

МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING

УДК 004.051

DOI: 10.17587/it.26.131-137

В. Н. Гридин¹, науч. руководитель, д-р техн. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

В. И. Анисимов^{1, 2}, гл. науч. сотр., д-р техн. наук, проф., e-mail: info@ditc.ras.ru,

¹ Центр информационных технологий в проектировании РАН,

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Моделирование нелинейных систем на основе методов декомпозиции¹

Рассматриваются методы повышения эффективности процессов моделирования нелинейных систем на базе их математического описания в виде блочно-диагональной окаймленной структуры. Устанавливается методика организации вычислительного процесса на основе технологии расчета слабосвязанных схем по частям. Проводится сравнительная оценка возможных подходов к организации итерационных вычислительных процессов при моделировании больших слабосвязанных систем на основе методов декомпозиции. Показывается, что путем перехода от сквозного итерационного процесса к автономным итерационным процессам и последующего уточнения переменных связи можно в несколько раз сократить общее число выполняемых вычислительных операций.

Ключевые слова: декомпозиция, моделирование, нелинейная система, окаймленная структура, итерационные процессы, сквозной и автономный итерационные процессы

Введение

Если моделируемая система имеет слабосвязанную иерархическую структуру, то для решения задачи моделирования нелинейных систем наиболее эффективным способом организации вычислительных процессов является декомпозиция исходной системы на ряд подсистем с использованием методики расчета слабосвязанной системы по частям. Такой подход может существенно повысить эффективность вычислительных процессов и привести требуемые для моделирования больших систем вычислительные ресурсы в соответствие с реальными возможностями. Для решения задачи декомпозиции моделируемая система по определенным правилам расчленяется на некоторое число малых подсистем, и на основе этого строятся топологические модели исходной системы. Для каждой из подсистем в отдельности проводится анализ и преобразование описания, общее решение получается путем соединения полученных частных решений для подсистем. При таком подходе не требуется составления полной системы уравнений, достаточно последовательно формировать и обрабатывать уравнения для ее подсистем, которые могут быть сделаны

настолько малыми, насколько это практически целесообразно. Достоинства методов декомпозиции проявляются в наибольшей степени при анализе сложных систем и сводятся к сокращению затрат машинного времени, что имеет большое значение при построении распределенных сервис-ориентированных систем автоматизации схмотехнического проектирования [1–8].

При использовании декомпозиционного подхода минимизируется число обменов между оперативной и внешней памятью, если такие обмены приходится выполнять из-за нехватки требуемого объема оперативной памяти. При решении задачи моделирования возможна организация как последовательного вычислительного процесса на автономном компьютере, так и организация параллельных вычислений в локальной или глобальной сети, где компьютер каждого узла сети осуществляет формирование и обработку данных, связанных только с отдельной подсистемой. При этом для решения задач моделирования нелинейных систем на основе методов декомпозиции возможна организация как сквозных, так и автономных итерационных вычислительных процессов. Выбор способа организации итерационного процесса определяется специфическими особенностями моделируемой системы, зависящими от степени концентрации нелинейных элементов в ее отдельных подсистемах.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-07-00082а.

Математическое описание нелинейных систем

Компонентные уравнения многополюсных компонентов нелинейной системы в общем случае могут быть записаны в виде $p_i = f(\dots, q_i, \dots)$. С учетом характера зависимых p_i и независимых q_i переменных все полюса и порты многополюсного компонента могут быть разделены на две группы — группу y и группу z . Если в качестве зависимой переменной p_i выбирается токовая переменная i_i , то i -й полюс входит в группу y -полюсов, если же выбирается потенциальная переменная u_i , то i -й полюс входит в совокупность z -полюсов [9].

В общем случае моделируемая система может содержать как линейные, так и нелинейные многополюсники.

