

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: vianisimov@inbox.ru,

¹ Центр информационных технологий в проектировании РАН,

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Организация параллельных вычислительных процессов в распределенных системах автоматизации схемотехнического проектирования¹

Рассматриваются методы построения распределенных систем автоматизированного проектирования на основе диакоптических подходов к декомпозиции моделируемой схемы. В статье рассматривается методика описания систем с помощью обобщенных сигнальных графов, которые отображают системы уравнений, записанных в обобщенной причинно-следственной форме. Такое описание помимо наглядного представления о структуре связей между подсхемами позволяет снять проблему выбора последовательности нумерации внутренних переменных подсхем и переменных узлов связи. Декомпозиция системы на базе диакоптического подхода позволяет реализовать эффективный вычислительный процесс, основанный на параллельной организации вычислений, когда формирование и обработка уравнений для отдельных подсхем выполняется на различных узлах распределенной сети. При этом достигается значительная экономия требуемого объема оперативной памяти и существенно снижается время, необходимое для решения задачи моделирования больших схем, что позволяет ощутимо повысить эффективность распределенной системы автоматизации схемотехнического проектирования.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, диакоптика, моделирование систем, обобщенные сигнальные графы, распределенные системы, интернет-технологии

Введение

Внедрение в системы автоматизированного проектирования интернет-технологий позволяет обеспечить доступ к информационным ресурсам удаленных баз данных и организовать дистанционное взаимодействие распределенных коллективов пользователей САПР. Одним из направлений реализации таких технологий является построение систем автоматизированного проектирования на основе веб-сервисов, позволяющих приложениям взаимодействовать друг с другом независимо от платформы, на которой они развернуты, а также от языка программирования [1–4].

Использование интернет-технологий на основе веб-сервисов при разработке программного обеспечения распределенных систем ав-

томатизации схемотехнического проектирования позволяет:

- перейти к концепции описания интерфейсов и взаимодействий на основе XML, объединяя любой тип приложения с другим приложением и предоставляя свободу изменения и развития с течением времени до тех пор, пока поддерживается соответствующий интерфейс;
- использовать более высокий уровень абстракции программного обеспечения, при котором оно может быть задействовано пользователями, работающими только на уровне бизнес-анализа;
- организовать взаимодействие между различными сервисами на любой платформе, написанными на любом языке программирования;
- учитывать слабосвязанность программного обеспечения, благодаря которой взаимодействие между приложениями сервиса не

¹ Работа выполняется в рамках темы № 0071-2019-0001.

нарушается каждый раз, когда меняется дизайн или реализация какого-либо сервиса;

- предоставлять существующему или унаследованному программному обеспечению сервисный интерфейс без изменения оригинальных приложений, давая им возможность полноценно взаимодействовать в сервисной среде;
- адаптировать существующие приложения к меняющимся условиям проектирования и потребностям заказчика.

Основным стандартом технологии веб-сервисов является протокол WSDL, который используется для создания описания интерфейса веб-сервиса. WSDL-документ описывает информационные блоки сервиса и включает в себя информацию об интерфейсе и методах, доступных для общего пользования, дает описание типов данных, используемых при передаче в запросах и ответах по соответствующему протоколу, а также информацию о транспортном протоколе, который может быть использован для работы с сервисом, адресную информацию о местоположении описываемого сервиса. Следует отметить, что стандарт WSDL не зависит от какого-либо определенного протокола обмена XML-данными, но содержит встроенные средства поддержки протокола SOAP. Протокол SOAP — это межплатформенный стандарт, используемый для форматирования сообщений, которыми обмениваются веб-сервис и клиентское приложение. SOAP определяет XML-конверт для сообщений веб-сервиса, модель обработки и алгоритм кодирования информации перед ее отправкой. В технологии веб-сервисов используются два типа SOAP-сообщений. Первый тип является сообщением запроса, которое клиент направляет веб-сервису для инициализации выбранного веб-метода. Второй тип является ответным сообщением, которое веб-сервис возвращает клиенту.

При использовании универсально описанных интерфейсов появляется возможность использовать программные компоненты повторно, что позволяет снизить трудоемкость разработки САПР и осуществить более эффективное инвестирование в программное обеспечение. С учетом высокой стоимости программного обеспечения современных САПР указанная возможность имеет большое экономическое значение.

Главным достоинством распределенной архитектуры является возможность постоянной

модификации программного обеспечения и расширения путем добавления новых, более эффективных методов. Единственным требованием для реализации таких возможностей является соблюдение неизменности выбранного при разработке интерфейса.

