

На правах рукописи

**Горшков Константин Сергеевич**

**СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ  
И СИМВОЛЬНЫЙ ДОПУСКОВЫЙ АНАЛИЗ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
МЕТОДОМ СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ**

05.09.05 – Теоретическая электротехника

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2010

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете на кафедре «Электроснабжение».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Филаретов Владимир Валентинович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Алпатов Михаил Евгеньевич,

кандидат технических наук,  
доцент Жохова Марина Павловна

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский электромеханический институт» (НИЭМИ), г. Москва

Защита состоится “ 26 “ ноября 2010 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.157.13 при Московском энергетическом институте (Техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, ауд. 3-505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Ученый совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан “ ..... 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.157.13

Вишняков С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблеме синтеза линейных электрических цепей (ЛЭЦ) посвящено большое число публикаций, однако создание схемы до сих пор относят к изобретательскому уровню и выдают патенты на устройства или способы. Общей теории структурного синтеза схем до сих пор не создано, поскольку нельзя формализовать процесс синтеза, устранив участие эксперта.

Существует большое количество всевозможных частных процедур, так называемых «рецептурных» методик, в большинстве случаев основывающихся на некотором математическом разложении полиномиальной схемной функции (ПСФ), которая принудительно определяет получаемую частную структуру соединения элементов. Вместе с тем, синтез ЛЭЦ должен основываться на их общих свойствах, которые могут быть исследованы путем анализа цепей [К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.—2003]. В частности, метод переменных состояния был разработан вначале для анализа, а затем для синтеза [П. А. Ионкин, В. Г. Миронов.—1976]. Однако до сих пор схемный подход, эффективный для решения задач символьного анализа и диагностики, не обобщен для синтеза ЛЭЦ.

Существующие методы схемной реализации ПСФ основаны на использовании промежуточных математических моделей ЛЭЦ (матриц, графов, структурных схем, теоретико-множественных объектов, символьных схемных функций (ССФ)). Методы реализации структурных схем и ССФ на сегодняшний день развиты слабо. Наибольшее распространение получили методы синтеза, позволяющие реализовать схему ЛЭЦ по матрице системы уравнений, множеству структурных чисел и графовым моделям. Данные методы являются эвристическими и, как любой другой творческий процесс, плохо поддаются формализации. Как следствие, конечный результат будет напрямую зависеть от опыта специалиста. Кроме того, многие известные методы приводят нас лишь к некоторым частным структурам реализации цепей, в лучшем случае к частным классам структур. Другой проблемой является привязанность большинства методов к определенной элементной базе.

Таким образом, эффективной формализованной методики синтеза ЛЭЦ, позволяющей реализовать на произвольной элементной базе полное множество схем на основе схемной функции, минуя использование промежуточных моделей, и обеспечить выбор оптимальных структур, до сих пор не создано.

Одним из важнейших показателей при анализе эквивалентных реализаций, полученных в результате структурного синтеза, служит чувствительность цепи к изменениям параметров пассивных и активных компонент. То есть важно, чтобы метод структурного синтеза дополнялся эффективным аналитическим алгоритмом анализа влияния допусков элементов на коэффициент преобразования электрической цепи. Максимальное использование возможностей аналитических методов рассматривается «в качестве предварительного условия для последующего перехода к численным расчетам», что позволяет реализовать «преимущества компактности и полноты информации аналитических решений» [К.С. Демирчян, П.А. Бутырин.—1988]. Однако до сих пор не создана методика получения символьных выражений для определения погрешности преобразования и допусков ЛЭЦ на основе схемного подхода.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов структурного синтеза и допускового анализа электрических цепей на основе аппарата схемных определителей.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка методик структурного синтеза ЛЭЦ на основе схемных функций;
- разработка методики структурного синтеза ЛЭЦ на основе структурных схем;
- разработка методики формирования символьных выражений для определения погрешностей преобразования ЛЭЦ и допусков на параметры элементов, наиболее удобных по форме представления для многовариантного моделирования, аналитических исследований и точных вычислений.

Методы исследования. В работе использовались теория линейных электрических цепей и аппарат схемных определителей. Для обоснования отдельных положений применялись матричная алгебра, элементы комбинаторики, теория эквивалентности схем, элементы теории графов.

Научная новизна основных результатов работы:

1. Разработана методика восстановления ЛЭЦ по их ССФ, в основе которой лежат формулы В. Фойснера для выделения двухполюсных элементов и их обобщения, которые использовались ранее только для анализа и диагностики ЛЭЦ. Предложенная методика может применяться при создании схем электрических моделей неэлектрических (механических, тепловых и т.д.) систем.

2. Разработана прямая методика реализации полного множества эквивалентных схем ЛЭЦ с заданными ПСФ, исключая применение промежуточных математических моделей. Методика не имеет ограничений по типу заданной полиномиальной функции и используемой элементной базе цепей и обеспечивает получение оптимальных по числу элементов схемных решений.

3. Предложен метод реализации структурных схем электрических цепей на основе новой элементной базы – транскондуктивных усилителей. В отличие от традиционных методов, предложенный метод позволяет получить коэффициент передачи схемы на транскондукторах, полностью идентичный коэффициенту передачи исходной структурной схемы, без выполнения условий настройки.

4. Получены схемно-алгебраические формулы для определения мультипликативной (т.е. обусловленной внутренними процессами) погрешности преобразования ЛЭЦ и допусков произвольных линейных элементов. Разработанные формулы обеспечивают получение аналитических выражений для погрешностей преобразования и допусков элементов и не требуют многократных повторных расчетов для оценки влияния технологического разброса параметров этих элементов на коэффициент передачи ЛЭЦ.

Практическая значимость основных результатов:

1. Предложен рекурсивный алгоритм восстановления схем по заданной ССФ, который реализован в компьютерной программе SymSin, предназначенной для расширения классов эквивалентных схем ЛЭЦ.

2. Разработан алгоритм структурного синтеза на основе ПСФ, обеспечивающий исключение нетехнологичных (непатентоспособных) схемных решений непосредственно в процессе синтеза. Алгоритм реализован в программе InterSyn.

3. Автоматизирован процесс реализации структурных схем ЛЭЦ на основе транскондуктивных усилителей с помощью программы SchemeConverter. Программа позволяет использовать произвольную блок-схему ЛЭЦ для получения схемного решения на современной элементной базе.

4. Разработана программа Toleralize, предназначенная для получения аналитических выражений для определения погрешностей преобразования и допусков параметров элементов ЛЭЦ. Использование программы Toleralize позволяет сократить время на параметрическую оптимизацию схемы за счет уменьшения необходимых операций расчета.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы составили основу большинства разделов читаемого автором на кафедре «Электроснабжение» УлГТУ курса «Основы теории цепей» для специальности 200700 «Радиотехника», а также дисциплины «Электротехника и электроника» для специальности 071900 «Информационные системы и технологии».

