

На правах рукописи



Ахмад Алтаиб Давод

**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЗАЦИИ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность: 05. 13. 12 – Системы автоматизации проектирования  
(промышленность)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт Петербург-2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (ФГАОУ ВО «СПбГЭТУ «ЛЭТИ»») на кафедре «Системы автоматизированного проектирования» (САПР).

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Анисимов Владимир Иванович**, профессор кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Сидоркина Ирина Геннадьевна**, декан факультета информатики и вычислительной техники Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ), г. Йошкар-Ола;

кандидат технических наук, доцент **Поляков Владимир Иванович**, доцент кафедры вычислительной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:**

Акционерное общество «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 25 июня 2019 г. в 15<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» – «Объявление о защитах»

Автореферат разослан 23 апреля 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.238.02



**Н.М. Сафьянников**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследования**

Значительная стоимость покупного программного обеспечения и большие временные и трудовые ресурсы, требуемые для разработки современных интегрированных САПР, делают весьма актуальной задачей разработку новых подходов к созданию собственных схмотехнических САПР. При реализации таких подходов следует, прежде всего, отказаться от построения САПР, структура которых отличается многофункциональностью, так как в процессе решения реальных конкретных задач проектирования такие системы используются весьма неэффективно. Это объясняется тем, что из общего перечня входящих в них подсистем в реальных условиях проектирования реальных задач в каждом подразделении обычно используется незначительная часть подсистем, которые требуются для использования в конкретной задаче проектирования.

Поэтому актуальной задачей при разработке современных САПР является построение систем, которые характеризуются децентрализованной структурой с использованием Интернет-технологий, при помощи которых выполняется информационный обмен данными в системе с распределенной архитектурой. Каждая часть такой системы решает фиксированную часть автоматизированного проектирования, при этом все подсистемы могут разрабатываться различными коллективами пользователей, решающих общую задачу. Приложения системы с распределенной структурой являются независимыми и в процессе своей эксплуатации выполняют общую задачу создания новых объектов в некоторой предметной области, для которой создана система.

Главным условием, которое должно выполняться для возможности построения такой децентрализованной системы является унификация и согласование входящих в нее подсистем при обмене данными между клиентом и сервером. В этом случае отдельные части системы могут функционировать в различных узлах сети, откуда они доставляются разработчикам электронной аппаратуры.

В клиент-серверной системе все вычислительные операции, связанные с проектированием объектов, выполняются сетевыми службами. Подготовка данных для функционирования сетевых служб выполняется приложениями, функционирующими на стороне клиента. Такие приложения организуют посылку подготовленных ими данных на сетевую службу и отображают в требуемой форме возвращаемые этой службой результаты. В общем случае клиентские приложения можно реализовать в виде консольных приложений, или как Windows-приложения. Возможна также реализация работы клиента на основе сетевых клиентских приложений. Для всех приложений клиентской стороны вызов сетевых служб осуществляется одинаковым образом – путем передачи на службу имени вызываемого метода и списка передаваемых аргументов.

Таким образом, стандартизация, положенная в основу клиент-серверной системы проектирования, позволяет обеспечить соединение приложений, созданных на разнородных платформах.

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы заключается в проведении исследования и разработке средств реализации клиент-серверных схмотехнических САПР с на основе сетевых служб.

При этом следует решить перечисленные ниже задачи:

1. Создание алгоритмов и программной реализации сетевых служб для клиент-серверных схмотехнических САПР.
2. Разработка методов построения клиентских приложений клиент-серверных схмотехнических САПР.
3. Анализ методов построения и реализация сетевых служб для моделирования частотных характеристик.
4. Исследование методов реализации сетевых служб для моделирования электронных схем в стационарном режиме.
5. Разработать методы построения сетевых служб для моделирования динамических характеристик нелинейных схем.
6. Разработать методику построения сетевых служб для моделирования чувствительности схем при изменении параметров их компонентов.

*Объектом исследования* являются клиент-серверные системы с использованием сетевых служб.

*Предметом исследования* являются методы построения сетевых служб и клиентских приложений клиент-серверных систем автоматизированного проектирования электронных схем.

### **Методы исследования**

Основой исследования является теория конечных графов, теория матричного исчисления, численные методы решения уравнений.

**Достоверность** основных положений подтверждена материалами опытной эксплуатации децентрализованной схмотехнической САПР в различных режимах работы, а также апробацией результатов исследований при обсуждении докладов на конференциях различного уровня.

