

Построение веб-сервисов для расчета неустойчивости стационарного режима нелинейных систем¹

В.И. Анисимов, В.Н. Гридин, А.Д. Ахмад

Аннотация. Рассматривается методика построения программного обеспечения для расчета неустойчивости стационарного режима электронных схем в сервис-ориентированных системах автоматизированного проектирования. Программное обеспечение использует технологию обработки разреженных матриц на основе сжатия данных, обеспечивающую высокое быстродействие выполнения вычислительных операций, что имеет большое значение при работе распределенной системы в сети Интернет. В качестве варьируемых параметров могут выступать значения сопротивлений резисторов и параметры передач управляемых источников, а также параметры произвольных внешних воздействий (температура, давление, влажность и т.д.), при этом обеспечивается расчет скалярной чувствительности неустойчивости выбранной переменной стационарного режима электронных схем к вариации произвольной совокупности варьируемых параметров компонентов.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, веб-технологии, веб-сервисы, сервис-ориентированная архитектура, распределенные системы.

Введение

Анализ неустойчивости режима работы электронных схем является важнейшим этапом проектирования современной электронной аппаратуры [1-6]. Поэтому современные системы автоматизации схемотехнического проектирования должны иметь в своем составе средства для решения такой задачи. При этом в процессе расчета неустойчивости переменных стационарного режима необходимо учитывать как технологический разброс параметров компонентов, так и влияние на эти параметры внешних воздействий (изменение температуры, влажности, давления и т.д.).

Учитывая широкое распространение Интернет-технологий для организации процессов

распределенного проектирования [7-10], при построении распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования следует обеспечить в них наличие веб-сервисов, решающих указанные задачи. Методы этих веб-сервисов должны выполнять расчет абсолютной и относительной чувствительности базисных координат стационарного режима нелинейной схемы к вариации параметров и внешних воздействий, а также значения абсолютной и относительной чувствительности потенциальных и токовых переменных нелинейных компонентов электронной схемы (диодов, биполярных транзисторов, униполярных транзисторов, операционных усилителей, нелинейных управляемых источников типа ИТУН (источники тока, управляемые напряжением),

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов № 14-07-00112 а, № 15-07-01119.

ИНУН (источники напряжения, управляемые напряжением), ИТУТ (источники тока, управляемых током) или ИНУТ (источники напряжения, управляемые током).

Возможны два подхода к построению такого веб-сервиса. Первый подход основан на использовании в нем метода, выполняющего расчет векторной чувствительности всех переменных к вариации выбранного единственного параметра схемы. Второй подход основан на использовании метода расчета скалярной чувствительности выбранной единственной переменной к вариации всех параметров схемы. Каждый подход имеет свои достоинства и недостатки, и выбор того или иного подхода определяется особенностями задач, поставленных в процессе проектирования.

В статье рассматривается методика построения программного обеспечения метода веб-сервиса, обеспечивающего расчет скалярной чувствительности неустойчивости выбранной переменной стационарного режима электронных схем к вариации всей совокупности варьируемых параметров компонентов. В качестве варьируемых параметров могут выступать значения сопротивлений резисторов и параметры передач управляемых источников типа ИТУН, ИНУН, ИТУТ или ИНУТ, а также параметры произвольных внешних воздействий (температура, давление, влажность и т.д.). В целях повышения скорости выполнения вычислительных операций программное обеспечение веб-сервиса основано на компактной обработке разреженных матриц с использованием сжатия данных, что имеет большое значение для минимизации времени взаимодействия с сервером при работе в сети Интернет.

1. Алгоритм функционирования веб-сервиса

В качестве анализируемой переменной, для которой необходимо выполнить расчет ее неустойчивости при вариации параметров компонентов схемы, выберем некоторую независимую переменную многополюсника q_k , которая может быть как потенциальной, так и токовой переменной. Чувствительность переменной q_k нелинейной схемы к вариации обобщенного

параметра $w = [R, y, \mu, \beta, z, \lambda]$, составляющими которого являются значения сопротивления двухполюсника схемы типа R, параметры передачи y, μ, β, z управляемых источников типа ИТУН, ИНУН, ИТУТ, ИНУТ, а также параметры произвольных внешних воздействий λ (температура, давление, влажность и т.д.), может быть определена следующими выражениями

$$\gamma_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} \quad \text{— абсолютная чувствительность}$$

$$\tilde{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} \frac{w}{q_k} = \gamma_w^q \frac{w}{q_k} \quad \text{— относительная чувствительность}$$