Если многополюсный компонент является линейным, то уравнения y -полюсов и z -полюсов имеют вид

$$I_{y1} = Y_{m1}U_{y1} + B_{m1}I_{z1} + J_{m1}; \quad (1)$$

$$U_{z1} = M_{m1}U_{y1} + Z_{m1}I_{z1} + E_{m1}, \quad (2)$$

где I_{y1} , U_{y1} , I_{z1} , U_{z1} — векторы полюсных переменных линейного многополюсника; Y_{m1} , B_{m1} , M_{m1} , Z_{m1} — матрицы линейных параметров компонента; J_{m1} , E_{m1} — векторы задающих источников многополюсника.

Объединяя уравнения (1) и (2) в одно матричное уравнение, получим матричное уравнение линейных многополюсников

$$P_1 = W_{m1}Q_1 + S_{m1}, \quad (3)$$

где $P_1 = [I_{y1}^T, U_{z1}^T]^T$, $Q_1 = [U_{y1}^T, I_{z1}^T]^T$ — векторы зависимых и независимых переменных линейного многополюсного компонента;

$W_{m1} = \begin{pmatrix} Y_{m1} & B_{m1} \\ M_{m1} & Z_{m1} \end{pmatrix}$; $S_{m1} = \begin{pmatrix} J_{m1} \\ E_{m1} \end{pmatrix}$ — матрица параметров и задающий вектор линейных многополюсных компонентов.

Компонентные уравнения нелинейных многополюсников можно записать в виде $i_i = f_y(\dots, u_k, \dots, i_b, \dots)$ для y -полюсов и $u_j = f_z(\dots, u_k, \dots, i_b, \dots)$ для z -полюсов, где u_k и i_l — независимые переменные y -полюсов и z -полюсов, или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} I_{y2} \\ U_{z2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_y(U_{y2}, I_{z2}) \\ F_z(U_{y2}, I_{z2}) \end{pmatrix}.$$

Здесь I_{y2} , I_{z2} — векторы токовых переменных y - и z -полюсов; U_{y2} , U_{z2} — векторы потенциальных переменных y - и z -полюсов; $F_y(U_{y2}, I_{z2})$ и $F_z(U_{y2}, I_{z2})$ — вектор-функции нелинейных многополюсников.

Для описания нелинейных компонентов отождествим их вектор зависимых токовых

переменных I_{y2} с вектором некоторых фиктивных источников тока $J_{m2} = F_y(U_{y2}, I_{z2})$, а вектор их зависимых потенциальных переменных U_{z2} — с вектором некоторых фиктивных источников напряжения $E_{m2} = F_z(U_{y2}, I_{z2})$. Тогда все нелинейные компоненты можно описать уравнением вида

$$P_2 = F(Q_2) = S_{m2}, \quad (4)$$

где

$$F(Q_2) = \begin{pmatrix} F_y(U_{y2}, I_{z2}) \\ F_z(U_{y2}, I_{z2}) \end{pmatrix};$$

$$S_{m2} = \begin{pmatrix} J_{m2} \\ E_{m2} \end{pmatrix}; P_2 = \begin{pmatrix} I_{y2} \\ U_{z2} \end{pmatrix}; Q_2 = \begin{pmatrix} U_{y2} \\ I_{z2} \end{pmatrix}.$$

Объединяя уравнения (3) и (4) в одно уравнение, получим объединенное компонентное уравнение многополюсных компонентов:

$$P = W_m Q + S_m, \quad (5)$$

где

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}; Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix}; W_m = W_{m1}; S_m = \begin{pmatrix} S_{m1} \\ S_{m2} \end{pmatrix}.$$

Топологические уравнения моделируемой системы в расширенном узловом базисе [9] можно записать в виде

$$T_P P + T_X X = 0; \quad (6)$$

$$Q = T_P^T X, \quad (7)$$

где

$$X = \begin{pmatrix} V \\ I_z \end{pmatrix}; T_P = \begin{pmatrix} A_y \\ 1 \end{pmatrix}; T_X = \begin{pmatrix} A_z \\ -A_z^T \end{pmatrix}.$$

Здесь A_y , A_z — блочные матрицы инцидентий A для y - и z -полюсов.

Исключая из уравнений (5), (6) и (7) векторы P и Q , получим уравнение нелинейной системы в виде

$$WX + S = 0, \quad (8)$$

где $W = T_P W_m T_P^T + T_X$, $S = T_P S_m$.