### **Научная новизна**

1. Построена методика разработки самодокументируемых сетевых служб .NET для клиент-серверных схмотехнических САПР.
2. Предложена структура и технология формирования расширенного WSDL-документа сетевых служб .NET, обеспечивающие унифицированное описание компонентов моделируемой схемы и возвращаемых результатов расчета.

3. Разработана методика построения программного обеспечения клиентской стороны клиент-серверных схмотехнических САПР на основе расширенного WSDL-документа.
4. Выполнено исследование и разработана методика построения сетевых служб .NET для моделирования линейризованных электронных схем в частотной области на основе встроенного класса для работы с комплексными данными.
5. Разработаны методы построения сетевых служб .NET для расчета стационарных и динамических характеристик нелинейных схем.
6. Построена методика создания сетевых служб .NET для моделирования электронных схем при изменении их параметров и внешних воздействий.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Общая архитектура клиент-серверной САПР для автоматизированного проектирования электронных схем.
2. Методика построения сетевых служб .NET схмотехнических САПР на основе унифицированной структуры передаваемых методам сетевых служб аргументов.
3. Методика построения локальных и сетевых приложений клиентской стороны клиент-серверных схмотехнических САПР на основе расширенного WSDL-документа.

#### **Практическая ценность**

1. Структура расширенного WSDL-документа сетевых служб .NET обеспечивает возможность независимой разработки клиентских приложений схмотехнической САПР.
2. Разработанная методика построения сетевых служб .NET клиент-серверных схмотехнических САПР позволяет обеспечить платформенную независимость клиентских и серверных приложений.
3. Разработанная методика построения клиентских приложений клиент-серверных схмотехнических САПР позволяет реализовать модернизацию интерфейсных средств организации диалога пользователя с системой.

#### **Практическая реализация диссертационной работы**

Разработанная клиент-серверная схмотехническая САПР была реализована на языке С# и позволяет выполнять расчет статического режима работы электронных схем, расчет динамических режимов нелинейных электронных схем, проводить расчет частотных передаточных характеристик, а также расчет нестабильности основных характеристик систем при изменении их параметров под влиянием внешних воздействий. Основные результаты диссертации внедрены на предприятии «Модем» и в учебном процессе на практических занятиях на кафедре САПР в СПбГЭТУ, о чем имеются соответствующие акты.

### **Апробация работы**

Основные результаты докладывались на научно-практических конференциях:

1. Международные конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем» Одинцово 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г.;
2. XIIII-ая и XIV-ая международные конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество». СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2017 г. 2018 г.;
3. Конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Публикации по теме диссертации** Содержание исследований диссертации опубликовано в 14 научных работах, среди которых 7 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 6 работ в других изданиях, 1 Свидетельство на программу ЭВМ(№2019613595).

### **Структура и объем диссертации**

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения и библиографического списка, содержащего 76 источников. Диссертационная работа изложена на 170 страницах текста, и содержит 18 рисунков и 7 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы и описываются основные цели исследования и решаемые в диссертации задачи.

**В первой главе** рассматриваются методы создания сетевых служб для клиент-серверных систем. Делается вывод, что при разработке систем с децентрализованной структурой на основе использования Интернет-технологий, каждая часть такой системы решает фиксированную часть общей задачи проектирования, при этом все подсистемы могут разрабатываться различными коллективами пользователей. Приложения системы с распределенной структурой являются независимыми и в процессе своей эксплуатации выполняют задачу создания новых объектов в некоторой предметной области, для которой создана система. Главным условием, которое должно выполняться для возможности построения такой децентрализованной системы является унификация и согласование входящих в нее подсистем при обмене данными между клиентом и сервером. В этом случае отдельные части системы могут функционировать в различных узлах сети, откуда они доставляются разработчикам электронной аппаратуры.

Выполненный в диссертации сравнительный анализ возможных подходов к объединению отдельных приложений показывает, что такую задачу целесообразнее всего решать путем организация доставки рабочих

методов системы с децентрализованной структурой при помощи сетевых служб.

Технология сетевых служб позволяет использовать описание взаимодействий, а также интерфейсов, при помощи широко распространенного языка XML, что предоставляет широкие возможности при реализации децентрализованных систем. Построенная таким образом система позволяет в дальнейшем реализовать изменение своего содержания для выполнения новых задач проектирования объектов. Главным условием для этого является неизменность реализованных при создании системы интерфейсных средств. За счет этого обеспечивается взаимодействие между сетевыми службами на выбранной платформе и оказывается возможным адаптировать разработанные ранее приложения к конкретным условиям проектирования разрабатываемых системных средств.

