

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ**

УДК 004

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСЕРВИСНОЙ И БЕССЕРВЕРНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСТАБИЛЬНОСТИ
СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ**

© 2023 г. В. Н. Гридин^{а, *}, В. И. Анисимов^{а, b}, С. А. Васильев^{а, b}

^а Центр информационных технологий в проектировании РАН,
ул. Маршала Бирюзова, 7а, Одинцово, Московской области, 143003 Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022 Российская Федерация

*E-mail: info2@ditc.ras.ru

Поступила в редакцию 19.12.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 22.03.2023 г.

Рассмотрены методы построения распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования для расчета неустойчивости координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем. В качестве изменяемых под воздействием внешних факторов компонентов принимаются двухполюсники типа R и параметры передач зависимых источников, а также характеристики внешних воздействий (температура, радиация и т.д.). Для решения задачи расчета неустойчивости координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем предложена методика, основанная на использовании вспомогательной схемы, которая строится путем транспонирования описания исходной схемы. Проанализированы особенности организации бессерверной и микросервисной архитектуры для построения систем автоматизации схемотехнического проектирования. Описано мультиагентное проектирование среды микросервисной информационной системы. Приведен механизм работы сервиса как услуги для обеспечения работы бизнес-логики серверной составляющей.

DOI: 10.31857/S0033849423120082, EDN: GKPNZW

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач схемотехнического проектирования является расчет статического режима нелинейных электронных схем с целью вычисления координат рабочих точек и неустойчивости этих координат под влиянием внешних возмущающих воздействий (изменение температуры, радиации и т.д., а также технологического разброса характеристик компонентов при их серийном изготовлении).

В статье рассматривается методика построения веб-сервисов распределенных схемотехнических систем автоматического проектирования (САПР) для решения задачи расчета неустойчивости координат рабочих точек стационарного режима нелинейных электронных схем при вариации параметров всех компонентов схемы под воздействием внешних факторов. Данная методика основана на построении вспомогательной схемы согласно теореме Теллегена, что позволяет эффективно решать указанную выше задачу. Построение вспомогательной схемы выполняется

путем простого транспонирования матричного описания исходной схемы и устранения из исходной схемы задающих источников напряжения и тока.

Непрерывный процесс оптимизации методологии разработки программного обеспечения оказывает сильное влияние на эволюцию различных практик, повышающих эффективность необходимых бизнес-процессов. Одним из ключевых аспектов, влияющих на весь цикл разработки программного обеспечения, является выбор архитектурной модели будущего программного продукта. Разработки новых методик построения распределенных веб-ориентированных информационных систем направлены на использование микросервисных или бессерверных архитектурных стилей. Приведенные архитектурные модели требуют специальной оптимизации бизнес-логики программного обеспечения для работы с технологическими платформами этих стилей, служащими для обеспечения их концептуальных преимуществ. Повышение эффективности за счет оптимизации