Переход к распределенной архитектуре имеет особенно большое значение для моделирования больших систем, когда часто возникают ситуации, при которых необходимо использовать вычислительные ресурсы, превосходящие имеющиеся в распоряжении пользователя возможности. Если моделируемая система имеет слабосвязанную иерархическую структуру, то наиболее эффективным способом организации вычислительных процессов является декомпозиция исходной системы на ряд подсистем с использованием диакоптического подхода [5—7]. Такой подход может существенно повысить эффективность вычислительных процессов и привести требуемые для решения задачи ресурсы в соответствие с реальными возможностями. При этом возможна организация параллельных вычислений в локальной или глобальной сети, где компьютер каждого узла сети осуществляет формирование и обработку данных, связанных только с отдельной подсистемой.

Вследствие декомпозиции схемы на слабосвязанные подсистемы обеспечивается существенное увеличение эффективности программного обеспечения по затратам требуемой оперативной памяти и по скорости решения задачи моделирования. Единственным ограничением для реализации декомпозиционного подхода к моделированию больших схем является требование отсутствия индуктивных связей между отдельными подсистемами, а также локализация внутри каждой подсистемы ее зависимых источников и управляющих этими источниками переменных.

В статье рассматривается методика организации параллельных вычислительных процессов в распределенных системах автоматизации схмотехнического проектирования на основе реализации диакоптического подхода к моделированию больших схем. Такой подход в сочетании с организацией параллельного вычислительного процесса позволяет существенно уменьшить время, необходимое для решения задач моделирования больших слабосвязанных систем, и тем самым значительно повысить эффективность распределенной системы автоматизированного проектирования.

Моделирование больших схем на основе методов диакоптики

Диакоптический подход к моделированию больших схем является одним из видов перехода от сложной схемы к более простой, когда проводится разделение схемы на изолированные части. Сложная схема по определенным правилам расчленяется на некоторое число подсхем, и для каждой из подсхем в отдельности проводится требуемый анализ, общее решение получается путем соединения полученных частных решений для подсхем. При таком подходе не требуется составления полной системы уравнений, достаточно сформировать уравнения для ее элементарных подсхем, которые могут быть сделаны настолько малыми, насколько это практически целесообразно.

Для построения и преобразования описания моделируемой схемы на основании диакоптического подхода целесообразно использовать топологическое описание схемы с помощью обобщенных сигнальных графов, которые в отличие от сигнального графа отображают систему уравнений, записанных в обобщенной причинно-следственной форме [8, 9]. Обобщенный сигнальный граф содержит взвешенные вершины, среди которых могут быть и вершины с нулевым весом. Такое описание помимо наглядного представления о структуре связей между подсхемами позволяет снять проблему выбора последовательности нумерации внутренних переменных подсхем и переменных узлов связи.

Моделируемая схема может быть разбита на отдельные подсхемы, связанные между собой произвольным образом. Основным ограничением при таком разделении схемы является требование выполнения условий слабосвязанности отдельных подсхем, которые требуют отсутствия индуктивных связей между отдельными подсхемами, а также размещения внутри каждой подсхемы ее зависимых источников и управляющих этими источниками переменных. Кроме того, при математическом описании каждой подсхемы должно выполняться условие существования ее обратной матрицы.

При решении задачи декомпозиции исходной схемы для каждого узла моделируемой схемы следует ввести узловую потенциальную переменную, определяющую состояние этого узла, и из всех введенных узловых переменных v_p образовать вектор узловых потенциалов $X_0 = V_0 = [..., v_p, ...]^T$. В каждой подсхеме следует

выделить внутренние переменные x_i и составить для каждой подсхемы вектор внутренних переменных $X_k = [..., x_i, ...]^T$.

Тогда уравнение для k -й подсхемы в обобщенной причинно-следственной форме может быть записано в следующем виде:

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

где W_{kk} , W_{k0} — матрицы параметров k -й подсхемы; S_k — вектор задающих источников k -й подсхемы; C_k — матрица соединений задающих источников k -й подсхемы.

Аналогично можно записать в обобщенной причинно-следственной форме уравнение для узлов связи между подсхемами:

$$W_{00}X_0 = -\sum_{k=1}^m W_{0k}X_k - C_0 S_0. \quad (2)$$

Здесь W_{00} , W_{0k} — матрицы параметров для узлов связи между подсхемами; S_0 — вектор задающих источников, подключенных к узлам связи; C_0 — матрица соединений задающих источников, подключенных к узлам связи.