Результаты диссертации использованы в следующих компьютерных программах: в программе восстановления ЛЭЦ по ССФ SymSin [35], в программе структурного синтеза ЛЭЦ по ПСФ InterSyn [39], в программе топологического синтеза ЛЭЦ Switcher [41], в программе транскондуктивной реализации структурных схем ЛЭЦ SchemeConverter [40] и в программе допускового анализа ЛЭЦ Toleralize [42]. Данные программы входят в систему схемотехнического проектирования SCAD [6, 30, 32], которая свободно распространяется через Интернет-сайт <http://intersyn.narod.ru>.

Разработанные методики структурного синтеза и допускового анализа, а также их программные реализации приняты для практического использования в разработках ОАО ФСК ЕЭС «Московское предприятие магистральных электрических сетей», внедрены в научные исследования и учебный процесс на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики в Чувашском государственном университете им. И.Н.Ульянова, на кафедре «Радиотехника» Поволжского Государственного Университета Сервиса, на кафедре «Биомедицинская техника» Тамбовского государственного технического университета, что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Континуальные алгебраические логики, исчисления и нейроинформатика в науке и технике» (Ульяновск, 2005–2007), «Международная Конференция по Сигналам и Электронным Системам (ICSSES'08)» (Краков, 2008), «Электроника и нанотехнологии» (Киев, 2009–2010), «Волгинские чтения-2009», а также на ежегодных научно-технических конференциях УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях» в 2006-2009 гг.

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации представлены в 42 работах, в том числе в 2 монографиях, 1 учебном пособии, 1 статье в журнале РАН «Электричество», 5 тезисах научных конференций и 8 программах, зарегистрированных в отраслевом фонде электронных ресурсов науки и образования (ОФЭРНИО). Учебное пособие [1] отмечено дипломом «За лучший

авторский коллектив» на II-ом Приволжском региональном конкурсе на лучшую вузовскую учебную книгу «Университетская книга – 2009».

Личный вклад автора в работы, где изложены положения, выносимые на защиту. Все результаты, выносимые на защиту, получены лично автором диссертации. Научному руководителю – В.В. Филаретову – принадлежат идеи, постановки задач, выбор направлений исследования и сопутствующие указания при проведении исследований в области схемно-топологической теории ЛЭЦ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и библиографического списка. Текстовая часть изложена на 158 страницах. Приложение содержит документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, отмечена ее новизна и практическая значимость.

Первый раздел «Аналитический обзор и состояние проблемы структурного синтеза и допускового анализа электрических цепей» посвящен обоснованию и формулировке задач диссертационной работы, обзору наиболее распространенных методик структурного синтеза и допускового анализа электрических цепей.

Синтез представляет собой проектную процедуру, целью которой является соединение различных элементов, свойств в единое целое, систему. Традиционно синтез ЛЭЦ разделяют на два этапа: аппроксимацию (частотных и временных характеристик) и реализацию (нахождение схемы и синтез ее параметров). Однако такой упрощенный подход к процедуре проектирования ЛЭЦ не вполне корректен, поскольку в действительности решение задачи синтеза требует выполнения большего числа этапов [Ю.И. Лыпарь.– 2004]: 1) синтез целей и их моделей, формализация свойств и ограничений; 2) синтез принципов схемной реализации; 3) аппроксимация; 4) синтез способов схемной реализации; 5) синтез структуры; 6) синтез параметров; 7) синтез допусков на параметры.

Проведенное в первой главе диссертации исследование показало, что вопросы аппроксимации характеристик ЛЭЦ и синтеза параметров на сегодняшний день изучены достаточно полно. Проблемами аппроксимации характеристик ЛЭЦ занимались видные зарубежные и отечественные специалисты: И.Л. Трифонов, А. А. Ланнэ, Е.А. Гиллемин, П.Н. Матханов, Н. Балабанян, А.В. Бондаренко, К. Су, П. Хьюлсман, П.А. Ионкин и В.Г. Миронов, Баттерворт, Кауэр, Эрмит, Гененбауэр, Падэ, А.Ф. Белецкий и др. Поэтому в данной работе вопросы, касающиеся аппроксимации и параметрического синтеза не рассматриваются.

В тоже время наименее формализованными этапами проектирования ЛЭЦ являются этапы синтеза способов схемной реализации и синтеза структуры. Это связано с тем, что, с одной стороны, свойства синтезируемого объекта зависят от большого числа зачастую случайных, противоречивых, не до конца исследованных факторов. Эта причина имеет объективный характер. С другой стороны, при решении задачи синтеза часто приходится выбирать вариант из множества очень большой конечной или даже счетной мощности. Для многих известных подходов характерно отсутствие даже постановки задачи о том, что делать со структурами,

если их число будет огромно, как из них устранить изоморфные, выбрать эффективные структуры?

Выбор оптимальной схемы требует анализа, эквивалентных (с точки зрения схемных функций) реализаций по различным показателям, особенно важным для конкретных условий. Возможно, что оптимальное решение может быть получено только при сочетании различных существующих методов реализации.

Исходной для решения задачи реализации является схемная функция  $S(p)$ . Обычно это такое представление, когда минимальная степень комплексной частоты  $p$  в полиноме числителя и (или) знаменателя равна нулю:

$$S(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 p^0}{b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_0 p^0}. \quad (1)$$

Существует множество разнообразных методов синтеза ЛЭЦ, которые можно условно разделить на частные и общие методики. Частные, или «рецептурные» методы, требуют различного подхода к каждой конкретной проблеме синтеза. Обычно их названия связывают с фамилиями их создателей, например методы, предложенные Фостером (1924 г.), В. Кауэром (1926 г.), О. Бруне (1931 г.), Баттервортом (1930 г.), Боде (1934 г.), Дарлингтоном (1939 г.), Боттом, Даффином (1949 г.), Гиллемином (1949 г.), Мията (1952 г.), Озаки (1953 г.), Реза (1954 г.) и другими. Иногда эти методы отличаются оригинальностью и показывают творческую мысль авторов. Как правило, частные процедуры основываются на некотором математическом разложении ПСФ, которое принудительно определяет получаемую частную структуру соединения элементов, и накладывают резкие ограничения на величины и род используемых элементов. Широко распространены также методики, основанные на использовании некоей обобщенной модели ЛЭЦ определенного класса, к которому относится проектируемое устройство.

