можно рассчитывать с шагом $h_1 = 10^{-6}$ с, и “медленную”, которая рассчитывается с шагом $H = h_2 = 1$ с. Если $t_{\text{оконч}} = 10$ с и для расчета подсхем и переменных узлов связи на одном шаге необходимо выполнить $N_{\text{во}}$ вычислительных операций, то в этом случае число вычислительных операций при автономном вычислительном процессе за время $t_{\text{оконч}} = 10$ с будет равно $N_{\text{во1}} = (10^6 + 1 + 1)10N_{\text{во}} = 10^7 N_{\text{во}}$. При сквозном вычислительном процессе в этом случае имеем $N_{\text{во2}} = 3 \times 10^6 10 N_{\text{во}} = 3 \times 10^7 N_{\text{во}}$. Следовательно, при использовании автономного итерационного процесса время решения будет в три раза меньше, чем при организации сквозного процесса вычислений.

Таким образом, можно сделать вывод, что в случаях, когда отдельные подсхемы имеют по быстрдействию существенно отличные свойства от других подсхем, для расчета динамического режима следует организовать автономные вычислительные процессы с последующим уточнением вектора внутренних переменных всей схемы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполняется в рамках темы № FFSM-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика, пер с англ. М.: Наука, 1972. 544 с.
2. Баталов Б.В., Егоров Ю.Б., Русаков С.Г. Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1982. 168 с.
3. Гридин В.Н., Анисимов В.И. Моделирование нелинейных систем на основе методов декомпозиции // Информационные технологии. 2020. № 3. С. 131–137.
4. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем, пер. с англ. М.: “Радио и связь”, 1988. 560 с.
5. Чуа Л.О., Лин П.М. Машинный анализ электронных схем, пер с англ. М.: Изд. “Энергия”, 1980. 832 с.
6. Гридин В.Н., Рыжов Н.Г., Анисимов В.И., Абухазим М.М. Методы повышения эффективности процессов моделирования динамических режимов нелинейных систем // Информационные технологии. 2017. № 11. С. 796–802.

METHODS FOR ORGANIZATION OF ITERATIVE CYCLES IN CALCULATING DYNAMIC REGIMES OF LARGE SCHEMES BASED ON DECOMPOSITION

V. N. Gridin^a, V. I. Anisimov^{a,b}, and S. A. Vasiliev^{a,b}

^a Design Information Technologies Center Russian Academy of Sciences, Odintsovo, st. Marshal Biryuzova, 7a, Russian Federation

^b St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, st. Professor Popov d. 5, Russian Federation

Presented by Academician of RAS Yu.S. Popkov

A method of organizing iterative cycles in calculating the dynamic modes of large electronic circuits based on the decomposition of the simulated circuit into subcircuit components is considered. The use of the proposed technique makes it possible to significantly increase the efficiency of software, which is especially important in the construction of service-oriented computer-aided design systems, since it provides a significant reduction in the time of interaction of system users with the network.

Keywords: scheme decomposition methods, service-oriented systems, schematic CAD systems, circuit modeling, calculation of circuits in parts