Разделим далее общий задающий вектор S на линейную S_1 и нелинейную $S_2 = S_2(X)$ составляющие. С этой целью представим матрицу T_P в блочной форме, выделив в ней блоки линейной T_{P1} и нелинейной T_{P2} частей системы:

$$T_P = (T_{P1} \ T_{P2}).$$

С учетом блочной структуры матрицы T_P окончательно получим уравнение нелинейных систем в виде

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

где $W_1 = T_{P1} W_{m1} T_{P1}^T + T_x$, $S_1 = T_{P1} S_{m1}$, $S_2(X) = T_{P2} S_{m2} = T_{P2} F(Q_2)$.

Таким образом, нелинейные свойства моделируемой системы в нелинейном уравнении (9) определяются видом функциональных зависимостей $P_2 = F(Q_2)$ нелинейных компонентов.

В общем случае задача расчета нелинейной системы сводится к решению уравнения (9), которое выполняется методом Ньютона—Рафсона согласно соотношению [10—13]

$$M^i \Delta X^{i+1} + \Phi(X^i) = 0, \quad (10)$$

где $M^i = \frac{\partial \Phi(X)}{\partial X} \Big|_{X=X^i}$, $\Delta X^{i+1} = X^{i+1} - X^i$.

Непосредственное использование уравнения (10) связано с известными техническими трудностями формирования в общем виде функционала $\Phi(X^i)$ и вычисления матрицы производных M^i .

Поэтому целесообразно использовать схемотехническую интерпретацию метода Ньютона—Рафсона. С этой целью продифференцируем нелинейное уравнение (9), в результате чего получим выражение для вычисления матрицы производных

$$M^i = \frac{\partial \Phi(X)}{\partial X} \Big|_{(X=X^i)} = W_1 + \frac{\partial S_2(X)}{\partial X} \Big|_{(X=X^i)}.$$

Учитывая, что $S_2(X) = T_{P2} S_{m2}$, $S_{m2} = P_2 = F(Q_2)$ и $Q_2 = T_{P2}^T X$, можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_2(X)}{\partial X} \Big|_{(X=X^i)} &= T_{P2} \frac{\partial P_2}{\partial Q_2} \Big|_{(Q_2=Q_2^i)} \frac{\partial Q_2}{\partial X} = \\ &= T_{P2} \frac{\partial P_2}{\partial Q_2} \Big|_{(Q_2=Q_2^i)} T_{P2}^T. \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$W_{m2}^i = \frac{\partial P_2}{\partial Q_2} \Big|_{(Q_2=Q_2^i)},$$

где W_{m2}^i — матрица параметров нелинейных компонентов, линеаризованных в точке $Q_2 = Q_2^i$.

Тогда можно записать:

$$M^i = W_1 + T_{P2} W_{m2}^i T_{P2}^T = W_1 + W_2^i, \quad (11)$$

где

$$W_2^i = T_{P2} W_{m2}^i T_{P2}^T.$$

Таким образом, матрица M^i может быть найдена без вычисления матрицы производных $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial X}$.

Подстановка значения M^i в уравнение Ньютона—Рафсона (10) дает

$$(W_1 + W_2^i) \Delta X^{i+1} + \Phi(X^i) = 0.$$

Подставляя сюда значение $\Delta X^{i+1} = X^{i+1} - X^i$, а также выражение для функционала $\Phi(X^i) = W_1 X^i + S_1 + S_2(X^i)$ и учитывая очевидные соотношения $S_2(X^i) = T_{P2} P_2^i$, $Q_2^i = T_{P2}^T X^i$, $W_2^i = T_{P2} W_{m2}^i T_{P2}^T$, после несложных преобразований получим уравнение для схемотехнической интерпретации метода Ньютона—Рафсона в виде

$$(W_1 + W_2^i) X^{i+1} + S_1 + S_2^i = 0, \quad (12)$$

где

$$W_1 = T_{P1} W_{m1} T_{P1}^T + T_x, \quad W_2^i = T_{P2} W_{m2}^i T_{P2}^T; \quad (13)$$

$$S_1 = T_{P1} S_{m1}, \quad S_2^i = T_{P2} S_{m2}^i. \quad (14)$$

Входящие в эти выражения матрицы $W_{m2}^i = \frac{\partial P_2}{\partial Q_2} \Big|_{(Q_2=Q_2^i)}$ и $S_{m2}^i = P_2^i - W_{m2}^i Q_2^i$ являются линеаризованными в точке i матрицами нелинейных многополюсников и могут быть легко вычислены на основании выполнения линеаризации характеристик используемых нелинейных компонентов.