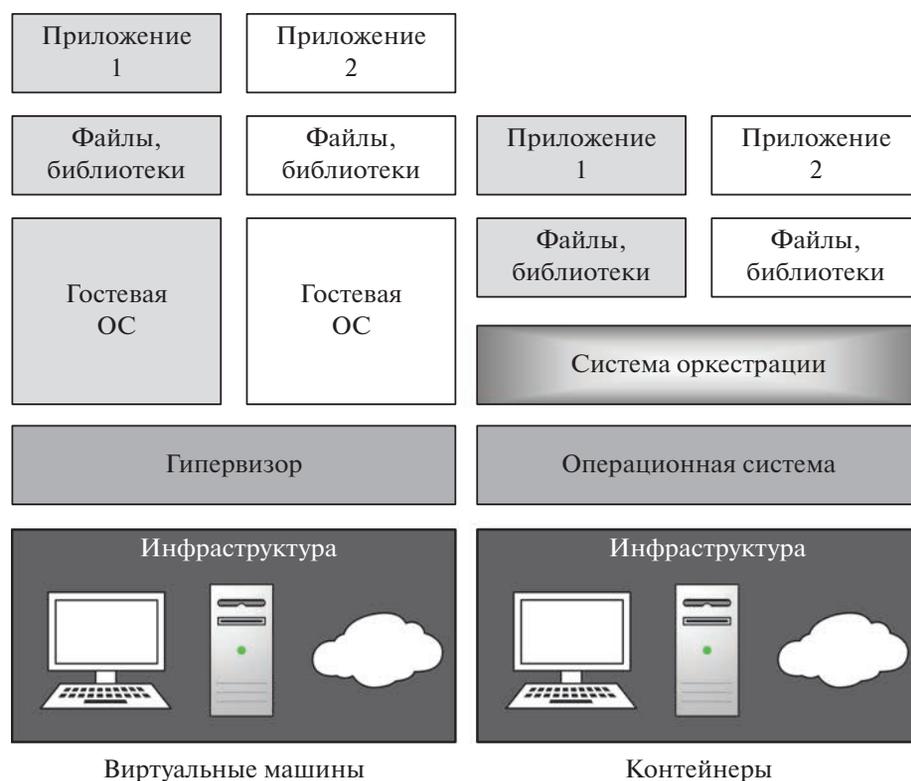


Рис. 1. Схема организации микросерверной архитектуры на основе виртуальных машин и контейнеров. ОС – операционная система.

бизнес-логики программного обеспечения, а также бизнес процессов функционирования технологических платформ в рамках описанных архитектурных стилей является актуальной задачей.

1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСЕРВИСНОЙ И БЕССЕРВЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ САПР

Микросервисная и бессерверная архитектуры обладают рядом общих свойств, позволяющих: минимизировать операционные затраты, автоматизировать цикл развертывания приложения, адаптироваться к изменениям требований к продукту в сравнении с другими подходами, базирующимися на общей концепции сервисно-ориентированной архитектуры. Однако кардинальные отличия лежат в уровне абстракции исполнительных сред, которые существенным образом влияют на области применения данных моделей.

Микросервисная модель программного обеспечения не регламентирует особенности исполнительных сред и может использовать различные уровни абстракции включая набор ЭВМ с операционными системами, виртуальные машины, контейнеры, которые соответственно требуют различных типов управления, настройки и эксплуатации [1]. Современные стратегии реализации программ-

ного обеспечения склоняются к делегированию содержания исполнительных сред специализированным поставщикам, которые в свою очередь стремятся повысить уровень абстракции своих продуктов с целью обеспечения их экономической и функциональной конкурентоспособности. Такие провайдеры предоставляют описанные облачные сервисы – от выделенных серверов до контейнера – в виде услуги, где функции оркестровки, включая кластеризацию, а также различные направления оптимизации и масштабируемости виртуальной инфраструктуры, берет на себя поставщик. Использование контейнерной среды является эффективным решением для микросервисной архитектуры так как контейнер является существенно более компактным при этом не менее универсальным, средством для реализации одной функции (микросервиса) чем виртуальная машина (рис. 1).

Контейнеры являются достаточно мультитенантными, их можно без изменений перенести из одной среды контейнеризации в другую (с сервера на сервер), при этом они используют общую операционную систему, отделяя собственное содержимое, что позволяет снизить время отклика и нагрузку на серверы. Однако не следует забывать, что контейнер – это обособленный процесс внутри операционной системы, который имеет



Рис. 2. Развитие облачных технологий.

возможность через неё повлиять на работу других процессов [2]. Следует отметить, что облачный сервис, предоставляющий контейнеры или индивидуальная система оркестрации может содержать множество контейнерных приложений (сервисов), связанных с общей операционной системой, каждый из которых может стать объектом внимания злоумышленников и оказать влияние на остальные процессы.

Бессерверная модель программного обеспечения предполагает работу облачных исполнительных сред по требованию (рис. 2). Функции (сервисы) запускаются только в момент фиксации определенного события, по достижению которого выполняется последовательность операций в соответствии с командами пользователя, по завершении которых рабочая среда немедленно сворачивается, оставаясь в этом состоянии до следующего инициализирующего события. Основным преимуществом данной концепции является автоматическое выделение необходимых ресурсов для работы программного продукта, а также оптимальное распределение вычислительных мощностей среди всех пользователей облачного сервиса. Сильной стороной бессерверной архитектуры является то, что сервисы могут работать с данными на основе изменений в реальном времени. Использование асинхронно сгенерированных событий не блокирует сервисы, что позволяет приложениям продолжать работу, не дожидаясь ответа. Также нет необходимости опрашивать сервисы, поскольку они являются подписчиками события на изменение данных, повышение гранулярности программной системы обеспечивает ее надежность, а сокращение сетевого трафика снижает нагрузку на физические сервера [3].