Использование частных процедур целесообразно, если на втором этапе проектирования был выбран принцип построения, определяющий в общем виде структуру схемы. Однако применение подобных математических операций требует опыта и изобретательности, не обеспечивая возможности получения полного множества эквивалентных структур и выбора из них оптимального схемного решения. Различные методы синтеза приводят к схемам, отличающимся по типу и числу применяемых активных и пассивных элементов, чувствительности, устойчивости и другим характеристикам. Поэтому на практике часто используются сразу несколько различных частных методик.

Значительно большие возможности для реализации множества схем, соответствующих заданной функции, предоставляют общие методы структурного синтеза. Как правило, они основываются на свойствах ЛЭЦ, исследованных путем анализа цепей специальными методами (переменных состояния, сигнальных графов, компонентных уравнений и т.д.).

Многие частные и практически все известные общие методики к схемной реализации ПСФ связаны с использованием промежуточной избыточной математической модели (матрицы коэффициентов (матрицы коэффициентов [П. А. Ионкин, В. Г. Миронов.—1976], графа [В.Т. Долбня.—1974, А.Г. Остапенко.—1985], структурной схемы [А.М. Сучилин.—1964] или множества структурных чисел

[С. Беллерт, Г. Возняцки.–1972]). Нередко применение в рамках одного метода сразу нескольких промежуточных моделей. Такие модели требуют затрат на их построение и ограничивают допустимый набор схемных элементов. Избыточность математических моделей обуславливает появление дубликаций – равных по величине, но противоположных по знаку подобных членов в формируемых выражениях. Избыточные операции вычитания увеличивают погрешность при вычислениях [В.В. Филаретов.–1998].

Таким образом, эффективной формализованной методики структурного синтеза ЛЭЦ, позволяющей реализовать на произвольной элементной базе полное множество эквивалентных схем на основе заданной схемной функции (ССФ или ПСФ), минуя использование промежуточных моделей, и обеспечить выбор оптимальных структур, до сих пор не создано. Разработка такой методики является **первой задачей диссертации**, и ее целесообразно решать на основе схемного подхода В. Фойснера, поскольку отказ от промежуточной математической модели открывает новые возможности для структурного синтеза [В.К. Захаров, Ю.И. Лыпарь.–1984]. Наиболее полно схемный подход развит в методе схемных определителей (МСО) [В.В. Филаретов.–1998].

В проектировании ЛЭЦ для эскизного анализа и синтеза принципов схемной реализации схем часто используются структурные схемы. При этом переход от структурных схем к схеме замещения цепи является эвристической процедурой и требует значительного опыта проектировщика. Кроме того, полученный результат, как правило, будет соответствовать исходной структурной схеме только при выполнении определенных условий согласования параметров (условий настройки). Необходимы методы, позволяющие перейти от известных структурных схем к ЛЭЦ, созданным на современной элементной базе, и обеспечивающие сохранение качеств и характеристик исходных структур без применения условий настройки.

**Второй задачей диссертации** является разработка методики реализации структурных схем ЛЭЦ на основе транскондуктивных усилителей.

Одним из важнейших показателей при анализе эквивалентных реализаций для выбора оптимальной служит устойчивость цепи и ее чувствительность к изменениям параметров пассивных и активных компонентов. Следовательно, желательно, чтобы алгоритм структурного синтеза дополнялся эффективным методом анализа влияния разброса технологических параметров элементов на коэффициент преобразования ЛЭЦ. Представление значений погрешностей преобразования, а также допусков элементов, в аналитическом виде может помочь избежать необходимости многократных повторных расчетов и позволит оценить как влияние изменения параметров этих элементов на номинальный коэффициент передачи, так и влияние на них изменения самого коэффициента передачи. Однако до сих пор не создана методика получения символьных выражений для определения погрешности преобразования и допусков ЛЭЦ на основе схемного подхода.

Таким образом, **третьей задачей диссертации** является разработка методики получения общих аналитических выражений, позволяющих рассчитать погрешности преобразования ЛЭЦ и допуски на параметры элементов, не прибегая к многократному анализу схемы.



Во втором разделе диссертации «Структурный синтез электрических цепей по их схемным функциям» решается *первая задача* диссертации – разработка методик структурного синтеза ЛЭЦ по их ССФ и ПСФ.

Основы метода схемных определителей. В основе предлагаемых в диссертации методов структурного синтеза и допускового анализа ЛЭЦ лежат формулы Фойснера [W. F. Feussner.–1902, 1904] для выделения двухполюсных элементов и их обобщения для выделения параметров управляемых источников (УИ) [В.В.Филаретов.–1998], которые использовались ранее только для анализа и диагностики [1, 2, 18, 19, 28].

В схемно-алгебраической форме формулы Фойснера имеют вид:

$$\left| R \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| = R \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| + \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| \quad (2)$$

$$\left| g \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| = g \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| + \left| \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right| \quad (3)$$

В общем случае произвольный параметр может быть выделен с помощью следующего выражения:

$$\Delta = \chi \Delta(\chi \rightarrow \infty) + \Delta(\chi = 0), \quad (4)$$

где  $\chi_i \in \{R, g, K, G, H, B\}$ ;  $\Delta(\chi \rightarrow \infty)$  – определитель первой производной схемы, полученной из исходной схемы в результате присвоения параметру  $\chi$  значения, стремящегося к бесконечности (сопротивление удаляется, проводимость заменяется на схеме идеальным проводником (стягивается), УИ заменяется на идеальный усилитель Теллегена (нуллор) [B.D.H. Tellegen.–1966]);  $\Delta(\chi=0)$  – определитель второй производной схемы, образованной в результате нейтрализации выделяемого элемента, то есть принятия  $\chi=0$  (сопротивление стягивается, проводимость удаляется, УИ нейтрализуется). При замещении УИ его генератор и управляющая ветвь заменяются на элементы нуллора: норатор и нуллятор соответственно. При нейтрализации генератор напряжения и ветвь управляющего тока стягиваются, а генератор тока и ветвь управляющего напряжения удаляются.

Выделение элемента  $X_1$  по выражению (4) приводит к возникновению двух новых схем, состоящих из  $n-1$  элементов. Элементы выделяются рекурсивно до получения простейшей схемы, определитель которой выводится из закона Ома, (например, разомкнутые сопротивление или проводимость, замкнутые на себя сопротивление или проводимость, контур с нуллором, разомкнутая ветвь с норатором и нуллатером, контур с УИ).

Любая схемная функция может рассматриваться как отношение  $N/D$  [J.Braun.–1966]. Числитель  $N$  здесь является определителем схемы, в которой независимый источник и ветвь искомого отклика замещаются нуллором, а знаменатель  $D$  – определителем схемы с нейтральзованными входом и выходом.