В децентрализованной САПР, которая имеет клиент-серверную архитектуру, все вычислительные операции выполняются сетевыми службами. Подготовка данных для функционирования сетевых служб осуществляется при помощи приложений, функционирующих на клиентской стороне. Такие приложения организуют посылку подготовленных ими данных на сетевую службу и отображают в требуемой форме возвращаемые этой службой результаты. В общем случае реализацию подсистем клиентской стороны можно реализовать в виде приложений с консольной структурой или как Windows-приложения. Возможна также реализация работы клиента на основе сетевых клиентских приложений.

В работе проводится сравнительная оценка возможных методов построения сетевых служб – с использованием языка Java и платформы WTP и при помощи языка C# на основе платформы Framework .NET. Отмечается, что разработка сетевых служб Java требует высокой профессиональной подготовки программиста и связана с достаточно сложной процедурой развертывания на внешнем сервере созданного программистом в используемой среде разработки исходного программного кода.

В отличие от языка Java реализация сетевых служб на языке C# в среде Framework .NET осуществляется при помощи весьма эффективной инструментальной среды, предоставляемых системой Framework .NET, что позволяет построить сетевую службу, не анализируя в деталях структуру стандартов WSDL и SOAP. Предельно просто осуществляется и задача развертывания созданного в среде Framework .NET сетевые службы на рабочий сервер. Поэтому наиболее совершенным способом построения инвариантных к платформе сетевых служб является их разработка на языке C# на основе Framework .NET.

В работе отмечается, что для гарантированного совместного функционирования клиентских и серверных приложений в неоднородных средах, следует исключить передачу информации между ними через многомерные массивы. Поскольку для описания всех компонентов реально используются двумерные массивы, то единственным решением проблемы является предварительная упаковка двумерных массивов в одномерные с

последующей передачей упакованных массивов в качестве аргументов методу сетевой службы. Такую же процедуру упаковки многомерных массивов следует выполнить перед передачей результатов работы сетевой службы клиентскому приложению.

В работе отмечается, что хотя при построении сетевой службы формируется WSDL-документ с ее описанием, и доступ к этому документу возможен до построения клиентского приложения, задача построения клиентского приложения независимо от разработчика сетевой службы остается весьма сложной. Это объясняется тем, что стандартный WSDL-документ, с одной стороны, обеспечивает требуемую информацию для возможности клиент-серверного функционирования, но, с другой стороны, не содержит достаточной информации для независимого построения клиентской подсистемы. В стандартном документе WSDL не имеется сведений о сформированных при построении сетевой службы способах приведения многомерных массивов к унифицированной форме, что требуется для обеспечения надежного функционирования клиентских и серверных приложений в неоднородных средах, когда приходится отказываться от передачи информации между такими приложениями через многомерные массивы.

В диссертационной работе указанная проблема решается организацией в сетевой службе технологии самодокументирования путем построения расширенного WSDL-документа. Для реализации такой технологии предлагается использовать аргумент Description атрибута WebServices для рабочего метода сетевой службы. В качестве значения аргумента Description следует принять некоторую строковую переменную, содержание которой должно включать в себя:

1. Полное описание всех компонентов моделируемой схемы, включающее в себя топологию включения каждого компонента и значения его параметров.
2. Алгоритм преобразования многомерных массивов описания компонентов схемы к унифицированной форме `In_comp`, `Z_comp`, обеспечивающей гарантированное функционирование распределенной системы в неоднородных средах.
3. Код создания прокси-объекта для работы сетевой службы с клиентскими подсистемами.
4. Описание возвращаемых результатов работы методов сетевой службы в унифицированной форме.
5. Описание преобразования унифицированной формы возвращаемых результатов методов сетевой службы к виду, требуемому для отображения результатов работы сетевой службы в клиентских приложениях.

При этом содержание аргумента Description отобразится в расширенном WSDL-документе в разделе `documentation`, что дает возможность получить необходимую полную информацию о моделируемой



схеме и выполнить построение клиентского приложения независимо от разработчика сетевой службы.

