

7. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Методы и технологии генерации системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.

8. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Квалитология системного знания. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.

9. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Введение в язык систем. СПб.: Наука, 2009.

10. Качанова Т. Л., Фомин Б. Ф. Знание-центрическая аналитика многомерных открытых систем // Материалы 9-й конф. «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2016) / ГНЦ РФ «АО «Концерн ЦНИИ „Электроприбор“». СПб., 2016. С. 121–129.

T. L. Kachanova, B. F. Fomin, O. B. Fomin
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ANALYTICAL CORE OF PHYSICS OF OPEN SYSTEMS

Physics of open systems (POS) proposes its own approaches and methods of cognition of open systems in their natural scales and real complexity. On this basis a new cyber-physic paradigm of systemology became a reality. In this paradigm the analytical core of POS (a complex of informational and cognitive technologies that automatically generate scientifically proven knowledge about the systems' ontology from a huge multidimensional set of heterogeneous empirical data) occupies a central position.

Represents a brief review of composition, structure, and capabilities of the analytical core. In considering the analytical core, much attention has been paid to technological component (technologies to generate knowledge, and to scientifically understand and rationally explain generated knowledge), as well as to qualimetric component (technologies to analyze the value (correctness, fullness, and completeness) of obtained knowledge). A special emphasis has been given to what is the role and where is the place of these technologies of analytical core in architecture of technological platform to generate and exploit knowledge about open systems.

Open systems, Big Data, physics of open systems, ontological knowledge, knowledge mining from empirical data, value of ontological knowledge, multidimensional knowledge-centric system analytics

УДК 004.94

В. Н. Гридин

Центр информационных технологий в проектировании РАН

В. И. Анисимов, А. Д. Ахмад

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Построение веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций методом присоединенных схем

Рассматриваются вопросы построения веб-сервисов распределенных сервис-ориентированных систем автоматизации схемотехнического проектирования для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров и внешних воздействий. В качестве варьируемых значений могут приниматься параметры двухполюсников типа R, C, L и параметры передач управляемых источников произвольного типа, а также параметры возможных внешних воздействий (температура, давление, влажность и т. д.). Приводится методика построения веб-сервисов распределенных сервис-ориентированных систем автоматизации схемотехнического проектирования для расчета чувствительности передаточных функций ко всем варьируемым параметрам методом присоединенной схемы. Дается описание списка аргументов метода веб-сервиса для расчета значений относительной модульной и полурасположенной фазовой чувствительности, а также вещественной и мнимой частей абсолютной чувствительности выбранной передаточной функции моделируемой схемы для всех варьируемых параметров компонентов схемы и для всех частотных точек.

Системы автоматизированного проектирования, веб-технологии, веб-сервисы, присоединенные схемы, распределенные системы

Важнейшим этапом проектирования электронной аппаратуры является расчет чувствительности их основных характеристик к вариации

параметров компонентов. К таким характеристикам относятся, прежде всего, передаточные функции электронных схем в частотной области.

Для возможности практической реализации расчета чувствительности передаточных функций к внешним воздействиям необходимо иметь в распоряжении данные о зависимости конкретных характеристик компонентов схемы от внешних воздействий (изменение температуры, давления, и т. д.). Основными источниками информации о параметрах компонентов электронных схем являются следующие:

- справочные данные на компоненты моделируемой схемы, которые определяются в результате соответствующих измерений при проведении контроля в процессе изготовления компонентов и являются основанием для их практического применения;
- технологическая документация на компоненты, в которой содержится информация о режимах производства, характеристиках компонентов и электрических параметрах используемых для их изготовления материалов;
- экспериментальные данные, полученные при исследовании отдельных экземпляров или группы компонентов на предприятии, где выпускается электронная аппаратура.

При наличии полной информации о параметрах компонентов расчет чувствительности передаточных функций к вариации параметров всех компонентов схемы может быть выполнен методом присоединенной схемы, что позволяет получить значение скалярной чувствительности выбранной передаточной функции к вариации всех параметров схемы.