Алгоритм восстановления электрических цепей по их ССФ [1, 4, 14, 17, 31]. Известен метод синтеза, основанный на теории ненаправленных нормализованных графов, позволяющий восстановить структуру схемы по заданной ССФ [В.Т. Долбня.–1974]. Метод имеет ограничение на тип используемых активных элементов (только источники тока, управляемые напряжением (ИТУН)) и не позволяет получить полное множество схем, инвариантных к ССФ. Использование аппарата МСО позволяет преодолеть указанные недостатки.

В диссертации предлагается алгоритм восстановления схем по их ССФ, который основан на повторной частичной свертке определителя до получения простейшей схемы и последующего ее наращивания до искомой схемы. Порядок выделения элементов произвольный. Исходным выражением для работы алгоритма является развернутое выражение определителя, в котором раскрыты все скобки. Пусть  $N_n / D_n$  – символьная схемная функция, на основе которой требуется реализовать схему, состоящую из  $n$  элементов:  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m, \chi_n$ .

1. Из выражения  $D_n$  выделить параметр  $\chi_1$ . Результатом станет выражение  $D_{(n-1)}$ , соответствующее схеме с определителем  $D_n$ , в которой, согласно (4),  $\chi_1 \rightarrow \infty$ , либо  $\chi_1 = 0$ . Продолжать выделение параметров  $\chi_2, \chi_3, \dots, \chi_m$  до тех пор, пока не будет получена выражение  $D_{(n-m)}$ , соответствующее определителю простейшей схемы.

2. Реализуется перебор всех возможных вариантов подключения элементов, выделенных на шаге 1, к простейшей схеме, соответствующей определителю  $D_{(n-m)}$ . Всего используются два способа подключения: перебор всех возможных вариантов с расщеплением узлов и перебор всех пар узлов. Элементы последовательно подключаются в порядке, обратном порядку их выделения на предыдущем шаге:  $\chi_m, \dots, \chi_2, \chi_1$ . Определитель каждой схемы, полученной в результате включения элемента  $\chi_i$ , сравнивается с соответствующим выражением  $D_{(n-m+i)}$ , полученном на шаге 1 при выделении этого элемента, если они не равны, то полученная структура считается ошибочной, если совпадают, то верной. Новые элементы следует подключать только к верным схемам до тех пор, пока не будет получено множество схем, инвариантных относительно характеристического уравнения  $D_n$ .

3. К каждой схеме из полученного на предыдущем шаге множества структур, инвариантных относительно  $D_n$ , подключаются норатор и нуллятор всеми возможными способами. Определитель каждой невырожденной схемы, образованной в результате подключения элементов нуллора, сравнивается с выражением  $N_n$ , если они не равны, то схема считается неверной, если равны, то верной. Во множестве полученных верных схем нораторы заменяются на независимые источники ЭДС или тока, а нуллаторы на ветви искомого отклика по току или напряжению, в соответствии с видом заданной ССФ.

Если существует хотя бы одна схема, соответствующая заданной ССФ, она будет получена в результате выполнения алгоритма. Если существует множество эквивалентных схем, инвариантных относительно заданной схемной функции, то все они также будут восстановлены. Предложенный алгоритм реализован Ю.В. Токаревым в программе SymSin [35].

Полученное по заданной ССФ множество схем во многих случаях может содержать структуры, образованные элементарными эквивалентными преобразованиями. Такие схемы можно считать изоморфными, их требуется исключать во избежание избыточности конечного результата. Для исключения изоморфных схем из множества полученных при структурном синтезе ЛЭЦ по заданной ССФ в диссертации использована методика установления изоморфизма на основе распределения показателей участия ветвей [23, 24]. В программе SymSin [35] реализованы алгоритмы установления изоморфизма, а также выборки из полученного множества схем по расположению узла с нулевым потенциалом.

Обобщение методики восстановления схем по ССФ на ПСФ. Методика восстановления схем по ССФ была обобщена на ПСФ [10, 29]. Для функций вида (1) повторная частичная свертка знаменателя  $D_k$ , представляется в следующей форме:

$$D_0=b_0, \quad D_1=b_1p+D_0, \quad D_2=b_2p^2+D_1, \quad \dots, \quad D_k=b_kp^k+D_{k-1}, \quad (5)$$

где  $D_0, D_1, \dots, D_{k-1}$  – определители подсхем структуры соответствующей  $D_k$ .

Разложение (5) будет соответствовать последовательному исключению конденсаторов и катушек индуктивностей из схемного выражения  $D_k$ , в результате которого останется либо схема с одним реактивным элементом с определителем  $D_1$ , либо схема, состоящая из резисторов и УИ с определителем  $D_0$ . Схему, соответствующую результату разложения (5), будем называть начальной схемой. При известном элементном базисе имеет смысл последовательное наращивание начальной схемы до схем, соответствующих выражениям  $D_1, D_2, \dots, D_k$ . После получения схемного выражения знаменателя функции (1) к нему можно подключить нулор и перейти к схеме числителя.

Выбор начальной схемы для реализации произвольной функции вида (1) следует проводить согласно следующим правилам [10, 29].

**Правило 1.** Если в заданной функции вида (1) коэффициенты  $b_0 \neq 0, b_1 \neq 0$ , то выражение  $D_0$  можно рассматривать как определитель схемы, содержащей в себе резисторы, УИ или нулоры [14]. В этом случае начинать наращивание целесообразно со схемы, состоящей из одного резистора или УИ.

**Правило 2.** Если коэффициенты  $b_0 \neq 0, b_1=0$ , то выражению  $D_1$  будут соответствовать простейшие схемы с реактивными элементами, определитель которых равен единице: разомкнутая ветвь индуктивного сопротивления и замкнутый контур из емкостной проводимости.

**Правило 3.** Если  $b_0 = 0, b_1 \neq 0$ , то в качестве начальной схемы для наращивания (соответствующей  $D_1$ ) может быть выбрана разомкнутая ветвь емкостной проводимости или замкнутый контур из индуктивного сопротивления. В общем случае, если  $b_0=0, \dots, b_{k-1}=0$ , то выражению  $D_k$  будет соответствовать совокупность из  $k$  разомкнутых емкостных ветвей или индуктивных контуров. Отметим, что в этом случае начальная схема не будет простейшей.