Уравнениям (1) и (2) соответствует обобщенный сигнальный граф [1], приведенный на рис. 1.

Приведенная структура обобщенного сигнального графа наглядно демонстрирует соответствующую структуру математического описания слабосвязанной схемы, в которой взаимодействие между отдельными подсхемами реализуется только через узловые переменные связи.

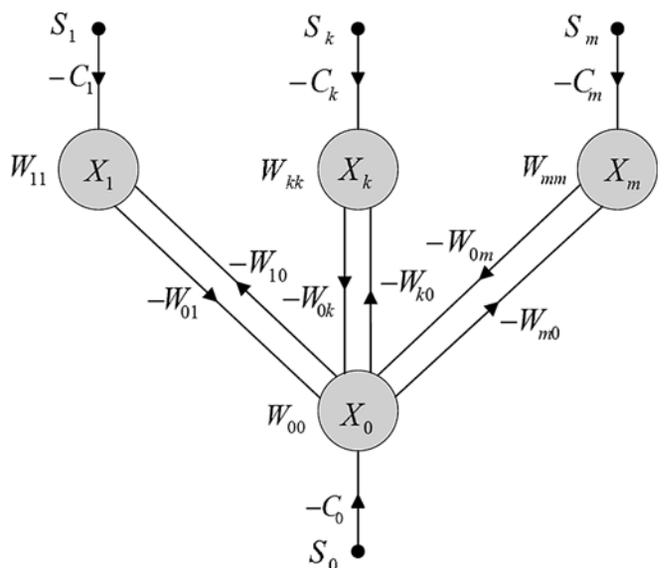


Рис. 1. Обобщенный сигнальный граф слабосвязанной схемы

Умножая уравнение (1) на обратную матрицу W_{kk}^{-1} , можно привести это уравнение к виду

$$X_k = -\bar{W}_{k0}X_0 - \bar{C}_k S_k, \quad k = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где $\bar{W}_{k0} = W_{kk}^{-1}W_{k0}$; $\bar{C}_k = W_{kk}^{-1}C_k$.

Преобразованной форме уравнения подсхем (3) соответствует преобразованный обобщенный сигнальный граф, приведенный на рис. 2.

Очевидно, что переход к такой структуре обобщенного сигнального графа возможен только при условии существования для всех