чувствительность

$$\bar{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} w = \gamma_w^q w \quad \text{— полуотносительная}$$

чувствительность

Выберем для описания схемы модифицированный узловой базис [11], составляющими которого являются узловые потенциалы и токовые переменные всех независимых токов многополюсных элементов. Тогда выбранную анализируемую переменную q_k можно связать с базисными переменными соотношением

$$q_k = T^t X, \quad (1)$$

где

$$T = \begin{bmatrix} i & 1 \\ j & -1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \end{bmatrix}.$$

Дифференцируя уравнение (1) по обобщенной переменной w нелинейной системы в точке $X = X^0$, получим выражение для абсолютной чувствительности

$$\gamma_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} = T^t \frac{\partial X}{\partial w} = T^t \bar{X}, \quad \text{где } \bar{X} = \frac{\partial X}{\partial w}. \quad (2)$$

Вектор \bar{X} может быть получен путем дифференцирования уравнения нелинейной схемы $W_1 X + S_1 + S_2 = 0$, где W_1, S_1 - матрица и задающий вектор, определяемые линейными компонентами, S_2 - задающий вектор, определяемый нелинейными компонентами. Учитывая, что $W_1 = W_1(w)$ и $S_2 = S_2(w, X)$, получим

$$W^0 \bar{X} + \bar{S} = 0,$$

$$\text{где } W^0 = W_1 + W_2^0, \quad \bar{S} = \frac{\partial W_1}{\partial w} X + \frac{\partial S_2}{\partial w}.$$

Отсюда имеем

$$\bar{X} = -(W^0)^{-1} \bar{S}$$

Подставляя \bar{X} в уравнение (2), получим уравнение для чувствительности в виде

$$\gamma_w^q = -T^t (W^0)^{-1} \bar{S} \quad (3)$$

Для практического использования полученного выражения построим присоединенную схему \hat{N} согласно следующей методике.

1. Если q_k - потенциальная переменная, то к точкам ее определения подключить единичный источник тока.

2. Если q_k определяет ток, протекающий в некотором компоненте, то последовательно с ним включить единичный источник напряжения.

3. Закоротить (разомкнуть) ветви задающих источников напряжения (тока)

4. Заменить матрицу W^0 основной схемы N транспонированной матрицей $(W^0)^t$.

Тогда уравнение присоединенной схемы будет иметь вид $(W^0)^t \hat{X} + T = 0$, или $\hat{X}^t W^0 + T^t = 0$. Отсюда получим вектор переменных \hat{X}^t присоединенной схемы

$$\hat{X}^t = -T^t (W^0)^{-1}. \quad (4)$$

Подставляя правую часть этого уравнения в уравнение (3), окончательно получим

$$\gamma_w^q = \hat{X}^t \bar{S} \quad (5)$$

Для использования полученного выражения помимо вектора переменных присоединенной схемы \hat{X}^t необходимо иметь в распоряжении значение вектора $\bar{S} = \frac{\partial W_1}{\partial w} X + \frac{\partial S_2}{\partial w}$, который имеет две составляющих.

Чтобы определить первую составляющую, отметим, что в общем случае уравнение управляемого источника имеет вид

$$p_w = w q_w, \quad (6)$$

где q_w - независимая (управляющая) переменная, действующая между входными узлами а и b, а p_w - зависимая (управляемая) переменная, действующая между выходными узлами с и d, при этом для двухполюсника уравнение имеет такой же вид, но входные и выходные узлы совпадают, т.е. а = с, b = d.

Вторая составляющая определяется характеристиками зависимости задающего вектора нелинейных компонентов $S_2 = S_2(w, X)$ от внешних воздействий, и ее вычисление осуществляется простым дифференцированием конкретных функциональных зависимостей. При этом в качестве переменной w принимается параметр внешнего воздействия λ .