Проверку на соответствие определителей схем, получаемых в ходе наращивания, выражениям  $D_1, D_2, \dots, D_{k-1}, D_k$  удобно проводить путем сравнения коэффициентов соответствующих полиномов с учетом их знака. Например, выражению  $D_2 = b_2p^2 + b_1p - b_0$  будет соответствовать схема, в определителе которой коэффициенты  $b_0 < 0, b_1 > 0, b_2 > 0$ . Для выражения  $D_2 = b_2p^2 + b_0$  коэффициенты определителя схемы должны быть следующие  $b_0 > 0, b_1 = 0, b_2 > 0$ . Если коэффициенты совпадают, полученное схемное решение будет считаться корректным, если нет, то некорректным. Для получения символьных выражений коэффициентов ПСФ можно воспользоваться программой CIRSWM, которая входит в систему схемотехнического моделирования SCAD.

С целью автоматизации получения схемных решений по заданной функции с помощью предложенной методики был разработан алгоритм структурного синтеза, реализованный в программе InterSym [39].

Алгоритм структурного синтеза электрических цепей на основе ПСФ. Начальными данными для работы программы InterSym являются знаменатель и числитель аппроксимированной ПСФ вида (1), удовлетворяющей условиям физической реализуемости, а также состав элементной базы. Процедура схемной реализации ПСФ состоит из следующих этапов:

1. Выбор критерия оптимальности реализации: а) минимальное количество элементов, б) минимальное количество  $C$ , в) минимальное количество  $L$ , г) минимальное количество реактивных элементов, д) минимальное количество активных элементов.

2. Выбор начальной схемы согласно правилам 1–3.

3. Реализация полного класса схем, соответствующих выражению знаменателя ПСФ (1). В программе InterSym реализованы два режима генерации множества эквивалентных структур: полностью автоматический и с участием эксперта.

4. Подключение к полученным на предыдущем шаге схемам нуллора для реализации множества структур соответствующих числителю заданной ПСФ (1).

5. Исключение нетехнологичных замкнутых структур по выбору пользователя: 1) структур, содержащих так называемый «шарнирный узел», то есть схем, которые могут быть разделены на две несвязные подсхемы в результате бисекции по одному узлу [1]; 2) структур, содержащих разомкнутые ветви или замкнутые контура с двухполюсником; 3) структуры с активными элементами, в которых генератор и управляющая ветвь УИ не имеют общей точки; 4) структуры, в которых дополнительный УИ не соединен с общей точкой активных элементов.

6. Замена элементов нуллора на соответственно независимый источник и ветвь искомого отклика, в зависимости от вида ПСФ, в каждой реализованной схеме.

В автоматическом режиме посредством последовательного наращивания простейшей схемы элементами выбранного базиса, с учетом выбранного критерия оптимальности, проводится полный перебор всех возможных комбинаций соединений элементов. С одной стороны, это гарантирует получение множества схемных решений, удовлетворяющих заданным условиям, если таковые существуют, с другой, приводит к значительным временным затратам.

Режим с участием эксперта позволяет более гибко управлять процессом структурного синтеза. Он предоставляет пользователю выбрать схему и порядок подключения к ней элементов. Разнотипные элементы рекомендуется подключать поочередно. Если подключение очередного элемента не привело к получению удовлетворительного результата, можно попробовать подключение элемента другого типа. В случае необходимости возможно изменение заданного элементного базиса. Программа InterSym по желанию пользователя позволяет перейти к произвольной структуре, полученной на любом этапе наращивания.

В ходе наращивания, после подключения очередного элемента, из полученного множества схем-претендентов исключаются изоморфные структуры, для чего используется метод установления изоморфизма по распределению показателей участия вершин и ребер [23, 24].


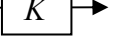
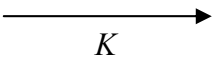
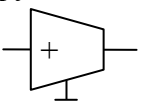
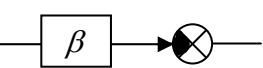
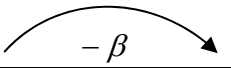
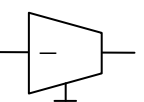



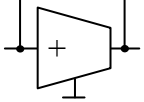
В программе InterSym реализованы следующие возможности для выбора лучшего схемного решения из множества полученных структур: 1) автоматический параметрический синтез на основе метода компонентных уравнений [А.А. Ланнэ,

Е.Д. Михайлова.–1982] для определения численных значений параметров элементов полученных схем; 2) допусковый анализ [26] для определения схем, обладающих наименьшей чувствительностью; 3) анализ частотных характеристик ЛЭЦ, построение АЧХ и ФЧХ с помощью программного модуля GraphiX [36]; 4) расчет и сравнение входного и выходного сопротивлений ЛЭЦ с помощью модуля Selector.

**Вторая задача** диссертации, разработка метода реализации структурных схем ЛЭЦ, решается в третьей главе «Схемная реализация структурных схем электрических цепей на основе транскондуктивных усилителей».

Структурная схема и ее сигнальный граф. Известно, что произвольную структурную схему электронного устройства можно отобразить с помощью сигнального графа [S.J. Mason.–1953] [33, 47], как показано в первом и втором столбцах табл. 1 [1, 5, 7, 8, 10, 14]. Так, на рис. 3,а и б изображены соответственно классическая структурная схема усилительного устройства с отрицательной обратной связью [Н. S. Black.–1928] и ее сигнальный граф при подаче на вход единичного напряжения для нахождения передаточной функции (переменные  $x_1$  и  $x_2$  также имеют размерность напряжения).

Таблица 1. Структурная схема и сигнальный граф

Номер элемента	Элементы структурной Схемы	Элементы сигнального графа	Реализация на транскондуктивных усилителях
1	 или 	Дуга с положительным параметром 	Неинвертирующий усилитель 
2	Цепь обратной связи 	Дуга с отрицательным параметром 	Инвертирующий усилитель 
3	Сумматор или узел  или 	Вершина 	Резистор 

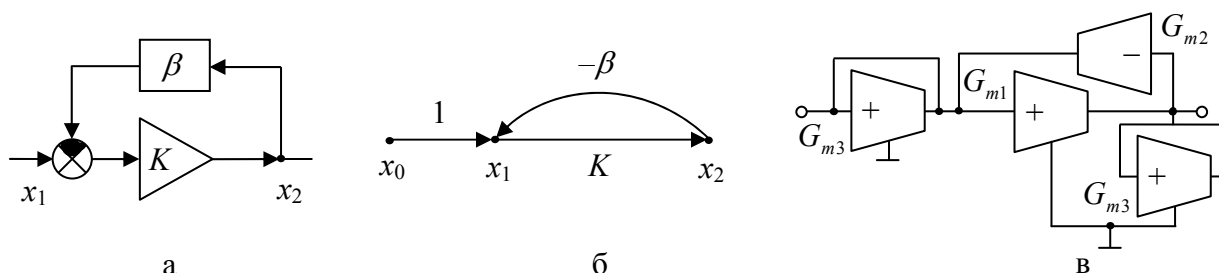


Рис. 1. Структурная схема усилителя с обратной связью (а), ее сигнальный граф (б) и транскондуктивная реализация (в)