В соответствии с изложенными подходами к построению сетевых служб .NET в диссертации разработана методика построения клиентских приложений как в виде Windows-приложений, так и в форме сетевых приложений. Windows-приложения позволяют наиболее полно реализовать оконную графику и организовать диалоговое взаимодействие пользователя с системой. Сетевые приложения помимо этого предоставляют возможность разместить его в сети Интернет, что обеспечивает открытый доступ к клиентскому приложению.

В работе отмечается, что консольные приложения являются приложениями простейшего вида, их отличительной особенностью консольных приложений является отсутствие в них графического интерфейса. Вместе с тем, использование таких приложений может в ряде случаев оказаться полезным, в частности для реализации ввода требуемых данных с планшетных систем, которые имеют ограниченную рабочую площадь экрана. Windows-приложения предоставляют возможность эффективно использовать графические средства и позволяют наилучшим образом организовать диалоговое взаимодействие пользователя с системой. Сетевые клиентские приложения предоставляют возможность расположить все используемое для диалогового взаимодействия программное обеспечение в сети. Существенным достоинством сетевых приложений является открытый доступ к использованию распределенной системы через браузер любого типа, недостатком таких приложений являются дополнительные затраты времени, требуемого для ввода описания компонентов проектируемой электронной схемы.

**Во второй главе** рассматриваются методы разработки сетевых служб для решения задач расчета статического режима компонентов нелинейных схем и расчета частотных характеристик линеаризованных схем.

Основой для реализации таких задач является полученное в работе уравнение нелинейных схем:

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

$$\text{где } W_1 = T_{p1} W_{m1} T_{p1}^t + T_x, S_1 = T_{p1} S_{m1}, S_2 = T_{p2} S_{m2},$$

$W_{m1}$  и  $S_{m1}$  - матрица параметров и задающий вектор линейных многополюсников,

$$S_{m2} = \begin{bmatrix} F_y(U_{y2}, I_{z2}) \\ F_z(U_{y2}, I_{z2}) \end{bmatrix} - \text{вектор нелинейных характеристик}$$

$T_{p1}, T_{p2}, T_x$  -топологические матрицы схемных связей линейных и нелинейных многополюсников.

В диссертационной работе предлагается решать полученное нелинейное уравнение на основе схмотехнической интерпретации метода Ньютона-Рафсона

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

где

$$W_1 = T_{p1}W_{m1}T_{p2}^t + T_x, S_1 = T_{p1}S_{m1}$$

$$W_2^i = T_{p2}W_{m2}^i T_{p2}^t, S_2^i = T_{p2}S_{m2}^i$$

Входящие в это выражение матрицы  $W_{m2}^i$  и  $S_{m2}^i$  являются матрицами линеаризованных в точке  $i$  нелинейных многополюсников.

Линеаризация компонентов выполняется путем разложения в ряд Тейлора функциональных зависимостей нелинейных многополюсников вида  $p_i = f(q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_n)$ , что приводит к обобщенному уравнению линеаризованных компонентов

$$p_i = \sum_{(j)} w_{ij}^{(k)} q_j + s_{wi}^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

где

$$w_{ij}^{(k)} = \frac{\partial p_i}{\partial q_j} \quad s_{wi}^{(k)} = p_i^{(k)} - \sum_{(j)} \frac{\partial p_i}{\partial q_j} \Big|_{q^{(k)}} q_j,$$

- неавтономный и автономный параметры линеаризованного многополюсника, определяемые выбранными координатами рабочей точки.

В соответствии с изложенной методикой в работе построен следующий алгоритм решения задачи расчета статического режима работы электронных схем с использованием схмотехнической интерпретации

Шаг 1. Выбор начального приближения  $X^i = X^0$ .

Шаг 2. Расчет  $P_2^i$  и  $Q_2^i$ .

Шаг 3. Линеаризация нелинейных компонентов в точке  $P_2^i$  и  $Q_2^i$  (вычисление  $w^i$  и  $s^i$ ).

Шаг 4. Формирование линеаризованных в  $i$ -ой точке матрицы  $w^i = w_1 + w_2^i$  и  $s^i = s_1 + s_2^i$ .

Шаг 5. Решение линеаризованного уравнения  $w^i x^{i+1} + s^i = 0$ .

Шаг 6. Вычисление нормы  $N = \|X^{i+1} - X^i\|$ .

Шаг 7. Если  $N > \varepsilon$  переопределение вектора  $x^i = x^{i+1}$  и переход к шагу 2, в противном случае вывод значения векторов  $x^{i+1}, P_2^i, Q_2^i$ .