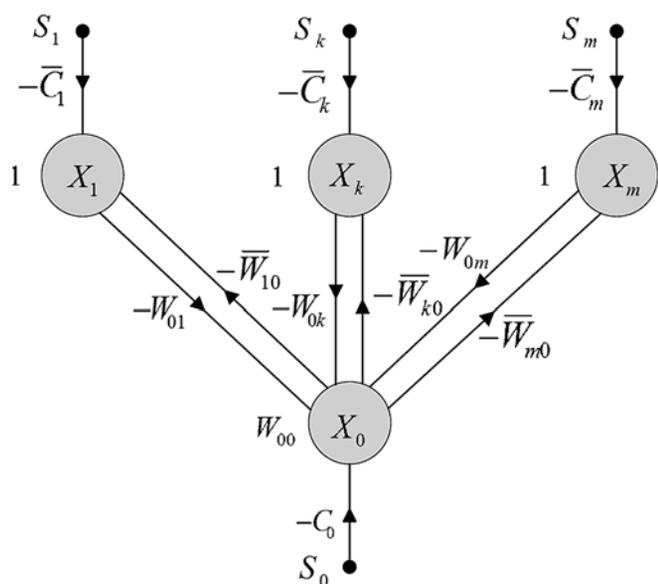


Рис. 2. Обобщенный сигнальный граф преобразованной схемы

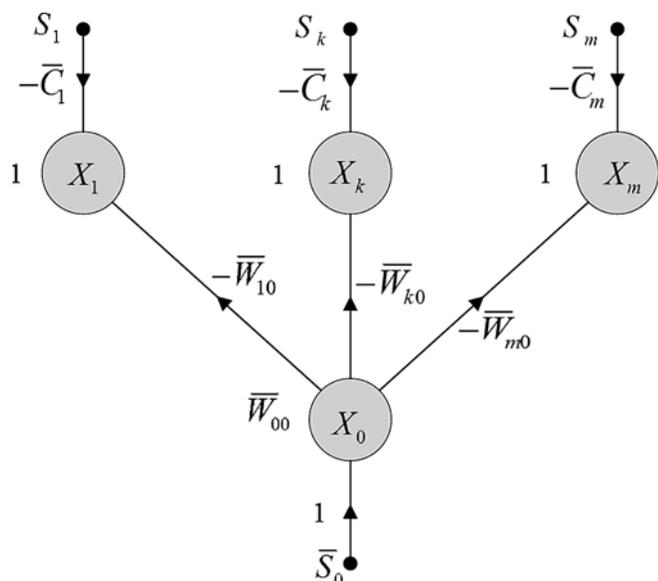


Рис. 3. Заключительный этап топологического описания слабосвязанной схемы

подсхем обратной матрицы W_{kk}^{-1} , что требует выполнения условия неравенства нулю определителя Δ матрицы W_{kk} для всех подсхем. Условия существования обратной матрицы W_{kk}^{-1} для всех подсхем обычно выполняются, если в качестве отдельных подсхем выделять законченные функциональные блоки, каждый из которых выполняет вполне определенную задачу. Однако в исключительных случаях может потребоваться более детальный анализ структуры выделенных подсхем и значений их определителей, что особенно удобно выполнять топологическим путем на основании изучения обобщенных сигнальных графов отдельных подсхем.

Для построения окончательного представления топологического описания задачи подставим уравнение (3) в уравнение (2), что дает

$$\bar{W}_{00}X_0 = \bar{S}_0, \quad (4)$$

где

$$\bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m W_{0k} \bar{W}_{k0},$$

$$\bar{S}_0 = -C_0 S_0 + \sum_{k=1}^m W_{0k} \bar{C}_k S_k.$$

Уравнениям (3) и (4) соответствует обобщенный сигнальный граф, приведенный на рис. 3.

Таким образом, в результате проведенной декомпозиции могут быть определены все узловые переменные вектора $X_0 = V_0 = [\dots, v_p, \dots]^T$, что позволяет найти на основании выражения (1) все внутренние переменные $X_k = [\dots, x_j, \dots]^T$ подсхем моделируемой системы. При этом вместо решения общего уравнения системы $WX + S = 0$ используется обращение матриц W_{kk} и W_{00} , порядок которых путем выбора соответствующего числа подсистем и узлов связи может быть сделан сколь угодно малым.

Организация параллельных вычислительных процессов

Декомпозиция системы на базе диакоптического подхода весьма удобна для организации вычислительного процесса, основанного на параллельной организации вычислений, когда формирование и обработка уравнений для отдельных подсистем выполняется на различных компьютерах, работающих в узлах некоторой сети. Каждый из таких компьютеров должен

быть связан с центральным компьютером, осуществляющим решение уравнений связи на основе данных, полученных при обработке уравнений подсистем. Результат решения уравнений связей затем пересылается на компьютеры, реализующие работу с отдельными подсистемами, где и выполняется окончательный расчет всех переменных (рис. 4).

Структурная схема возможной организации параллельного вычислительного процесса приведена на рис. 5.

В соответствии с приведенной структурой организации параллельного вычислительного процесса процесс решения задачи разделяется на следующие этапы:

1. Для каждой k -й подсистемы на основе введенной информации на компьютере узла сети N_k формируются массивы параметров блочных матриц W_{kk} , W_{k0} , W_{0k} , W_{00} , S_0 , S_k .

2. Выполняется алгоритм Гаусса—Жордано [10—12] для каждой k -й подсистемы, в результа-