Расчет нелинейных систем на основе декомпозиции и расчета по частям

Пусть имеется нелинейная система, описываемая уравнением (9), расчет которой выполняется на основе схемотехнической интерпретации метода Ньютона—Рафсона согласно уравнению

$$W^i X^{i+1} + S^i = 0, \quad (15)$$

где $W^i = W_1 + W_2^i$, $S^i = S_1 + S_2^i$, при этом в соответствии с методом схемотехнической интерпретации матрицы W_1 , W_2^i , S_1 , S_2^i определяются соотношениями (13) и (14).

Если моделируемая система имеет слабосвязанную структуру, то наиболее эффективным способом организации вычислительных процессов является декомпозиция исходной системы на ряд составляющих подсистем с использованием декомпозиционного подхода расчета по частям [14—18]. При этом сложная система по определенным правилам расчленяется на некоторое число малых подсистем, и на основе этого строятся топологические модели исходной системы. Для каждой из подсистем в отдельности проводится анализ и отыскивается решение, общее

решение получается путем соединения полученных частных решений для подсистем. Такой подход может существенно повысить эффективность вычислительных процессов, реализующих моделирование системы, и привести требуемые для решения задачи ресурсы в соответствие с имеющимися реальными возможностями.

Единственным ограничением для реализации декомпозиционного подхода к моделированию больших систем является требование выполнения условий слабосвязанности отдельных подсистем исходной системы. Условия слабосвязанности требуют, во-первых, отсутствия индуктивных связей между отдельными подсистемами. Во-вторых, для каждого управляемого источника должно выполняться требование концентрации внутри каждой подсистемы его управляющих и управляемых переменных.

Разбиение исходной системы на отдельные подсистемы может быть выполнено произвольным образом с учетом выполнения сформулированных выше условий слабосвязанности. С практической точки зрения при этом обычно удобно включать в каждую подсистему компоненты, реализующие некоторую определенную функциональную задачу. Число подсистем выбирается исходя из общей размерности моделируемой системы.

Все переменные разделенной на подсистемы исходной структуры могут быть разделены на две группы. В первую группу входят внутренние переменные подсистем, во вторую группу — переменные связи в узлах соединения подсистем. Соответствующим выбором нумерации внутренних переменных отдельных подсистем и переменных связи в узлах соединения подсистем можно обеспечить представление исходного матричного уравнения моделируемой системы в виде, содержащем матрицу с окаймленной блочно-диагональной структурой. Такая матрица будет содержать окаймляющую блочную строку и окаймляющий блочный столбец, а все остальные ненулевые элементы этой матрицы будут сконцентрированы в диагональных матричных блоках. При этом каждый такой блок общей матрицы определяется только структурой и значениями параметров одной из подсистем.

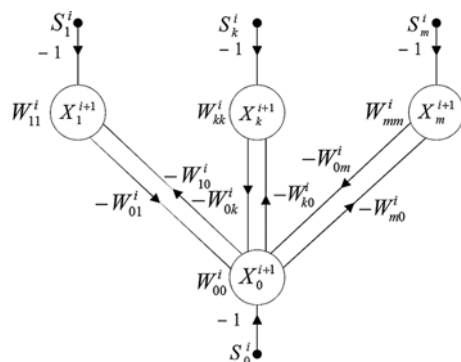
Для каждого узла схемы можно ввести узловую переменную, определяющую состояние этого узла, и из всех введенных узловых переменных v_p можно образовать вектор узловых потенциалов $X_0 = V_0 = [..., v_p, ...]^T$. В каждой подсистеме можно выделить внутренние переменные x_i и составить для каждой подсистемы вектор $X_k = [..., x_i, ...]^T$. При этом общий вектор всех переменных системы будет иметь вид $X = [X_1^T, ..., X_k^T, ..., X_m^T, X_0^T]^T$, где вектор $X_0 = V_0$

будет включать в себя узловые переменные узлов, а векторы X_k — переменные k -й подсистемы.