В настоящее время в информационные системы широко внедрились интернет-технологии. 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]–[3]. Существенным достоинством технологии веб-сервисов является возможность их постоянной модификации и расширения добавлением новых, более продуктивных методов. Основная нагрузка по выполнению вычислительных операций при такой архитектуре ложится на веб-сервисы, решающие все задачи моделирования проектируемых систем, на клиентские приложения возлагаются только простейшие функции подготовки данных и отображения результатов моделирования.

Учитывая актуальность задачи проектирования электронной аппаратуры в условиях внешних воздействий, необходимо включать в распределенные сервис-ориентированные системы автоматизации схмотехнического проектирования веб-сервисы для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров компонентов электронных схем. Целью работы является создание методики построения веб-сервисов, обеспечивающих расчет чувствительности передаточных функций электронных схем к вариации всех параметров компонентов.

Пусть имеется электронная схема (рис. 1), в которой варьируется некоторый обобщенный параметр $w = [R, C, L, y, \mu, \beta, z, \lambda]$. Его составляющими могут выступать значения сопротивления, емкости, или индуктивности некоторого двухполюсника схемы типа R, C или L , параметры передачи y, μ, β, z источника тока, управляемого напряжением, источника напряжения, управляемого напряжением, источника тока, управляемого током, источника напряжения, управляемого током, а также параметры произвольных внешних воздействий λ (температура, давление, влажность и т. д.).

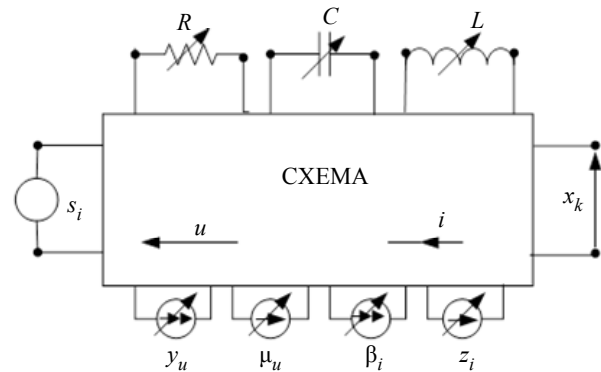


Рис. 1

Для такой обобщенной схемы можно определить передаточную функцию

$$T_{kl} = \frac{x_k}{s_l},$$

где x_k – выходная потенциальная или токовая переменная; s_l – задающий источник напряжения или тока.

Чувствительность передаточной функции T_{kl} к вариации обобщенного параметра $w = [R, C, L, y, \mu, \beta, z, \lambda]$ может быть определена выражениями

$\gamma_w^T = \frac{\partial T_{kl}}{\partial w}$ – абсолютная чувствительность передаточной функции T_{kl} ; $\tilde{\gamma}_w^T = \frac{\partial T_{kl}}{\partial w} \frac{w}{T_{kl}}$ – относительная чувствительность передаточной функции T_{kl} ; $\bar{\gamma}_w^T = \frac{\partial T_{kl}}{\partial w} w$ – полуотносительная чувствительность передаточной функции T_{kl} .

При расчете чувствительности линейных систем варьируемые параметры схемы могут входить в частотно-зависимые элементы C и L . Поэтому расчет чувствительности необходимо выполнять на основе комплексного типа данных, т. е. на основе класса Complex. Следовательно, передаточная функция T_{kl} является комплексной величиной и необходимо сформулировать правило для обработки ее составляющих. С этой целью введем в рассмотрение комплексную передаточную функцию

$$\dot{T}_{kl} = \frac{x_k}{s_l} = M e^{j\varphi}.$$

После несложных преобразований можно получить следующие выражения:

$$\tilde{\gamma}_w^T = \frac{\partial T_{kl}}{\partial w} \frac{w}{T_{kl}} = \tilde{\gamma}_w^M + j\tilde{\gamma}_w^\varphi,$$

где $\tilde{\gamma}_w^M = \frac{\partial M}{\partial w} \frac{w}{M}$ – относительная чувствительность модуля \dot{T}_{kl} ; $\tilde{\gamma}_w^\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial w} w$ – полуотносительная чувствительность аргумента \dot{T}_{kl} .

Следовательно, вещественная часть чувствительности передаточной функции представляет собой относительную чувствительность модуля

функции передачи, а мнимая часть – полуотносительную чувствительность аргумента передаточной функции.