Поэтому, ограничиваясь первой составляющей вектора \bar{S} , и учитывая, что уравнению (6) в общем случае соответствует матрица W_1 , в которой параметр W расположен на пересечении столбцов с индексами а, b и строк с индексами с, d, можно записать

$$\bar{S} = \frac{\partial W_1}{\partial w} X = \begin{matrix} & \begin{matrix} a & b \end{matrix} \\ \begin{matrix} c \\ d \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_a - x_b \\ -(x_a - x_b) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} c & d \\ \begin{bmatrix} x_a - x_b \\ -(x_a - x_b) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Следовательно, абсолютная чувствительность переменной q_k нелинейной схемы к вариации обобщенного параметра $w = [R, y, \mu, \beta, z, \lambda]$, может быть определена выражением

$$\gamma_w^q = \hat{X}^t \bar{S} = \begin{matrix} \begin{matrix} c & d \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{x}_c & \hat{x}_d \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} x_a - x_b \\ -(x_a - x_b) \end{bmatrix} \\ \begin{matrix} c \\ d \end{matrix} \end{matrix} = (\hat{x}_c - \hat{x}_d)(x_a - x_b).$$

Очевидно, что для управляемого источника $x_a - x_b = q_w$, $\hat{x}_c - \hat{x}_d = \hat{p}_w$, где переменная q_w принадлежит основной схеме N , а переменная \hat{p}_w - присоединенной схеме \hat{N} , т.е.

$$\gamma_w^q = \hat{p}_w q_w. \quad (7)$$

Для двухполюсника типа R имеем $\hat{x}_c - \hat{x}_d = \hat{x}_a - \hat{x}_b = \hat{q}_w$, и, следовательно

$$\gamma_w^q = \hat{q}_w q_w. \quad (8)$$

Таким образом, можно сформулировать следующий алгоритм расчета скалярной чувствительности переменных стационарного режима на основе присоединенной схемы:

1. Расчет вектора X базисных переменных стационарного режима основной схемы N путем схемотехнической интерпретации метода

Ньютона-Рафсона и LU-факторизации с запоминанием результатов линеаризации схемы на последней итерации.

2. Построение вектора T задающих воздействий присоединенной схемы \hat{N} .

3. Виртуальная LU-факторизация присоединенной схемы путем транспонирования результатов LU-факторизации основной схемы N на последней итерации.

4. Расчет вектора \hat{X}^t присоединенной схемы.

5. Расчет значений q_w и $\hat{p}_w(\hat{q}_w)$ для всей группы выбранных варьируемых параметров.

6. Расчет абсолютной чувствительности $\gamma_w^q = \hat{p}_w q_w$ и $\gamma_w^{\hat{q}} = \hat{q}_w q_w$ для всей группы варьируемых параметров.

7. В случае необходимости расчет относительной чувствительности и полу- относительной чувствительности для всей группы варьируемых параметров.

Следует отметить, что при расчете присоединенной схемы не требуется выполнять LU-факторизацию массивов описания, так как эта задача решается простым транспонированием результатов расчета основной схемы на последнем шаге итерационного процесса.

2. Структура программного обеспечения веб-сервиса на основе сжатия данных

При программной реализации веб-сервиса необходимо обеспечить его высокое быстродействие, поскольку веб-сервис должен функционировать в среде Интернет. Для этого следует использовать сжатие данных на основе технологии обработки разреженных матриц [11] с тем, чтобы уменьшить размерность используемых массивов.

Такая задача может быть решена путем использования различных методов компактной обработки данных, сравнительная оценка основных характеристик которых приводит к выводу, что наибольшей эффективностью обладает метод фиксированного формата для структурно-симметричных матриц, обеспечивающий наиболее компактную форму сжатия данных. Вместе с тем из-за фиксированного формата используемых массивов описания

схемы этот метод не позволяет обеспечить включение в это описание дополнительных элементов, которые неизбежно возникают в процессе решения уравнений при любом способе такого решения.

Чтобы обеспечить возможность использования метода компактной обработки данных на основе фиксированного формата в реальных условиях моделирования следует предусмотреть возможность расширения формата при появлении новых ненулевых элементов путем использования двухэтапной процедуры [12], структурная схема которой приведена на Рис. 1.

На этапе символьного анализа (шаги 1–3) формируется индексная матрица C , имеющая такие же размеры, как исходная матрица, проводится LU-факторизация построенной индексной матрицы, в процессе которой выполняется упорядочивание последовательности индексов строк с целью обеспечения минимального числа вновь появившихся ненулевых элементов и осуществляется построение координатных матриц ERC, WJI, SI, где будет содержаться информация о структуре матрицы C , которую по завершении этапа символьного анализа можно удалить.