С учетом принятой структуры вектора X матричное уравнение всей системы (15) в расширенном базисе узловых потенциалов [9, 19] может быть записано в виде

$$\begin{pmatrix} W_{11}^i & & & & W_{10}^i \\ & \dots & & & \dots \\ & & W_{kk}^i & & W_{k0}^i \\ & & & \dots & \dots \\ & & & & W_{mm}^i & W_{m0}^i \\ W_{01}^i & \dots & W_{0k}^i & \dots & W_{0m}^i & W_{00}^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1^{i+1} \\ \dots \\ X_k^{i+1} \\ \dots \\ X_m^{i+1} \\ X_0^{i+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S_1^i \\ \dots \\ S_k^i \\ \dots \\ S_m^i \\ S_0^i \end{pmatrix} = 0. \quad (16)$$

Для построения и преобразования описания моделируемой схемы на основании декомпозиционного подхода особенно удобно использовать топологическое описание схемы с помощью обобщенных сигнальных графов [20]. Обобщенный сигнальный граф отображает систему уравнений, записанных в обобщенной причинно-следственной форме, и содержит взвешенные вершины, среди которых могут быть и вершины с нулевым весом. Такое описание помимо наглядного представления о структуре связей между подсистемами позволяет снять проблему выбора последовательности нумерации внутренних переменных подсистем и переменных узлов связи. Сопоставленный матричному уравнению (16) обобщенный сигнальный граф приведен на рисунке. Показанная на рисунке структура обобщенного сигнального графа наглядно демонстрирует соответствующую структуру математического описания слабосвязанной системы, в которой взаимодействие между отдельными подсистемами реализуется только через узловые переменные связи. Вследствие слабосвязанности моделируемой системы оказывается возможной независимая обработка математического описания отдельных подсистем и уравнений связи.



Обобщенный сигнальный граф слабосвязанной нелинейной системы

Топологическое представление описания моделируемой схемы в виде обобщенного сигнального графа предоставляет удобные возможности для анализа структуры этого графа и вычисления определителя графа Δ на основании рассмотрения всех его элементарных графов g_i , каждый из которых содержит совокупность некасающихся контуров и взвешенных вершин (включая взвешенные вершины с нулевым весом).

При этом определитель графа Δ может быть вычислен на основании топологической формулы $\Delta = \sum \delta_i$, где δ_i — определитель элементарного графа, равный произведению весов входящих в него некасающихся контуров и взвешенных вершин, и суммирование осуществляется по всем возможным элементарным графам [20].

Итерационные процессы решения уравнения (16) на основе декомпозиции могут быть реализованы двумя способами — путем организации сквозного вычислительного процесса для всей системы или автономных вычислительных процессов для отдельных подсистем с последующим процессом расчета переменных связи системы.