Для решения задачи выбора начального приближения вблизи от точки решения в работе используется метод продолжения решения по параметру. В

соответствии с этим методом вместо решения уравнения  $\Phi(X) = 0$  ищется решение некоторого уравнения  $H(X, \lambda) = 0$ , где  $\lambda = \overline{0,1}$  – параметр, изменяющийся с выбранным шагом  $\Delta\lambda$  в пределах от 0 до 1. При этом для значения  $\lambda = 0$  уравнение  $H(X, 0) = 0$  заведомо имеет решение, а для  $\lambda = 1$  решение уравнения  $H(X, 1) = 0$  совпадает с решением исходного уравнения  $\Phi(X) = 0$ .

В работе отмечается, что задача проектирования линеаризованных схем в частотной области может быть решена двумя принципиально различными путями:

- Построение двух сетевых служб, одна из которых решает задачу линеаризации, а вторая выполняет расчет частотных свойств на основе линеаризованных параметров, полученных от первой сетевой службы.
- Построение интегрированной системы на основе единственной сетевой службы, решающей как задачу линеаризации, так и задачу расчета моделируемой схемы в частотной области

Хотя первый путь кажется весьма простым, использовать такой подход нецелесообразно. Возможная экономия трудовых затрат при разработке не будет окупаться неизбежным снижением надежности работы системы, так как последовательный вызов одной сетевой службы из другой всегда может вызвать нарушение функционирования системы из-за отказов в работе сети, контролировать которые на клиентской стороне при этом практически невозможно. В работе принят второй путь построения сетевой службы на основе интегрированной системы, включающей в себя программное обеспечение, выполняющее линеаризацию компонентов в вычисленных рабочих точках и последующий расчет частотных свойств линеаризованной схемы.

Программное обеспечение интегрированной системы строится согласно следующей последовательности выполнения отдельных блоков:

1. Ввод директив расчета, в которые должны входить значение точности расчета стационарного режима  $\epsilon_{ps}$ , способ разгона  $pp$  ( $pp = 1$  – разгон источников,  $pp = 2$  – разгон параметров), число шагов разгона  $nst$ , значение числа частотных точек  $nf$  при расчете частотных характеристик, ссылка на массив частот  $f$ , а также информация для расчета передаточных отношений схемы – значения входных  $lp, lm$  и выходных узлов  $kp, km$ .
2. Расчет стационарного режима методом схемотехнической интерпретации. В процессе линеаризации характеристик помимо частотно-независимых линеаризованных параметров вычисляются также линеаризованные частотно-зависимые параметры для диффузионных емкостей  $pn$ -переходов диодов и транзисторов.
3. Переход к расчету частотных характеристик линеаризованной схемы, при этом используются значения линеаризованных компонентов на последнем шаге итерационного процесса и

комплексный тип данных, реализуемый классом Complex.

4. На заключительном шаге проводится решение системы уравнений и расчет выбранной совокупности схемных функций в каждой частотной точке  $kf$  заданного директивами расчета частотного диапазона.

**В третьей главе** рассматриваются методы построения сетевой службы для расчета динамических режимов нелинейных схем. Для явных методов интегрирования высших порядков за основу принята обобщенная итерационная формула

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^p a_j^y X^{k+1-j} + h \sum_{j=1}^q b_j^y \dot{X}^{k+1-j},$$

из которой для случая  $p=1$  и  $q=m$  вытекает выражение для группы явных методов Адамса-Бошфорта

$$X^{k+1} = X^k + h \sum_{j=1}^m b_j^y \dot{X}^{k+1-j},$$

а для случая  $p=m+1$  и  $q=0$  вытекает выражение для группы явных методов Гира

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^{m+1} a_j^y X^{k+1-j}$$

Для неявных методов интегрирования высших порядков за основу принята обобщенная итерационная формула

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^p a_j^h X^{k+1-j} + h \sum_{j=0}^{q-1} b_j^h \dot{X}^{k+1-j},$$

из которой для случая  $p=1$  и  $q=m$  вытекает выражение для группы неявных методов Адамса-Моултона

$$X^{k+1} = X^k + h \sum_{j=0}^{m-1} b_j^h \dot{X}^{k+1-j},$$

а для случая  $p=m$  и  $q=1$  вытекает выражение для группы неявных методов Гира

$$X^{k+1} = \sum_{j=1}^m a_j^h X^{k+1-j} + h b_0^h \dot{X}^{k+1}.$$

В работе показано, что в случае, когда используются уравнения в нормальной форме Коши

$$\dot{X} = F(X, t),$$

расчет переходных режимов может быть наиболее просто проведен как при помощи явных методов, так и неявными методами. Однако явные методы характеризуются весьма низкой степенью устойчивости вычислительного процесса и поэтому их следует применять, только для расчета прогнозируемого значения при решении задачи интегрирования неявными методами.