Функция как услуга оплачивается согласно фактическому использованию ресурсов сервиса,

что позволяет ей быть предпочтительной в тех случаях, когда бизнес-процессы основаны на событиях и не требуют непрерывного выполнения операционных задач. Однако, здесь стоит отметить, что выполнение длительных трудоемких задач может стать экономически менее выгодным решением чем настройка постоянной микросервисной архитектуры на основе контейнеров или даже виртуальных машин. Облачные провайдеры бессерверных технологий обладают рядом ограничений конечного продукта, к ним относятся поддерживаемые языки программирования, исполняемого в виртуальной среде, отсутствие простого средства управления состоянием приложения. Также к ограничениям можно отнести использование уникальной для каждого облака модели бизнес-логики, что в свою очередь определяет отсутствие возможности развертывания программного продукта без изменений у различных поставщиков облачных услуг. Инструменты и механизмы для управления бессерверными решениями во многом специфичны для облака.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВСЕХ КОМПОНЕНТОВ НА КООРДИНАТЫ РАБОЧИХ ТОЧЕК СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Актуальной задачей при проектировании электронных схем является расчет нестабильности координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем при вариации всех параметров моделируемой схемы под влиянием внешних возмущающих воздействий. Такая задача может быть эффективно решена при помощи

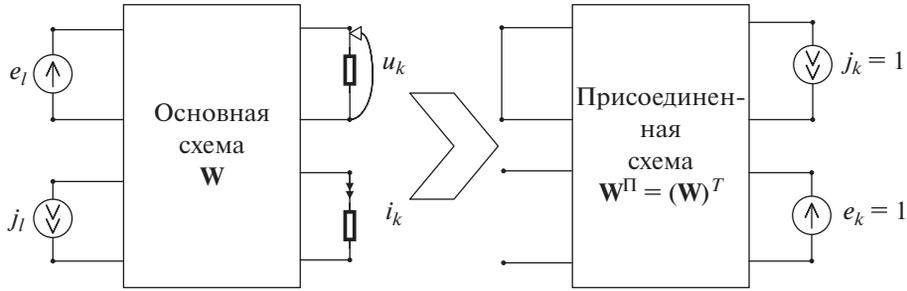


Рис. 3. Построение вспомогательной схемы.

вспомогательной (присоединенной) схемы, которая строится согласно теореме Теллегена [4]. Для этого достаточно выполнить транспонирование математического описания исходной моделируемой схемы и удалить из нее задающие источники тока и напряжения с последующим подключением к выходным полюсам вспомогательной схемы единичного источника напряжения, если выходной переменной исходной схемы является токовая переменная i_k или единичный источник тока, когда в качестве выходной переменной исходной схемы используется потенциальная переменная u_k (рис. 3).

Выберем некоторую независимую переменную многополюсника q_k в качестве анализируемой переменной, для которой необходимо выполнить расчет ее неустойчивости при вариации параметров компонентов схемы. Коэффициент влияния на переменную q_k изменения обобщенного параметра вариации $w = [R, C, L, \mu, \beta, z, \lambda]$, можно определить соотношением

$$\gamma_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w}.$$

Можно также ввести нормированный и полунормированный коэффициенты влияния на переменную q_k изменения обобщенного параметра вариации $w = [R, C, L, \mu, \beta, z, \lambda]$

$\tilde{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} \frac{w}{q_k} = \gamma_w^q \frac{w}{q_k}$ – нормированный коэффициент влияния,

$\bar{\gamma}_w^q = \frac{\partial q_k}{\partial w} w = \gamma_w^q w$ – полунормированный коэффициент влияния.