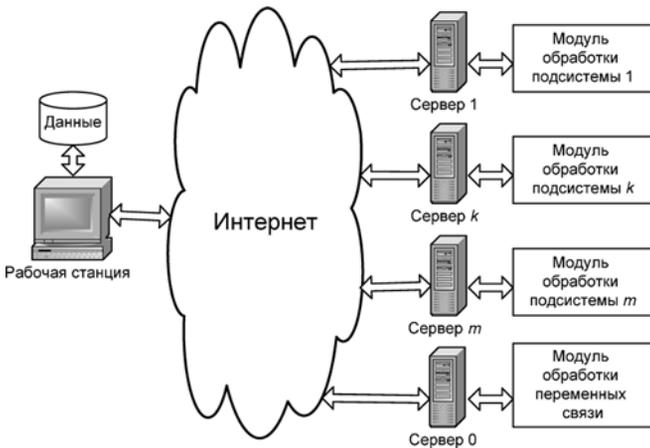


Рис. 4. Архитектура распределенной системы автоматизированного проектирования

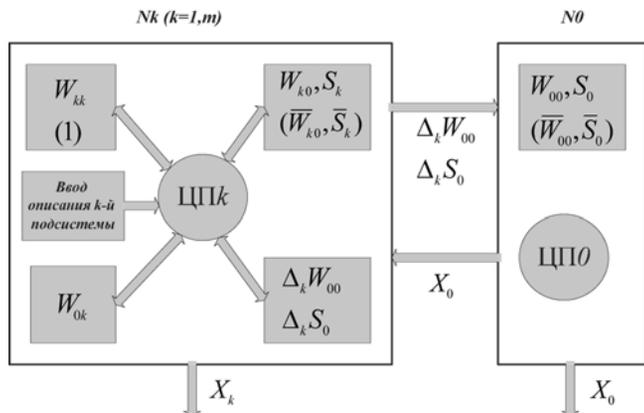


Рис. 5. Организация параллельного вычислительного процесса

те чего матрица W_{kk} преобразуется в единичную диагональную матрицу, а матрицы W_{k0} и S_k преобразуются соответственно в \bar{W}_{k0} и \bar{S}_k .

3. В каждом узле сети N_k вычисляются поправки $\Delta_k W_{00} = \bar{W}_{k0} W_{0k}$ и $\Delta_k S_0 = W_{0k} \bar{S}_k$, которые после завершения обработки каждой подсистемы передаются на компьютер центрального узла N_0 .

4. На компьютере центрального узла N_0 вычисляются матрицы $\bar{W}_{00} = W_{00} - \sum_{k=1}^m \Delta_k W_{00}$ и $\bar{S}_0 = S_0 - \sum_{k=1}^m \Delta_k S_0$, после чего на основе выражения (2) проводится расчет вектора узловых переменных X_0 .

5. Значение вектора X_0 пересылается на все узлы сети N_k , где для каждой k -й подсистемы выполняется на основании выражения (1) расчет векторов X_k внутренних переменных отдельных подсистем.

Использование диакоптического подхода для моделирования больших систем на основе декомпозиции исходной системы на ряд подсистем позволяет существенно повысить эффективность вычислительных процессов при параллельной организации вычислений. При этом достигается значительная экономия требуемого объема оперативной памяти и существенно снижается время, необходимое для решения задачи моделирования больших систем, имеющих слабосвязанную иерархическую структуру.

Пусть V_D — объем памяти, необходимой для расчета с использованием диакоптического подхода, V — объем памяти, требуемый для расчета обычными методами. Если система разделена на m подсистем, число переменных в каждой подсистеме равно n_k , а число переменных связи составляет n_0 , то коэффициент экономии оперативной памяти $\alpha = V/V_D$ диакоптического подхода при организации параллельного вычислительного процесса можно определить выражением

$$\alpha = \frac{\left(n_0 + \sum_{k=1}^m n_k \right)^2}{\left(\max_k n_k + n_0 \right)^2}.$$

Так, если система разделена на 10 одинаковых подсистем ($m = 10$), и число переменных в каждой подсистеме равно числу переменных связи $n_k = n_0$, то значение коэффициента экономии оперативной памяти $\alpha \approx 30$.

Эффективность параллельного вычислительного процесса по быстродействию может быть определена на основании соотношения

$$\beta = \frac{\left(n_0 + \sum_{k=1}^m n_k \right)^3}{\max_k n_k^3 + b n_0^2 \max_k n_k + n_0^3},$$

где $b = 1/3$ или $b = 1/2$.

Если моделируемая система разбита на 10 одинаковых подсхем ($m = 10$), и число переменных в каждой подсхеме равно числу переменных связи, т. е. $n_k = n_0$, то получим при переходе на параллельный вычислительный процесс повышение быстродействия вследствие использования диакоптического подхода в 570 раз.

Таким образом, рассмотренные методы моделирования систем на основе декомпозиции исходной системы на ряд подсхем и организации параллельного вычислительного процесса существенно уменьшают время, необходимое для решения задач моделирования больших слабосвязанных систем, и тем самым позволяют значительно повысить эффективность распределенной системы автоматизированного проектирования.

Заключение

Использование диакоптического подхода для моделирования больших систем на основе декомпозиции исходной системы на ряд подсхем позволяет значительно повысить эффективность вычислительных процессов. Эффективность метода диакоптики проявляется наиболее полно при анализе сложных систем и сводится к сокращению затрат машинного времени, тем большему, чем сложнее анализируемая модель системы.