В диссертационной работе делается вывод, что несмотря на сравнительную простоту решения уравнений, приведенных к нормальной форме Коши, такой подход к решению задачи расчета динамического режима не следует рекомендовать, поскольку формирование математического описания в нормальной форме связано с построением главных сечений и главных контуров, что значительно усложняет построение программного обеспечения и увеличивает время расчета. Поэтому для построения сетевых служб, решающих задачи расчета динамического режима, наиболее эффективным методом решения является использование алгебро-дифференциального уравнения моделируемой системы в неявной форме

$$F(\dot{X}, X, t) = 0,$$

которое для момента времени  $t^{k+1}$  имеет вид

$$F(\dot{X}^{k+1}, X^{k+1}, t^{k+1}) = 0$$

Подстановка в это уравнение значения производной  $\dot{X}^{k+1}$  из обобщенной итерационной формулы для неявных методов интегрирования высших приводит к уравнению

$$F\left(\frac{\alpha_0}{h} X^{k+1} + \frac{1}{h} \sum_{j=1}^p \alpha_j X^{k+1-j} + \sum_{j=1}^{q-1} \beta_j \dot{X}^{k+1-j}, X^{k+1}, t^{k+1}\right) = 0,$$

которое можно решить методом Ньютона-Рафсона относительно вектора  $X^{k+1}$ . В качестве начального приближения  $(X^{k+1})^i = (X^{k+1})^0$  наиболее просто принять значение вектора на предыдущем шаге  $X^k$ . Возможно также для повышения точности расчета использовать прогнозируемое значение вектора  $(X^{k+1})^0 = X^{k+1}$ , которое вычисляется согласно явным методам Адамса-Бошфорта или Гира.

В диссертационной работе делается вывод, что при использовании математического описания в алгебро-дифференциальной форме наиболее целесообразным является подход, основанный на подстановке значения соответствующей производной непосредственно в дифференциальные уравнения компонентов схемы. Такой подход позволяет при построении сетевой службы для моделирования динамических процессов использовать заранее построенные дискретные модели, замещающие на каждом шаге

расчета двухполюсные компоненты типа R и C, а также частотно-зависимые (инерционные) управляемые источники различных типов.

Программное обеспечение сетевой службы для расчета динамического режима нелинейных систем основано на выделении из полной совокупности базисных переменных подмножества дифференцируемых переменных, к которым следует отнести дифференцируемые переменные в уравнениях частотно-зависимых двухполюсников типа R и C

$$p = D\dot{q} ,$$

а также дифференцируемые переменные в уравнениях частотно-зависимых управляемых источников типа JU, EU, JI, EI

$$p + \dot{p}\tau_2 - w_0q - w_0\dot{q}\tau_1 = 0$$

При формировании математического описания в координатный базис расширенных узловых потенциалов включаются все составляющие вектора дифференцируемых переменных  $Q_s = [U_s^t, I_s^t]^t$ , а также составляющие вектора  $Q_f = [U_f^t, I_f^t]^t$ , входящие в функциональные зависимости  $P_f = F(Q_f)$  нелинейных компонентов схемы.

В работе показано, что при таком выборе переменных легко решаются задачи разгона вычислительного процесса для расчета вектора X на основании его исходного значения  $X^0$ . Особенно важным является то обстоятельство, что при таком подходе на всех шагах работы программного обеспечения моделируемой схемы расчет будет выполняться по унифицированной процедуре.

**В четвертой главе** рассматриваются методы построения сетевых служб для моделирования систем при вариации их параметров под влиянием изменения внешних воздействий или вследствие технологического разброса при серийном изготовлении объекта. В работе введен обобщенный параметр вариации  $w = [R, C, L, y, \mu, \beta, z, \lambda]$ , в качестве которого может выступать значение параметров двухполюсника схемы типа R, C, L, параметр передачи  $y, \mu, \beta, z$  управляемых источников типа ИТУН, ИНУН, ИТУТ, ИНУТ, а также параметры произвольных внешних воздействий  $\lambda$  (температура, давление, влажность и т.д.), и обобщенную выходную координату  $x_k = \{u_k, i_k\}$ , то можно определить обобщенную чувствительность переменной  $x_k$  к вариации обобщенного параметра  $w$

$$\gamma_w^x = \frac{\partial x_k}{\partial w}$$

В зависимости от характера задачи переменная  $x_k$  может быть параллельной переменной ( $x_k = u_k$ ) или последовательной переменной ( $x_k = i_k$ ).