Этот граф отображает следующую систему уравнений в матричном виде

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta \\ -K & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Очевидно, что отображение структурных схем электрических цепей матрицами (6) с единицами на главной диагонали позволяет применить для анализа обычный матричный аппарат. При транскондуктивной реализации структурных схем важно, что любую квадратную матрицу порядка  $n$ , а значит, и систему линейных алгебраических уравнений, можно представить схемой замещения на ИТУН [3, 15]. Таким образом, обеспечивается решение системы уравнений в аналоговом виде, без применения правила Крамера. Предлагается использовать в качестве моделирующего элемента не операционный усилитель, как в традиционном аналоговом моделировании [И.М. Тетельбаум, Ю.Р. Шнейдер.–1987], а транскондуктивный усилитель, являющийся неидеальным ИТУН [1, 7, 8].

Транскондуктивная реализация структурной схемы [1, 3, 5, 7, 8, 12, 15, 16, 21]. Произвольный сигнальный граф можно представить в виде схемы на ИТУН или на транскондукторах (с появлением некоторой инструментальной погрешности), минуя отображение матрицей. При этом дуги сигнального графа с положительными весами отображаются неинвертирующими усилителями (табл. 1, строка 1), дуги с отрицательными весами – инвертирующими усилителями (табл. 1, строка 2), а диагональные элементы матрицы (вершины сигнального графа) – резисторами, построенными путем замыкания входа и выхода у неинвертирующих усилителей (табл. 1, строка 3). Транскондуктивная реализация структурной схемы на рис. 3, иллюстрирует предложенную методику.

Важно подчеркнуть, что для предложенного метода пригодна любая структурная схема из множества разработанных к настоящему времени структур [1, 7, 8]. Это позволяет реализовать удачные схемы минувших лет на новом технологическом уровне, при этом коэффициент передачи полученных схемных реализаций будет идентичным коэффициенту передачи исходной структуры, без применения условий настройки. В диссертации обсуждаются особенности применения предложенной методики для проектирования высокостабильных и высокоточных усилительных устройств [12, 16]. Приводятся результаты моделирования схем на транскондукторах и дается сравнение с традиционным исполнением на операционных усилителях [1].

Автоматизировать получение транскондуктивных реализаций по структурным схемам ЛЭЦ позволяет программа SchemeConverter (автор Д.И. Стенюшкин) [21, 40].

Таким образом, во втором и третьем разделах диссертации предложены методики решения задачи синтеза ЛЭЦ на основе ССФ, ПСФ и структурной схемы.

В четвертом разделе «Символьный допусковый анализ электрических цепей» схемный подход и аппарат МСО используются для решения **третьей задачи** диссертационной работы: разработки аналитических формул для погрешностей преобразования ЛЭЦ и допусков элементов.

Допусковый анализ на основе схемного подхода [11, 26, 27]. Функция преобразования сигнала ЛЭЦ может определяться выражением (7), где  $S_0$  – есть номинальное значение коэффициента передачи,  $\gamma$  – относительная мультипликативная погрешность.

$$S = S_0(1 + \gamma), \quad (7)$$

$$S = \frac{N_\chi}{D_\chi} \left[ \left( 1 + \chi \frac{N_\chi}{N_\chi} \right) / \left( 1 + \chi \frac{D_\chi}{D_\chi} \right) \right], \quad (8)$$

$$S = \frac{N_{\chi_{1,2,\dots,n}}}{D_{\chi_{1,2,\dots,n}}} \frac{1 + \chi_1 \frac{N_{\chi_2,\dots,n}^{\chi_1}}{N_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \dots + \chi_n \frac{N_{\chi_{1,2,\dots,n-1}}^{\chi_n}}{N_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \chi_1 \chi_2 \frac{N_{\chi_{3,\dots,n}}^{\chi_{1,2}}}{N_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \dots + \chi_1 \chi_2 \dots \chi_n \frac{N_{\chi_{(1,2,\dots,n)}}^{\chi_{(1,2,\dots,n)}}}{N_{\chi_{1,2,\dots,n}}}}{1 + \chi_1 \frac{D_{\chi_2,\dots,n}^{\chi_1}}{D_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \dots + \chi_n \frac{D_{\chi_{1,2,\dots,n-1}}^{\chi_n}}{D_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \chi_1 \chi_2 \frac{D_{\chi_{3,\dots,n}}^{\chi_{1,2}}}{D_{\chi_{1,2,\dots,n}}} + \dots + \chi_1 \chi_2 \dots \chi_n \frac{D_{\chi_{(1,2,\dots,n)}}^{\chi_{(1,2,\dots,n)}}}{D_{\chi_{1,2,\dots,n}}}}. \quad (9)$$

Известен метод символьного анализа ЛЭЦ [Р.Д. Миддлбрук.—1989], позволяющий представить выражение (7) в форме (8) [11, 27], где  $N^\chi$  и  $D^\chi$  — определители схем, в которых элемент  $\chi \rightarrow \infty$ ;  $N_\chi$  и  $D_\chi$  — определители схем, в которых  $\chi \rightarrow 0$ . Отношение  $N_\chi/D_\chi = S_0$  является функцией номинального коэффициента передачи при нулевом значении параметра  $\chi$ . Для получения дробных выражений ССФ относительно параметров  $n$  элементов можно использовать формулу (9) [26].

Формирование функции передачи ЛЭЦ в дробной форме с помощью выражений (7)–(9) позволяет учесть влияние технологического разброса параметров элементов на номинальный коэффициент передачи, если допуски моделировать дополнительными элементами на схеме замещения [13]. Так, допуск на пассивные двухполюсники может быть задан либо сопротивлением с параметром  $\delta(R_i)$  или источником напряжения, управляемым током, включенными последовательно с исследуемым резистором, либо проводимостью с параметром  $\delta(g_i)$  или ИТУН, включенными параллельно. Аналогично определяются допуски реактивных элементов, представленных эквивалентными сопротивлениями и проводимостями. Допуски активных четырехполюсников моделируются с помощью УИ.