Наиболее распространенной задачей при расчете чувствительности передаточных функций к вариации параметров и внешних воздействий является задача расчета чувствительности некоторой передаточной функции к вариации всех параметров моделируемой схемы. Такую возможность предоставляет метод расчета функций чувствительности, основанный на применении присоединенной схемы [4], [5].

Переход к присоединенной схеме осуществляется транспонированием матрицы исходной схемы (рис. 2). Помимо транспонирования матрицы для перехода к присоединенной схеме необходимо закоротить задающие источники напряжения исходной схемы и разорвать ее источники тока, а также подключить к выходу присоединенной схемы единичный источник тока (если выходной координатой исходной схемы является напряжение) или единичный источник напряжения (если выходной координатой исходной схемы является ток).

При построении алгоритма расчета чувствительности передаточной функции $\dot{T}_{kl} = \frac{x_k}{s_l}$ методом присоединенной схемы будем считать, что выходная координата x_k является независимой переменной q_k нагрузочного двухполосника, которая может быть как потенциальной, так и токовой переменной.

Чувствительность переменной q_k схемы к вариации обобщенного параметра $w = [R, C, L, \mu, \beta, z, \lambda]$, составляющими которого являются значения параметров двухполосников схемы ти-

вариации обобщенного параметра $w = [R, C, L, \mu, \beta, z, \lambda]$, составляющими которого являются значения параметров двухполосников схемы ти-

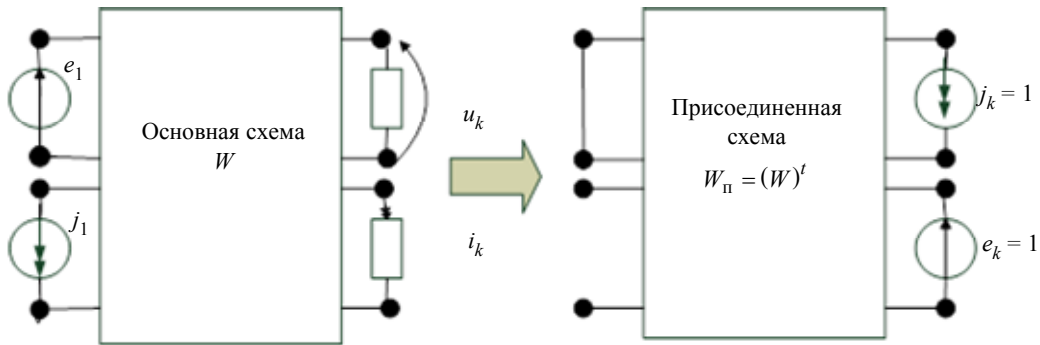


Рис. 2

па R, C, L , параметры передачи γ, μ, β, z управляемых источников, а также параметры произвольных внешних воздействий λ (температура, давление, влажность и т. д.), может быть определена следующими выражениями: $\gamma_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w}$ – аб-

солютная чувствительность переменной q_k ; $\tilde{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} \frac{w}{q_k} = \gamma_w^q \frac{w}{q_k}$ – относительная чувствитель-

ность переменной q_k ; $\bar{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} w = \gamma_w^q w$ – полу- относительная чувствительность переменной q_k .

Выберем для описания схемы модифицированный узловой базис [4], составляющими которого являются узловые потенциалы и токовые переменные всех независимых токов многополюсных элементов. Тогда выбранную анализируемую переменную q_k можно связать с базисными переменными x_i и x_j соотношением

$$q_k = \mathbf{D}^t \mathbf{X}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{D} = \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \end{bmatrix}.$$

Дифференцируя (1) по обобщенному варьируемому параметру w , получим выражение для абсолютной чувствительности переменной q_k схемы:

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

Вектор $\bar{\mathbf{X}}$ может быть получен дифференцированием уравнения моделируемой схемы $\mathbf{W}\mathbf{X} + \mathbf{S} = 0$. Учитывая, что $\mathbf{W} = \mathbf{W}(w)$, в результате получим

$$\mathbf{W}\bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{S}} = 0, \quad \text{где } \bar{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial w} \mathbf{X}.$$

Отсюда имеем

$$\bar{\mathbf{X}} = -\mathbf{W}^{-1} \bar{\mathbf{S}}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим уравнение для чувствительности переменной q_k в виде

$$\gamma_w^q = -\mathbf{D}^t \mathbf{W}^{-1} \bar{\mathbf{S}}. \quad (4)$$

Чтобы использовать полученное выражение для расчета чувствительности, построим присоединенную схему \hat{N} согласно следующей методике:

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

2. Если q_k определяет ток, протекающий в некотором компоненте, то к точкам ее определения необходимо подключить единичный источник напряжения.