Сквозной вычислительный процесс является наиболее общим типом процесса и может быть реализован в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Ввод начальных значений $X_k^i = X_k^0$, $X_0^i = X_0^0$.
2. Начало цикла $k = \overline{1, m}$.
3. Линеаризация нелинейных компонентов в точке X_k^i .
4. Формирование линеаризованных матриц подсистем $W_{kk}^i, W_{k0}^i, W_{0k}^i, W_{00}^i, S_k^i, S_0^i$.
5. Преобразование W_{kk}^i к единичной матрице методом Гаусса—Жордано и расчет новых значений k -й блочной строки $\bar{W}_{k0}^i, \bar{S}_k^i$.
6. Расчет поправок $\Delta_k W_{00} = \bar{W}_{k0} W_{0k}$ и $\Delta_k S_0 = W_{0k} \bar{S}_k$ и коррекция матриц уравнения узлов связи с учетом поправок $\bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m \Delta_k W_{00}, \bar{S}_0 = S_0 - \sum_{k=1}^m \Delta_k S_0$.
7. Окончание цикла $k = \overline{1, m}$.
8. Решение уравнения $\bar{W}_{00}^i X_0^{i+1} + \bar{S}_0^i = 0$ для переменных связи.
9. Начало цикла $k = \overline{1, m}$.
10. Расчет вектора внутренних переменных подсистем $X_k^{i+1} = -\bar{W}_{k0}^i X_0^{i+1} - \bar{S}_k^i$.
11. Окончание цикла $k = \overline{1, m}$.
12. Вычисление нормы $N = \|X^{i+1} - X^i\|$.
13. Если $N > \varepsilon$, то $X_k^i = X_k^{i+1}, X_0^i = X_0^{i+1}$ и возврат к шагу 2, иначе — вывод векторов внутренних переменных X_k^{i+1} и переменных связи X_0^{i+1} .

Организация автономных вычислительных процессов целесообразна в тех случаях, когда степень нелинейности отдельных подсистем значительно отличается, особенно когда пода-

вляющее число подсистем являются линейными, а нелинейные элементы могут быть сконцентрированы в незначительном числе подсистем. В частном случае все нелинейные свойства системы можно сконцентрировать в одной из подсистем, при этом все остальные подсистемы будут содержать только линейные элементы.

Автономные вычислительные процессы могут быть организованы согласно следующему алгоритму:

1. Ввод начальных значений $X_k^i = X_k^0, X_0^i = X_0^0$.
2. Начало цикла $k = \overline{1, m}$.
3. Линеаризация нелинейных компонентов в точке X_k^i .
4. Формирование линеаризованных матриц отдельных подсистем $W_{kk}^i, W_{k0}^i, W_{0k}^i, W_{00}^i, S_k^i, S_0^i$.
5. Преобразование W_{kk}^i к единичной матрице методом Гаусса—Жордано и расчет новых значений k -й блочной строки $\bar{W}_{k0}^i, \bar{S}_k^i$.
6. Расчет $X_k^{i+1} = -\bar{W}_{k0}^i X_0^{i+1} - \bar{S}_k^i$.
7. Вычисление нормы $N = \|X_k^{i+1} - X_k^i\|$.
8. Если $N > \varepsilon$, то $X_k^i = X_k^{i+1}$ и возврат к шагу 3, иначе переход к шагу 9.
9. Расчет поправок $\Delta_k W_{00} = \bar{W}_{k0} W_{0k}$ и $\Delta_k S_0 = W_{0k} \bar{S}_k$ и коррекция матриц уравнения узлов связи с учетом поправок $\bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m \Delta_k W_{00}, \bar{S}_0 = S_0 - \sum_{k=1}^m \Delta_k S_0$.
10. Окончание цикла $k = \overline{1, m}$.
11. Решение уравнения $\bar{W}_{00}^i X_0^{i+1} + \bar{S}_0^i = 0$ для переменных узлов связи.
12. Начало цикла $k = \overline{1, m}$.
13. Уточнение вектора внутренних переменных подсистем $X_k^{i+1} = -\bar{W}_{k0}^i X_0^{i+1} - \bar{S}_k^i$.
14. Окончание цикла $k = \overline{1, m}$.
15. Вычисление нормы $N = \|X^{i+1} - X^i\|$.
16. Если $N > \varepsilon$, то, $X_0^i = X_0^{i+1}$ и возврат к шагу 2, иначе — вывод X_k^{i+1} и X_0^{i+1} .

Для оценки выигрыша от перехода к автономным вычислительным процессам рассмотрим случай, когда система разделена на 10 подсистем ($m = 10$). Пусть одна из подсистем требует для расчета 10 итераций, а остальные подсистемы — по 2 итерации, и расчет вектора переменных связи X_0^{i+1} также выполняется за две итерации. Тогда, если на одну итерацию требуется $N_{\text{оп}}$ операций, то для автономного вычислительного процесса получим общее число операций $M_{\text{авт}} = 30N_{\text{оп}}$, для сквозного — $M_{\text{скв}} = 110N_{\text{оп}}$. Таким образом, за счет перехода от сквозного итерационного процесса к автономным итерационным процессам с последующей организацией расчета переменных связи, оказывается возможным в несколько раз сократить общее число выполняемых операций.