Выберем для описания схемы расширенный узловой базис [5, 6], для которого базисными составляющими являются узловые напряжения и токовые переменные всех независимых токов многополюсных элементов. Тогда можно связать с вектором базисных переменных \mathbf{X} выбранную

переменную q_k соотношением, где T – символ транспонирования

$$q_k = \mathbf{T}^T \mathbf{X}, \tag{1}$$

где

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

После дифференцирования выражения (1) в точке $\mathbf{X} = \mathbf{X}^0$ по обобщенной переменной w получим выражение для коэффициента влияния на переменную q_k изменения обобщенного параметра вариации w

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

Входящий в выражение (2) вектор $\bar{\mathbf{X}}$ определяется путем дифференцирования уравнения моделируемой нелинейной схемы, которое можно представить в виде [7, 8]

$$\mathbf{W}_1 \mathbf{X} + \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 = 0, \tag{3}$$

где \mathbf{W}_1 и \mathbf{S}_1 – матрица и задающий вектор, определяемые линейными компонентами, \mathbf{S}_2 – задающий вектор, определяемый нелинейными компонентами.

Учитывая, что $\mathbf{W}_1 = \mathbf{W}_1(w)$ и $\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_2(w, \mathbf{X})$, после дифференцирования уравнения (3) получим уравнение

$$\mathbf{W}^0 \bar{\mathbf{X}} + \bar{\mathbf{S}} = 0, \tag{4}$$

где

$$\mathbf{W}^0 = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2^0, \quad \bar{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial w} \mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{S}_2}{\partial w}.$$

Решая уравнение (4), получим вектор $\bar{\mathbf{X}}$

$$\bar{\mathbf{X}} = -(\mathbf{W}^0)^{-1} \bar{\mathbf{S}}. \tag{5}$$

Подставляя вектор $\bar{\mathbf{X}}$ в выражение (2) получим выражение для коэффициента влияния на пере-

менную q_k изменения обобщенного параметра вариации w

$$\gamma_w^q = -\mathbf{T}^T (\mathbf{W}^0)^{-1} \bar{\mathbf{S}}. \quad (6)$$

Для расчета коэффициента влияния на переменную q_k изменения параметра w , построим вспомогательную схему, \hat{N} выполнив следующие шаги.

Шаг 1. Присоединим к выходным точкам единичный источник тока, если q_k – потенциальная переменная.

Шаг 2. Присоединим к выходным точкам единичный источник напряжения, если q_k токовая переменная.

Шаг 3. Исключим задающие источники из основной схемы, закоротив источники напряжения и разомкнув источники тока.

Шаг 4. Заменяем матрицу \mathbf{W}^0 исходной схемы N транспонированной матрицей $(\mathbf{W}^0)^T$.

Тогда получим уравнение вспомогательной схемы в виде $(\mathbf{W}^0)^T \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{T} = 0$, или $\hat{\mathbf{X}}^T \mathbf{W}^0 + \mathbf{T}^T = 0$. Следовательно, вектор переменных $\hat{\mathbf{X}}^T$ вспомогательной схемы будет иметь вид

$$\hat{\mathbf{X}}^T = -\mathbf{T}^T (\mathbf{W}^0)^{-1}. \quad (7)$$

Подставляя правую часть уравнения (7) в уравнение (6), получим

$$\gamma_w^q = \hat{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{S}}, \quad (8)$$

где

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial w} \mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{S}_2}{\partial w}.$$

Чтобы вычислить первую составляющую вектора $\bar{\mathbf{S}}$ отметим, что уравнение зависимого источника имеет вид [9, 10]

$$p_w = w q_w, \quad (9)$$

где q_w – управляющая переменная, действующая между входными узлами a и b , а p_w – управляемая переменная, действующая между выходными узлами c и d . Для двухполюсника уравнение (9) имеет аналогичный вид, но выполняются соотношения $a = c$ и $b = d$.

Вторая составляющая вектора $\bar{\mathbf{S}}$ определяется функциональной зависимостью задающего вектора $\mathbf{S}_2 = \mathbf{S}_2(w, \mathbf{X})$ от внешних воздействий. Вычисление этой составляющей осуществляется путем дифференцирования конкретных характеристик нелинейных компонентов. При этом в качестве обобщенной переменной w используется значение внешнего воздействия λ .