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

4. Заменить матрицу \mathbf{W} основной схемы \mathbf{N} транспонированной матрицей $(\mathbf{W})^t$.

Тогда уравнение присоединенной схемы будет иметь вид $(\mathbf{W})^t \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{D} = 0$, или $\hat{\mathbf{X}}^t \mathbf{W} + \mathbf{D}^t = 0$.

Отсюда можно получить вектор переменных $\hat{\mathbf{X}}^t$ присоединенной схемы

$$\hat{\mathbf{X}}^t = -\mathbf{D}^t (\mathbf{W})^{-1}.$$

Подставив правую часть этого уравнения в (4), окончательно получим выражение для чувствительности переменной q_k к вариации обобщенного параметра w :

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

Для возможности использования (5) помимо вектора переменных присоединенной схемы $\hat{\mathbf{X}}^t$ необходимо иметь значение вектора $\bar{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial w} \mathbf{X}$.

Чтобы определить этот вектор, отметим, что в общем случае уравнение варьируемого многополюсного компонента, которым может быть управляемый источник или двухполюсник, имеет вид

$$p_w = wq_w, \quad (6)$$

где q_k – независимая (управляющая) переменная, действующая между входными узлами a и b компонента; p_w – зависимая (управляемая) переменная, действующая между его выходными узлами c и d . Для двухполюсного компонента уравнение (6) имеет такой же вид, но входные и выходные узлы компонента совпадают, т. е. $a = c, b = d$.

Учитывая, что параметр w расположен в матрице схемы W на пересечении столбцов с индексами a, b и строк с индексами c, d , можно записать соотношение для определения вектора $\bar{S} = \frac{\partial W}{\partial w} \mathbf{X}$:

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

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

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

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} . Следовательно, выражения для чувствительности выходной переменной q_k в общем случае будут иметь вид

$$\gamma_w^q = \hat{p}_w q_w.$$

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

$$\gamma_w^q = \hat{q}_w q_w.$$

Таким образом, можно сформулировать следующий алгоритм расчета скалярной чувствительности переменной q_k на основе присоединенной схемы:

1. Расчет вектора \mathbf{X} базисных переменных основной схемы N на основе LU-факторизации.
2. Построение вектора \mathbf{D} задающих воздействий присоединенной схемы \hat{N} .
3. Виртуальная LU-факторизация присоединенной схемы транспонированием результатов LU-факторизации основной схемы N .
4. Расчет вектора \hat{X}^t присоединенной схемы.
5. Расчет значений q_w и $\hat{p}_w (\hat{q}_w)$ для всех варьируемых параметров.

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

7. В случае необходимости расчет относительной чувствительности и полуотносительной чувствительности для всех варьируемых параметров.

Следует отметить, что при расчете присоединенной схемы не требуется выполнять LU-факторизацию, так как эта задача решается простым транспонированием результатов LU-факторизации основной схемы.

Поскольку при $s_l = 1$ значение передаточной функции $T_{kl} = x_k / s_l$ совпадает со значением переменной $x_k = q_k$, то значение чувствительности передаточной функции в этом случае определяется значением чувствительности этой переменной, т. е. $\gamma_w^T = \gamma_w^q$. Следовательно, полученные в результате расчета значения чувствительности γ_w^q переменной q_k при $s_l = 1$ будут определять значения чувствительности γ_w^T анализируемой схемной функции T_{kl} .

В соответствии с приведенным алгоритмом можно построить соответствующий веб-сервис для расчета чувствительности передаточной функции к вариации параметров и внешних воздействий, а также клиентское приложение для организации взаимодействия пользователей с таким веб-сервисом [3].