Можно также определить относительную чувствительность переменной  $x_k$  к вариации обобщенного параметра  $w$

$$\tilde{\gamma}_w^x = \frac{\partial x_k}{\partial w} \frac{w}{x_k}$$

а также полуотносительную чувствительность переменной  $x_k$  к вариации обобщенного параметра  $w$

$$\bar{\gamma}_w^x = \frac{\partial x_k}{\partial w} w$$

В диссертационной работе выполнена реализация и сравнительная оценка двух подходов к решению задачи: на основании дифференцирования уравнений схемы и на основании теоремы Теллегена.

Дифференцирование уравнения схемы в точке  $X = X^0$  с учетом зависимостей  $W_1 = W_1(w)$ ,  $S_2 = S_2(X, w)$ , приводит к уравнению чувствительности

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

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

Новый вектор  $\bar{X}$  является вектором чувствительности всех переменных  $x_k$  к вариации некоторого параметра  $w$ , т.е.

$$\bar{X} = \left[ \dots, \frac{\partial x_k}{\partial w}, \dots \right]^t = \left[ \dots, \gamma_w^x, \dots \right]^t$$

Аналитическое формирование вектора  $\bar{S}$  в уравнении чувствительности требует нахождения производной от матрицы  $W_j$ . Для практического решения этой задачи в диссертационной работе предлагается выделить варьируемого параметра отдельно и провести дифференцирование только уравнения варьируемого компонента, что приводит к уравнению моделирующей схемы компонента  $\bar{p}_i = w\bar{q}_j + \bar{s}_i$

где  $\bar{p}_i = \frac{\partial p_i}{\partial w}$ ,  $\bar{q}_j = \frac{\partial q_j}{\partial w}$ ,  $\bar{s}_i = q_j$

Подход, основанный на дифференцировании уравнений, приводит к методу построения сетевой службы, выполняющему расчет векторной чувствительности всех переменных к вариации выбранного единственного параметра схемы. Возможен другой подход к решению задачи расчета неустойчивости режима, основанный на использовании скалярной чувствительности выбранной переменной  $q_k$  к вариации всех параметров

$$\gamma_w^q = \hat{X}^t \bar{S}$$

где  $\hat{X}^t$  транспонированный вектор базисных переменных присоединенной согласно теореме Теллегена схемы.

Для построения соответствующей сетевой службы в диссертационной работе предложена методика расчета скалярной чувствительности выбранной переменной при вариации параметров всех двухполюсников

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

и всех управляемых источников

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

В диссертационной работе показано, что для расчета чувствительности схемных функций  $T_{kl=x_k/s_l}$  к вариации параметров и внешних воздействий можно использовать выражения для чувствительности переменных, так как при  $s_l=1$  они определяют соответствующие выражения для расчета чувствительности схемных функций. При этом следует полагать, что все нелинейные компоненты моделируемой схемы представлены в линеаризованной форме и, следовательно, схема является линейной. Кроме того, расчет чувствительности необходимо выполнять на основе комплексного типа данных, то есть на основе класса Complex.

Структура алгоритма расчета чувствительности схемных функций для линейных систем на основе дифференцирования уравнений при этом может быть представлена в виде

1. Формирование комплексных матриц  $W$  и  $S$  исходной схемы.
2.  $LU$  – факторизация исходной схемы  $W = LU$ .
3. Расчет вектора  $X$  исходной схемы путем выполнения прямого и обратного хода исходной схемы  $T = -L^{-1}S$ ,  $X = U^{-1}T$ .
4. Формирование вектора  $\bar{S}$  моделирующей схемы для варьируемого компонента.
5. Решение уравнения чувствительности моделирующей схемы  $W\bar{X} + \bar{S} = 0$  на основе  $LU$  – факторизации  $T = -L^{-1}\bar{S}$ ,  $\bar{X} = U^{-1}T$ .
6. В случае необходимости расчета чувствительности системы к вариации других параметров возврат на шаг 4.

Аналогично строится алгоритм расчета чувствительности схемных функций к вариации параметров на основе теоремы Теллегена с применением присоединенных схем.