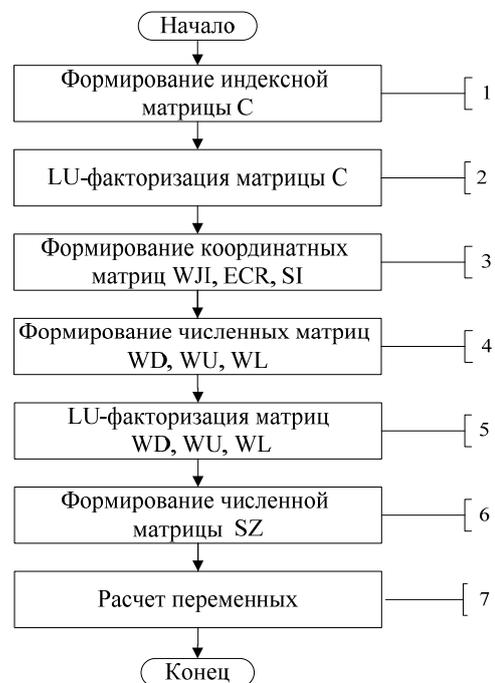


Рис. 1. Структурная схема двухэтапной процедуры расчета

На численном этапе (шаги 4–10) на основании уже известного формата описания открываются массивы WD , WU , WL для диагональных, наддиагональных и поддиагональных элементов и выполняется формирование соответствующих массивов. Здесь же приводится численная LU-факторизация, которая выполняется виртуально путем обработки компактных массивов WU , WL , WD . На шестом шаге формируется массив задающих источников SZ , и на седьмом шаге выполняется расчет всех переменных системы и перекодировка этих переменных согласно проведенному на этапе символьного анализа упорядочиванию столбцов и строк.

Существенным достоинством рассмотренной двухэтапной процедуры является разделение ее на две независимые части, содержащие символьный и численный этапы. Так как практически все реальные задачи разработки электронных схем связаны с многовариантным расчетом схемы выбранной структуры, то символьный этап выполняется для каждой структуры один раз, тогда как численный этап в реальных задачах многовариантного расчета и наличия итерационных циклов реализуется многократно.

Дополняя рассмотренный в предыдущем разделе алгоритм расчета скалярной чувствительности переменных стационарного режима на основе присоединенной схемы двухэтапной процедурой компактной обработки данных, можно построить приведенную на Рис. 2 блок-схему расчета чувствительности нелинейной схемы к вариации ее параметров вследствие изменения внешних воздействий или технологического разброса.

После создания требуемых объектов осуществляется переход к символьному этапу расчета, который выполняется в соответствии с блок схемой описания двухэтапной процедуры. По окончании работы символьного этапа становится известен формат массивов для расчета вектора переменных стационарного режима основной схемы.

После начальной установки переменных начинается итерационный цикл, в котором проводится линеаризация компонентов, формирование описания линеаризованной схемы и расчет вектора переменных X основной схемы.

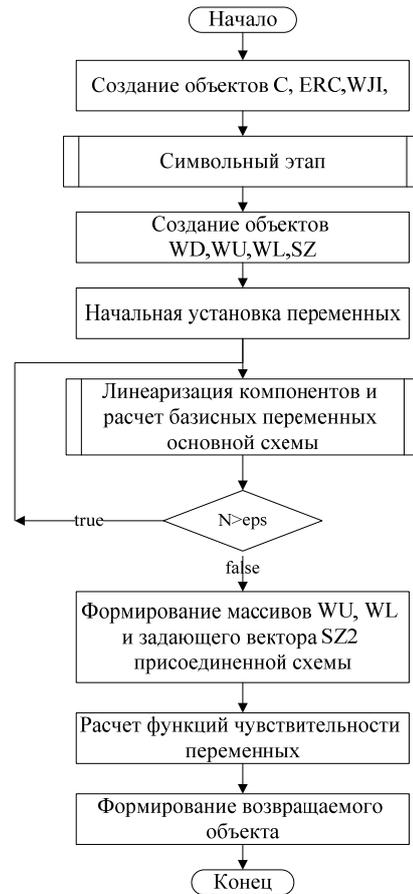


Рис.2. Блок-схема расчета чувствительности нелинейных схем к вариации параметров

Так как информация, содержащаяся в массивах WU , WL , будет использоваться как для основной, так и для присоединенной схем, то до начала LU-факторизации эти массивы копируются в рабочие массивы $WU1$ и $WL1$, которые используются при LU-факторизации описания основной схемы.