В статье рассмотрена методика описания систем с помощью обобщенных сигнальных графов, которые отображают систему уравнений, записанных в обобщенной причинно-следственной форме, и содержат взвешенные вершины, среди которых могут быть и вершины с нулевым весом. Такое описание помимо наглядного представления о структуре связей между подсхемами позволяет снять проблему выбора последовательности нумерации вну-

тренних переменных подсхем и переменных узлов связи.

Декомпозиция системы на базе диакоптического подхода весьма удобна для организации вычислительного процесса, основанного на параллельной организации вычислений, когда формирование и обработка уравнений для отдельных подсхем выполняется на различных компьютерах, работающих в узлах некоторой сети. При этом достигается значительная экономия требуемого объема оперативной памяти и существенно снижается время, необходимое для решения задачи моделирования больших систем, имеющих слабосвязанную иерархическую структуру, что позволяет значительно повысить эффективность распределенной системы автоматизированного проектирования.

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. Коваленко О. С., Курейчик В. М. Обзор проблем и состояний облачных вычислений и серверов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 146–153.
3. Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А. Построение схем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 23–27.
4. Анисимов Д. А. Методы построения схем автоматизации схемотехнического проектирования на основе веб-сервисов // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2012. № 10. С. 56–61.
5. Крон Г. Исследование сложных схем по частям — диакоптика / Пер с англ. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. 544 с.
6. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи / Пер с англ. М.: Мир, 1974. 342 с.
7. 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.
8. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и схемы / Пер с англ. М.: Изд. иностр. лит. 1963. 619 с.
9. Анисимов В. И. Топологический расчет электронных схем. Л.: Энергия, 1977. 238 с.
10. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1960. 656 с.
11. Чуа Л. О., Лин П. М. Машинный анализ электронных схем / Пер с англ. М.: Энергия, 1980. 640 с.
12. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / Пер с англ. М.: Радио и связь, 1988. 560 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

Organization of Parallel Computing Processes in Distributed Automation Systems of Circuit Design

Discusses methods to build distributed systems of the automated designing on the basis of by diakoptical approach to the decomposition of the simulated circuit. The article deals with the method of describing systems using generalized signal graphs, which display the system of equations written in generalized cause-and-effect form. This description, in addition to a visual representation of the structure of links between subcircuits, eliminates the problem of choosing the sequence of numbering of internal variables of subcircuits and variables of communication nodes. The decomposition of the system on the basis of the diakoptical approach allows to implement an effective computational process based on the parallel organization of calculations, when the formation and processing of equations for individual subcircuits is performed on different nodes of the distributed network. This achieves significant savings in the required amount of RAM and significantly reduces the time required to solve the problem of modeling large circuits, which can significantly improve the efficiency of distributed automation system circuit design.

Keywords: computer-aided design, diakoptics, system modeling, generalized signal graphs, distributed systems, Internet technologies

Acknowledgements: The work is carried out within the framework of topic No. 0071-2019-0001.

DOI: 10.17587/it.25.643-649

References

1. Anisimov V. I., Gridin V. N. *Informacionnye Tekhnologii v Proektirovanii i Proizvodstve*, 2009, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
2. Kovalenko O. S., Kureychik V. M. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 7, pp. 146–153 (in Russian).
3. Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A. *Informacionnye Tekhnologii*. 2011, no. 5, pp. 23–27 (in Russian).
4. Anisimov D. A. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2012, no. 10, pp. 56–61 (in Russian).
5. Kron G. A research of complex circuits in parts — a diakoptika, Moscow, Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1972, 544 p. (in Russian).
6. Hepp H. Diakoptika and electrical circuits, Moscow, Mir, 1974, 342 p. (in Russian).
7. Anisimov V. I., Tarasova O. B., Almaasali S. A. *Informacionnye Tekhnologii v Proektirovanii i Proizvodstve*, 2013, no. 4, pp. 14–17 (in Russian).
8. Mezon S., Zimmerman G. Electronic chains, signals and schemes, Moscow, Izd. inostr. lit., 1963, 619 p. (in Russian).
9. Anisimov V. I. Topological calculation of electronic circuits, Leningrad, Energiya, 1977, 238 p. (in Russian).
10. Faddeev D. K., Faddeeva V. N. Computing methods of a linear algebra. Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, Moscow, 1960, 656 p. (in Russian).
11. Chua L. O., Lin P. M. Computerized analysis of electronic circuits, Moscow, Energiya, 1980, 640 p. (in Russian).
12. Vlach I., Singkhal To. Machine methods of the analysis and design of electronic circuits, Moscow, Radio i svyaz', 1988, 560 p. (in Russian).