Для нахождения допуска  $i$ -го элемента  $\delta(\chi)$  и определения влияния допуска  $i$ -го элемента на мультипликативную погрешность  $\gamma_i$  электрической цепи предлагаются следующие выражения [26]

$$\delta(\chi_i) = \frac{\gamma N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)}}{N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} - N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} (\gamma_i + 1)}, \quad (10) \quad \gamma_i = \frac{\delta(\chi_i) (N_{\delta(\chi_i)}^{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} - N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)}^{\delta(\chi_i)})}{\delta(\chi_i) N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)}^{\delta(\chi_i)} + N_{\delta(\chi_i)} D_{\delta(\chi_i)} \delta(\chi_i)} \quad (11)$$

Из формулы (11) выводим выражение для определения влияния на погрешность преобразования цепи допусков  $n$  элементов:

$$\begin{aligned} \gamma_{(1,2,\dots,n)} = & \left[ \delta(\chi_1) \left( N_{\delta(\chi_2,\dots,n)}^{\delta(\chi_1)} D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} - N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} D_{\delta(\chi_2,\dots,n)}^{\delta(\chi_1)} \right) + \dots + \delta(\chi_n) \left( N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n-1})}^{\delta(\chi_n)} D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n-1})} - \right. \right. \\ & \left. \left. - N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n-1})}^{\delta(\chi_n)} \right) + \delta(\chi_1 \chi_2) \left( N_{\delta(\chi_{3,\dots,n})}^{\delta(\chi_{1,2})} D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} - N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} D_{\delta(\chi_{3,\dots,n})}^{\delta(\chi_{1,2})} \right) + \dots + \right. \\ & \left. + \delta(\chi_1 \chi_2 \dots \chi_n) \left( N_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})}^{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} - N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})}^{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} \right) \right] / \\ & \left[ N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} \left( \delta(\chi_1) D_{\delta(\chi_2,\dots,n)}^{\delta(\chi_1)} + \dots + \delta(\chi_n) D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n-1})}^{\delta(\chi_n)} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \delta(\chi_1 \chi_2) D_{\delta(\chi_{3,\dots,n})}^{\delta(\chi_{1,2})} + \dots + \delta(\chi_1 \chi_2 \dots \chi_n) D_{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})}^{\delta(\chi_{(1,2,\dots,n)})} + D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})} \right) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

Отметим, что значения определителей  $N_{\delta(\chi)}$  и  $D_{\delta(\chi)}$  в полученных формулах (10)–(11), а также  $N_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})}$  и  $D_{\delta(\chi_{1,2,\dots,n})}$  в (12) остаются неизменными и находятся при

расчете номинального коэффициента передачи. Следовательно, применение предложенных выражений для параметрического синтеза и оптимизации параметров элементов ЛЭЦ по заданному значению погрешности преобразования, а также для определения значений допусков, позволяет уменьшить число необходимых операций расчета [20, 26].

Для автоматизации процесса допускового анализа разработана программа Toleralize [42] (авторы – С.Б. Емельянов, А.И. Забродина, А.М. Кузнецов, А.Ю. Тюрина).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Применение схемно-алгебраического аппарата МСО для решения задач структурного синтеза и допускового анализа ЛЭЦ обеспечило реализацию цели диссертации достижением следующих результатов:

1. Разработана прямая методика восстановления ЛЭЦ по заданной ССФ, без применения промежуточных математических моделей. Предложенная методика может применяться при создании схем электрических моделей неэлектрических (механических, тепловых и т.д.) систем. Разработан рекурсивный алгоритм восстановления схем по заданной ССФ, который реализован в программе SymSin, предназначенной для расширения классов эквивалентных схем ЛЭЦ.

2. Предложенная методика построения схемы по заданной ССФ была обобщена на ПСФ. В отличие от классических методов схемной реализации, разработанный алгоритм структурного синтеза на основе ПСФ, позволяет использовать произвольную активную элементную базу и обеспечивает порождение всех возможных схем, инвариантных к заданной ПСФ произвольного вида. Предусмотрена возможность исключения нетехнологичных схемных решений непосредственно в процессе синтеза. На основе предложенной методики разработана программа структурного синтеза InterSym.

3. Разработан метод, позволяющий осуществить изоморфный переход от структурных схем ЛЭЦ к схемам на транскондуктивных усилителях. Метод позволяет реализовать известные структурные схемы на новом технологическом уровне и обеспечивает сохранение качеств и характеристик исходных структур без применения условий согласования параметров (условий настройки). Алгоритм транскондуктивной реализации реализован в программе SchemeConverter.

4. Решена задача допускового анализа ЛЭЦ на основе схемного подхода. Предложены схемно-алгебраические формулы для получения аналитических выражений погрешностей преобразования ЛЭЦ и допусков произвольных элементов. Для автоматизированного получения результатов по предложенным формулам, разработана программа Toleralize.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:



### **Монографии и учебные пособия**

1. Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В. Анализ и структурный синтез электрических цепей методом схемных определителей: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 240 с.
2. Горшков К. С., Филаретов В. В. Схемный подход Вильгельма Фойснера и метод схемных определителей / под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск, УлГТУ, 2009. – 189 с.
3. Березуев Р.И., Горшков К.С., Филаретов В.В. Схемное отображение системы уравнений на транскондуктивных усилителях / (Волгин Л.И., Королев Ф.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраический анализ и топологические преобразования моделей электронных цепей / Под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 356 с.). – С. 76–81.
4. Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В. Структурный синтез электрических цепей по их символьным схемным функциям / (Волгин Л.И., Королев Ф.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраический анализ и топологические преобразования моделей электронных цепей / Под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 356 с.). – С. 151–175.
5. Горшков К.С., Филаретов В.В. Реализация структурных схем электрических цепей на основе транскондуктивных усилителей / (Волгин Л.И., Королев Ф.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраический анализ и топологические преобразования моделей электронных цепей / Под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 356 с.). – С. 292–296.
6. Березуев Р.И., Горшков К.С., Королев Ф.А., Филаретов В.В. SCAD – система символьного анализа и диагностики линейных электронных цепей / (Волгин Л.И., Королев Ф.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраический анализ и топологические преобразования моделей электронных цепей / Под ред. В.В. Филаретова. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 356 с.). – С. 297–335.

### **Статьи (журналы и сборники)**

7. Горшков К.С., Филаретов В.В. Реализация структурных схем электрических цепей на основе транскондуктивных усилителей // **Электричество.**– 2009.– №1.– С. 32–40.
8. Filaretov V., Gorshkov K. Transconductance Realization of Block-diagrams of Electronic Networks // Proc. of International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES'08).– Krakow, Poland.– 2008.– P. 261–264.
9. Горшков К.С., Филаретов В.В. Структурная оптимизация электронных схем переключением активных элементов // **Электроника и связь: Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии».** – Киев, 2009.– С. 141–146.
10. Горшков К.С., Филаретов В.В. Алгоритм оптимального синтеза линейных электронных цепей на основе полиномиальных схемных функций // **Электроника и связь: Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии».** – Киев, 2010.– №4. – С. 45–50.
11. Горшков К.С., Филаретов В.В. Обобщение символьного метода анализа Миддлбука для расчета допусков электрических цепей // **Электроника и связь:**

Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – Киев, 2010. – №5. – С. 60–64.