Заголовок метода веб-сервиса для расчета чувствительности передаточной функции к вариации всех параметров и внешних воздействий в этом случае следует представить в виде

```
float[] Имя_метода(int[] In_r, float[] Z_r, int nr,
int[] In_c, float[] Z_c, int nc, int[] In_l, float[] Z_l,
int nl, int[] In_ju, float[] Z_ju, int nju, int[] In_eu,
float[] Z_eu, int neu, int[] In_ji, float[] Z_ji, int nji,
int[] In_ei, float[] Z_ei, int nei, int[] In_tr, float[]
Z_tr, int ntr, int[] In_tri, float[] z_tri, int ntri, int[]
In_oui, int noui, int[] In_tb, float[] Z_tb, int ntb, int[]
In_tu, float[] Z_tu, int ntu, int[] In_ou, float[] Z_ou,
int nou, int nv, int lp, int lm, int kp, int km, String ts,
float[] f, int nf).
```

В начале списка аргументов записаны все аргументы, задающие описание компонентов моделируемой схемы. Для каждого типа компонента с именем cmp задаются массив включения In_cmp ,

массив значений параметров $Z_{\text{сmp}}$ и размерность $n_{\text{сmp}}$. Заключительные 8 аргументов содержат директивы расчета, при этом аргумент nv задает число узлов моделируемой схемы, аргументы lp и lm определяют узлы подключения задающего единичного источника s_l , аргументы kp и km определяют выходные узлы для выбранной передаточной функции, аргумент ts определяет тип задающего единичного источника s_l ($ts = e$ для источника напряжения и $ts = j$ для источника тока), аргумент f определяет массив частот, а аргумент nf – число частотных точек.

Метод веб-сервиса возвращает массив, в котором содержатся значения относительной модульной и полурасчетной фазовой чувствительности, а также вещественная и мнимая части абсолютной чувствительности выбранной переда-

точной функции для всех варьируемых параметров компонентов схемы и для всех частотных точек.

Рассмотренная методика позволяет построить веб-сервисы, содержащие метод расчета чувствительности передаточных функций, базирующийся на использовании присоединенной схемы. Метод веб-сервиса, использующий присоединенные схемы, позволяет рассчитать значения как абсолютной, так и относительной скалярной чувствительности передаточной функции в частотной области по отношению ко всем варьируемым параметрам для выбранного значения анализируемой переменной. Практическая реализация рассмотренной методики для построения специализированных веб-сервисов позволит обеспечить автоматизированное проектирование электронных схем с учетом вариации параметров компонентов и внешних воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 2009. № 1. С. 3–7.
2. Коваленко О. С., Курейчик В. М. Обзор проблем и состояний облачных вычислений и серверов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2012. № 7. С. 146–153.
3. Гридин В. Н., Анисимов В. И., Ахмад А. Д. Построение клиентских .NET-приложений в распреде-

ленных схемотехнических САПР // Системы и средства информатики. 2016. № 1. С. 76–85.

4. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.

5. Автоматизация схемотехнического проектирования на мини-ЭВМ / В. И. Анисимов, Г. Д. Дмитриевич, С. Н. Ежов и др. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 198 с.

V. N. Gridin

Center of information technologies in design Russian Academy of Sciences

V. I. Anisimov, A. D. Ahmad

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

BUILDING WEB SERVICES FOR CALCULATING THE SENSITIVITY OF TRANSFER FUNCTIONS USING THE ATTACHED SCHEMES

The questions of construction of web services of distributed service-oriented systems of circuit design automation for calculating the sensitivity of transfer functions to the variation of parameters and external influences are considered. Parameters of two-port networks of type R, C, L and transmission parameters of controlled sources of arbitrary type, as well as parameters of possible external influences (temperature, pressure, humidity, etc.) can be taken as variable values. The technique of constructing web services for distributed service-oriented circuit design automation systems is presented to calculate the sensitivity of transfer functions to all possible variable parameters by the attached circuit method. The description of the list of arguments of the web service method for calculating the values of the relative modular and semi-relative phase sensitivity, as well as the real and imaginary parts of the absolute sensitivity of the selected transfer function of the simulated circuit for all variable parameters of the circuit components and for all frequency points.

Computer-aided design systems, web technologies, web services, attached schemes, distributed systems