### **Основные результаты диссертационной работы**

1. Построена методика разработки самодокументируемых сетевых служб .NET для клиент-серверных схмотехнических САПР.
2. Предложена структура и технология формирования расширенного WSDL-документа сетевых служб .NET, обеспечивающие унифицированное описание компонентов моделируемой схемы и возвращаемых результатов расчета.
3. Разработана методика построения программного обеспечения клиентской стороны клиент-серверных схмотехнических САПР на основе расширенного WSDL-документа.



4. Выполнено исследование и разработана методика построения сетевых служб .NET для моделирования линейризованных электронных схем в частотной области на основе встроеного класса для работы с комплексными данными.
5. Разработаны методы построения сетевых служб .NET для расчета стационарных и динамических характеристик нелинейных схем.
6. Построена методика создания сетевых служб .NET для моделирования электронных схем при изменении их параметров и внешних воздействий.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

##### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:***

1. Ахмад А.Д.<sup>1</sup> Веб-сервисы для расчета векторной чувствительности переменных электронных схем к изменению внешних воздействий [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Датчики и системы №11 2015 с. 3-8
2. Ахмад А.Д. Построение клиентских .NET-приложений в распределенных схемотехнических САПР [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Системы и средства информатики №1 2016 с.206-215
3. А.Д. Ахмад. Построение веб-сервисов для расчета неустойчивости стационарного режима нелинейных систем [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Информационные технологии и вычислительные системы №3 2016 с 20-25
4. А.Д. Ахмад. Построение веб-служб платформенно-независимых распределенных систем автоматизации схемотехнического проектирования [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Информационные технологии в проектировании и производстве №3 2017. С. 12-19
5. А.Д. Ахмад. Методы организации клиент-серверных взаимодействий в гетерогенных средах [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Информационные технологии в проектировании и производстве №1 2017. С.3-9
6. А.Д. Ахмад. Автоматизация расчета чувствительности схемных функций к вариации параметров и внешних воздействий [Текст] / Гридин В.Н., Анисимов В.И. Ахмад А.Д. // Вестник компьютерных и информационных технологий №9 2017. С.38-45
7. А.Д. Ахмад. Построение веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций методом присоединенных схем [Текст] В.Н. Гридин, В.И. Анисимов, А.Д. Ахмад // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №3 2018 с. 12-17

---

<sup>1</sup> Имя А.Д. Ахмад читать в редакции Ахмад Алтайб Давод

***Другие статьи, материалы конференций и зарегистрированные программы:***

8. Ахмад А.Д. Методы построения клиентских приложений в веб-ориентированных системах автоматизации схмотехнического проектирования. [Текст] / Анисимов В.И. Ахмад А.Д. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2015» с. 34 -36 – М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2015.
9. Ахмад А.Д. Методы построения платформенно-независимых веб-служб. [Текст] / Анисимов В.И. Ахмад А.Д., Тарасова О.Б. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2016» с. 39-41– М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2016.
10. Ахмад А.Д. Методы построения сервис-ориентированных систем автоматизации схмотехнического проектирования. [Текст] / Анисимов В.И. Ахмад А.Д., Тарасова О.Б. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2017» с. 34-36 – М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2017.
11. Ахмад А. Д. Методы построения веб-сервисов и клиентских приложений распределенных систем дистанционного обучения. [Текст] / Ахмад А.Д. Материалы XIII Международной научно- методической конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество". т.1 с.117-120. Санкт- Петербург, СПбГЭТУ, 2017.
12. Ахмад А.Д. Методы построения распределенных систем автоматизации схмотехнического проектирования на основе веб-сервисов. [Текст] / Анисимов В.И. Дмитриевич Г.Д., Ахмад А.Д., Чернов А.Н. Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем 2018» с. 29-32.– М.: Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2018.
13. Ахмад А.Д. Построение серверных и клиентских приложений систем дистанционного обучения [Текст] / Ахмад А.Д., Анисимов В.И. Материалы XIV Международной научно- методической конференции "Современное образование: содержание, технологии, качество". Том.2 с.78-81. Санкт- Петербург, СПбГЭТУ, 2018.
14. Сервис-ориентированная программа расчета стационарного режима (WebService\_Static): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – № 2019613595/ Анисимов В.И., Васильев С.А., Ахмад А.Д.; опубл. 19.03.19 г., заявка № 2019612173 от 04.03.2019