При вычислении первой составляющей вектора $\bar{\mathbf{S}}$, следует отметить, что уравнению (9) соответствует матрица \mathbf{W}_1 , в которой параметр w расположен на пересечении строк с индексами c, d и столбцов с индексами a, b . Поэтому можно записать выражение $\bar{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial w} \mathbf{X}$ в виде

$$\bar{\mathbf{S}} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_a - x_b \\ -(x_a - x_b) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, коэффициент влияния на переменную q_k изменения обобщенного параметра вариации $w = [R, y, \mu, \beta, z, \lambda]$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \gamma_w^q &= \hat{\mathbf{X}}^T \bar{\mathbf{S}} = (\hat{x}_c \ \hat{x}_d) \begin{pmatrix} x_a - x_b \\ -(x_a - x_b) \end{pmatrix} = \\ &= (\hat{x}_c - \hat{x}_d)(x_a - x_b). \end{aligned}$$

Для зависимого 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 – вспомогательной схеме \hat{N} . Следовательно коэффициент влияния на переменную q_k изменения обобщенного параметра вариации w определяется соотношением:

$$\gamma_w^q = \hat{p}_w q_w. \quad (10)$$

Если варьируемым компонентом является резистивный двухполюсник, то $\hat{x}_c - \hat{x}_d = \hat{x}_a - \hat{x}_b = \hat{q}_w$, то тогда получаем

$$\gamma_w^q = \hat{q}_w q_w. \quad (11)$$

На основании изложенного можно сформулировать алгоритм расчета неустойчивости координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем при вариации всех параметров моделируемой схемы под влиянием внешних возмущающих воздействий:

Шаг 1. Вычисление вектора X базисных переменных статического режима основной нелинейной схемы N методом схемотехнической интерпретации с использованием LU -преобразования с запоминанием результатов линеаризации на последней итерации вычислительного процесса.

Шаг 2. Построение вспомогательной схемы \hat{N} и вычисление для этой схемы вектора T задающих воздействий.

Шаг 3. LU -преобразование вспомогательной схемы, которое выполняется виртуально путем простого транспонирования результатов LU -преобразования основной схемы N .

Шаг 4. Вычисление вектора \hat{X}^T вспомогательной схемы.

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

Шаг 6. Расчет неустойчивости координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем $\gamma_w^{\hat{p}} = \hat{p}_w q_w$ и $\gamma_w^{\hat{q}} = \hat{q}_w q_w$ для всей совокупности варьируемых параметров.

Достоинством предлагаемого алгоритма является отсутствие необходимости повторной *LU*-факторизации вспомогательной схемы, поскольку эта задача решается виртуально путем транспонирования результатов *LU*-факторизации основной схемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена основанная на использовании вспомогательной схемы методика расчета неустойчивости координат рабочих точек статического режима нелинейных электронных схем при вариации всех параметров моделируемой схемы под влиянием внешних возмущающих воздействий (изменение температуры, радиации и т.д., а также технологического разброса характеристик компонентов при их серийном изготовлении).

Исходя из специфики предметной области схемотехнической САПР в большей степени подойдет микросервисная архитектура по ряду причин, эквивалентная масштабируемость может быть достигнута за счет контейнерных облачных сервисов, асинхронное взаимодействие может быть достигнуто путем внедрения полнодуплексных каналов связи, а трудоемкость выполняемых процессов может сделать экономически невыгодным использование платформ “Функция как услуга”.

Практическая реализация предлагаемой методики позволит обеспечить проектирование

электронных устройств, надежно работающих в условиях изменения внешних возмущающих факторов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания FFSM-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шитько А.М.* // Труды БГТУ. Сер. 3: Физико-математические науки и информатика. 2017. № 9 (200). С. 122.
2. *Гордина А.Т., Забродин А.В.* // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 1(29). С. 39.
3. *Гордина А.Т., Забродин А.В.* // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 1(29). С. 16.
4. *Анисимов В.И., Дмитриевич Г.Д., Ежов С.Н. и др.* Автоматизация схемотехнического проектирования на мини-ЭВМ. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1983.
5. *Сигорский В.П., Петренко А.И.* Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Сов. радио, 1976.
6. *Ильин В.Н.* Основы автоматизации схемотехнического проектирования. М.: Энергия, 1979.
7. *Чуа Л.О., Лин Пен-Мин.* Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980.
8. *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988.
9. *Гридин В.Н., Михайлов В.Б., Шустерман Л.Б.* Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. М.: Наука, 2008.
10. *Тарасик В.П.* Математическое моделирование технических систем. Минск: Дизайн ПРО, 2004.