Формирование массивов для присоединенной схемы осуществляется простым копированием массива $WL1$ в массив WU и массива $WU1$ в массив WL , что реализует в виртуальной форме требуемое транспонирование исходной матрицы.

Расчет функций абсолютной чувствительности выполняется на основании выражений (7) и (8), в случае необходимости выполняется также расчет относительной и полуотносительной чувствительностей заданной полюсной переменной к вариации параметров резисторов и передач управляемых источников.

На заключительном этапе выполняется формирование возвращаемого массива, в котором содержатся значения абсолютной и относительной чувствительности выбранной полюсной переменной для всех варьируемых параметров компонентов схемы.

Заключение

Программное обеспечение веб-сервиса выполняет расчет значений абсолютной и относительной чувствительности выбранной для анализа переменной стационарного режима нелинейной схемы при вариации произвольной группы параметров компонентов схемы. Достоинством программного обеспечения веб-сервиса является его высокая эффективность, обусловленная компактной формой описания разреженных матриц, что обеспечивает высокое быстродействие программного обеспечения и минимизацию времени взаимодействия с сервером в сети Интернет. Использование результатов работы метода веб-сервиса позволяет исключить недопустимое изменение основных характеристик проектируемых электронных схем, а также возможное нарушение их работоспособности.

Практическая реализация результатов при построении распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования позволяет существенно повысить производительность работы веб-сервисов и обеспечивает повышение надежности функционирования распределенной системы вследствие уменьшения времени взаимодействия клиентского приложения с сервером.

Анисимов Владимир Иванович. Профессор Санкт-Петербургского электротехнического университета. Окончил Ленинградский электротехнический институт в 1949 году. Доктор технических наук. Автор 250 печатных работ и одной монографии. Область научных интересов: моделирование систем, распределенные системы автоматизированного проектирования. E-mail: vianisimov@inbox.ru

Гридин Владимир Николаевич. Научный руководитель Центра информационных технологий в проектировании РАН. Окончил МАТИ в 1972 году. Доктор технических наук, профессор. Автор 278 печатных работ и одной монографии. Область научных интересов: информационные технологии в проектировании, безопасность систем. E-mail: info@ditc.ras.ru

Ахмад Алгаиб Давод. Аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета. Окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет в 2006 году. Автор трех печатных работ. Область научных интересов: моделирование систем, веб-ориентированные системы автоматизированного проектирования. E-mail: juneidavid@hotmail.com

Литература

1. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем, пер. с англ. - М.: «Радио и связь», 1988, 560 с.
2. Анисимов В.И., Дмитриевич Г.Д., Ежов С.Н. и др. Автоматизация схемотехнического проектирования на мини-ЭВМ. – Л.: Изд-во Ленингр.ун-та, 1983, 198 с.
3. Анисимов В.И., Дмитриевич Г.Д., Скобельцын К.Б. и др. Диалоговые системы схемотехнического проектирования. – М.: «Радио и связь» 1988, 286 с.
4. Анисимов В.И. Автоматизация расчета неустойчивости режима работы электронных схем. Теоретическая электротехника. №5, 1973.
5. Анисимов В.И. Автоматизация расчета приведенной неустойчивости (дрейфа) усилителей постоянного тока. Автоматика и телемеханика. №7, 1973.
6. Анисимов В.И. Топологический расчет электронных схем. –Л.: «Энергия», 1977, 238 с.
7. Анисимов В.И., Гридин В.Н. Методы построения систем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц. Информационные технологии в проектировании и производстве, №1, 2009.
8. Коваленко О.С., Курейчик В.М. Обзор проблем и состояний облачных вычислений и серверов. Известия ЮФУ. Технические науки. № 7, 2012.
9. Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-сервисов. Автоматизация в промышленности, №1, 2011.
10. Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий. Информационные технологии, №5, 2011.
11. Писсанецки С. Технология разреженных матриц, пер. с англ. – М.: «Мир», 1988, 406 с.
12. Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А. Построение веб-сервисов систем автоматизации схемотехнического проектирования. Информационные технологии и вычислительные системы, №4, 2012.