Заключение

Рассмотренные методы повышения эффективности моделирования нелинейных систем на базе математического описания в виде блочно-диагональной окаймленной структуры существенно уменьшают время, необходимое для решения задач моделирования больших слабосвязанных систем. Сравнительная оценка возможных подходов к организации итерационных вычислительных процессов при моделировании больших слабосвязанных систем на основе декомпозиции позволяет сделать вывод о целесообразности перехода к организации автономных итерационных процессов. Такой переход особенно эффективен в случаях, когда степень нелинейности отдельных подсистем значительно отличается, особенно если подавляющее число подсистем являются линейными, а нелинейные элементы могут быть сконцентрированы в незначительном числе подсистем. При этом путем перехода от сквозного итерационного процесса к автономным итерационным процессам и последующей организации расчета переменных связи можно в несколько раз сократить общее число выполняемых вычислительных операций.

Однако в общем случае при произвольном характере распределения нелинейных компонентов по отдельным подсистемам моделируемой системы более целесообразным является использование сквозного итерационного процесса.

Список литературы

1. Анисимов В. И., Гридин В. Н. Методы построения схем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 1. С. 3–7.
2. Зеленухина В. А. Разработка Интернет-ориентированных виртуальных лабораторий математического моделирования посредством разделения вычислительных и визуализационных задач // Информационные технологии. 2010. № 10. С. 22–29.

3. Коваленко О. С., Курейчик В. М. Обзор проблем и состояний облачных вычислений и сервисов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 146–153.
4. Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 23–27.
5. Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А. Построение веб-сервисов систем автоматизации схемотехнического проектирования // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 4.
6. Анисимов Д. А. Методы построения систем автоматизации схемотехнического проектирования на основе веб-сервисов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 2012. № 10. С. 56–61.
7. Морган С. Разработка распределенных приложений на платформе Microsoft .Net Framework. М.: Русская Редакция, 2008. 608 с.
8. Цимбал А. А., Аншина М. Л. Технологии создания распределенных систем. СПб.: Питер, 2003. 576 с.
9. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.
10. Норенков И. П., Маничев В. Б. Основы теории и проектирования САПР. М.: Высшая школа. 1990. 334 с.
11. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем. Минск: Дизайн ПРО, 2004. 639 с.
12. Гридин В. Н., Михайлов В. Б., Шустерман Л. Б. Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. М.: Наука, 2008. 339 с.
13. Калабеков Б. А., Лапидус И. Ю., Малафеев В. М. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
14. Крон Г. Исследование сложных схем по частям — диакоптика: Пер с англ. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. 542 с.
15. Баталов Б. В., Егоров Ю. Б., Русаков С. Г. Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1982. 168 с.
16. Анисимов В. И., Тарасова О. Б., Алмаасали С. А. Организация вычислительных процессов при моделировании схем на основе методов диакоптики // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2013. № 4. С. 14–17.
17. Гридин В. Н., Анисимов В. И., Абухазим М. М. Моделирование больших систем на основе методов декомпозиции и сжатия данных // Системы высокой доступности. 2015. № 4. С. 77–82.
18. Гридин В. Н., Анисимов В. И., Абухазим М. М. Методы моделирования систем на основе методов декомпозиции и компактной обработки разреженных матриц // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1. С. 3–8.
19. Хайнеман Р. PSPICE Моделирование работы электронных схем. М.: Издательство ДМК, 2005. 327 с.
20. Анисимов В. И. Топологический расчет электронных схем. Л.: Энергия, 1977. 238 с.

V. N. Gridin¹, Scientific Director, D. Sc., Professor, e-mail: info@ditc.ras.ru,

V. I. Anisimov^{1, 2}, Chief Researcher, D. Sc., Professor, e-mail: vianisimov@inbox.ru,

¹ Design information technologies Center Russian Academy of Sciences, Odintsovo, Russian Federation,

² Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Modeling Non-Linear Systems Based on Decomposition Methods

Methods of increasing the efficiency of nonlinear systems modeling on the basis of their mathematical description in the form of a block-diagonal bordered structure are considered. The method of organization of computational process based on the technology of calculation of loosely coupled circuits by parts is established. The comparative estimation of possible approaches to the organization of iterative computational processes at modelling of the big weakly connected systems on the basis of methods of decomposition is carried out. It is shown that by moving from a through iterative process to autonomous iterative processes and further refinement of communication variables, it is possible to reduce the total number of performed computational operations several times.

Keywords: decomposition, modeling, nonlinear system, bordered structure, iterative processes, through and autonomous iteration processes

References

1. **Anisimov V. I., Gridin V. N.** *Informatsionnye Tekhnologii v Proyektirovanii i Proizvodstve* 2009, no. 1, pp. 3—7 (in Russian).
2. **Zelenukhina V. A.** *Informacionnye Tekhnologii*, 2010, no. 10, pp. 22—29 (in Russian).
3. **Kovalenko O. S., Kureichik V. M.** *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki*, 2012, no. 7, pp. 146—153 (in Russian).
4. **Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** *Informacionnye Tekhnologii*, 2011, no. 5, pp. 23—27 (in Russian).
5. **Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nyye Sistemy*, 2012, no. 4 (in Russian).
6. **Anisimov D. A.** *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2012, no. 10, pp. 56—61 (in Russian).
7. **Morgan S.** Development of distributed applications on the platform Microsoft.Net Framework, Moscow, Russian Edition, 2008, 608 p. (in Russian).
8. **Tsimbal A. A., Anshina M. L.** Technology for creating distributed systems, St. Petersburg, Peter, 2003, 576 p. (in Russian).
9. **Vlach I., Singhal K.** Machine methods of analysis and design of electronic circuits, Moscow, Radio and communications, 1988, 560 p. (in Russian).
10. **Norenkov I. P., Manichev V. B.** Fundamentals of CAD theory and design, Moscow, Higher school, 1990, 334 p. (in Russian).
11. **Tarasik V. P.** Mathematical modeling of technical systems, Minsk, Design missile defense, 2004, 639 p. (in Russian).
12. **Gridin V. N., Mikhailov V. B., Shusterman L. B.** Numerical and analytical modeling of electronic circuits, Moscow, Nauka, 2008, 339 p. (in Russian).
13. **Kalabekov B. A., Lapidus I. Yu., Malafeev V. M.** Methods of automated calculation of electronic circuits in communication technology, Moscow, Radio and communications, 1990, 272 p. (in Russian).
14. **Cron G.** The study of complex schemes in parts — diakoptika, Moscow, Nauka, Main edition of the physics and mathematics literature, 1972, 542 p. (in Russian).
15. **Batalov B. V., Egorov Yu. B., Rusakov S. G.** Fundamentals of mathematical modeling of large computer integrated circuits, Moscow, Radio and communications, 1982, 168 p. (in Russian).
16. **Anisimov V. I., Tarasova O. B., Almaasali S. A.** *Informatsionnye Tekhnologii v Proyektirovanii i Proizvodstve*, 2013, no. 4, pp. 14—17 (in Russian).
17. **Gridin V. N., Anisimov V. I., Abukhazim M. M.** *Sistemy Vysokoy Dostupnosti*, 2015, no. 4, pp. 77—82 (in Russian).
18. **Gridin V. N., Anisimov V. I., Abukhazim M. M.** *Sistemy Vysokoy Dostupnosti*, 2016, no. 1, pp. 3—8 (in Russian).
19. **Heineman R.** PSPICE Modeling the operation of electronic circuits, Moscow, Publishing house DMK, 2005, 327 p. (in Russian).
20. **Anisimov V. I.** Topological calculation of electronic circuits, Leningrad, Energy, 1977, 238 p. (in Russian).