12. Волгин Л. И., Горшков К. С., Филаретов В. В. Реализация структурных схем высокостабильных усилительных устройств на базе транскондуктивных усилителей // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей: Тр. международ. конф. КЛИН–2006. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т. 3. – С. 28–37.

13. Горшков К. С., Чижиков В.Д. Автоматизированное проектирование высокочастотных узлов на основе схемотехнического моделирования // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей: Тр. международ. конф. КЛИН–2006. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т.3. – С.37–43.

14. Горшков К.С., Токарев Ю.В. Реконструкция полных, цепных и лестничных схем на основе формул схемных определителей // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т. 3. – С. 39–48.

15. Березуев Р.И., Горшков К.С., Филаретов В.В. Схемное отображение системы уравнений на транскондуктивных усилителях // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т. 3. – С. 11–18.

16. Волгин Л.И., Горшков К.С., Филаретов В.В. Алгоритм транскондуктивной реализации структурных схем высокоточных усилительных устройств с аддитивной коррекцией погрешности // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т. 3. – С. 18–24.

17. Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В. Генерация электрических схем, инвариантных к характеристическому уравнению // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т.3. – С.48–52.

18. Горшков К.С., Статенина Ю.А., Филаретов В.В., Устинова Е.А. Friedrich Wilhelm Feussner und die Methode der Schemadeterminanten. // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей. Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т.3. – С.207–222.

19. Горшков К.С. Символьные и матрично-численные методы моделирования электронных цепей: противостояние и взаимодополнение // Схемно-алгебраические модели активных электрических цепей Тр. международ. конф. КЛИН–2007. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Т.3. – С.234–245.

20. Горшков К.С., Заболотнов С.А. Применение алгоритма интерпретации символьных алгебраических выражений для построения амплитудно- и фазочастотных характеристик электрических цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С.19–26.

21. Горшков К.С., Стенюшкин Д.И. Алгоритм и программа транскондуктивной реализации электронных цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С. 26–34.

22. Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В. Генерация патентоспособных схемных решений с помощью программы структурного синтеза SymSin // Синтез,

анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Вып. 6. – С. 34–40.

23. Горшков К.С., Токарев Ю.В., Филаретов В.В. Исключение изоморфных структур при структурном синтезе электронных схем по их символьным схемным функциям // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С. 40–46.

24. Горшков К.С., Филаретов В.В. Установление изоморфизма ненаправленных и ориентированных графов на основе распределения показателей участия их ребер и дуг // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С. 56–72.

25. Filaretov V.V., Gorshkov K.S. A method of realization of block-diagrams of electronic networks based on transconductance amplifiers // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – Вып. 6. – С. 265–273.

26. Горшков К.С., Филаретов В.В. Схемно-алгебраические формулы для погрешности преобразования и допусков электрических цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – Вып. 7. – С. 101–112.

27. Горшков К.С., Филаретов В.В. Формирование дробных символьных выражений для схемных функций электрических цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – Вып. 7. – С. 136–149.

28. Горшков К.С., Филаретов В.В. Жизнь и деятельность Вильгельма Фойснера, основоположника схемного подхода к анализу цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – Вып. 7. – С. 200–216.

29. Горшков К.С. Структурный синтез электрических цепей на основе полиномиальных функций методом схемных определителей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международ. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – Вып. 7. – С. 3–17.

#### **Тезисы докладов**

30. Бидзан О.Б., Горшков К.С. Расчёт экономической эффективности системы SCAD // Тез. Докл. 41 НТК «Вузовская наука в современных условиях», УлГТУ, 29.01.–03.02.07.

31. Горшков К.С., Токарев Ю.В. Разработка алгоритма синтеза схем на основе символьного выражения схемного определителя // Тез. Докл. 41 НТК «Вузовская наука в современных условиях», УлГТУ, 29.01.–03.02.07.

32. Горшков К.С., Чебаков С.Н. Модификация интерфейса системы анализа и диагностики электронных цепей SCAD // Тез. Докл. 41 НТК «Вузовская наука в современных условиях», УлГТУ, 29.01.–03.02.07.

33. Горшков К.С., Стенюшкин Д.И. SyGraph – программа формирования передаточных функций структурных схем методом графа Мейсона // Тез. Докл. 42 НТК «Вузовская наука в современных условиях», УлГТУ, 28.01.–02.02.07.

34. Горшков К.С., Заболотнов С.А. Разработка эффективного алгоритма интерпретации символьных алгебраических выражений // Тез. Докл. 42 НТК «Вузовская наука в современных условиях», УлГТУ, 28.01.–02.02.07.

### **Программы (зарегистрированные в ОФАП)**

35. Горшков К.С., Токарев Ю.В. SymSin – программа для восстановления электрических схем с двухполюсными элементами на основе символьного выражения схемного определителя.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФАП 9588.– 2007.

36. Горшков К.С., Заболотнов С.А., Романов Л.В., Стенюшкин Д.И. GraphiX – программа для построения амплитудно- и фазо-частотных характеристик электрических цепей.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– № ОФАП.– 2007.

37. Горшков К.С., Стенюшкин Д.И. SyGraph – программа для формирования символьных выражений передаточных функций сигнальных графов Мейсона.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– № ОФАП.– 2007.

38. Горшков К.С., Заболотнов С.А. ASP – программа для распознавания и вычисления значений арифметических выражений в пространстве комплексных чисел. – М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– № ОФАП. – 2007.

39. Горшков К.С., Токарев Ю.В. InterSyn – программа для интерактивного синтеза электрических схем методом подключения дополнительного элемента.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФАП 11894.– 2008.

40. Горшков К.С., Стенюшкин Д.И. SchemeConverter – программа для генерации схем транскондуктивной реализации усилительных устройств.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФАП 11893.– 2008.

41. Горшков К.С., Лагунков О.А., Петров А.С., Разумков М.Ю. Switcher – программа структурного синтеза электрических цепей, инвариантных относительно схемной функции.– М.: ОФЭРНиО Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФЭРНиО 00211; №ГР 50200900971.– 11.09.2009.

42. Горшков К.С., Емельянов С.Б., Забродина А.И., Кузнецов А.М., Тюрина А.Ю. Toleralize – программа для определения мультипликативной погрешности преобразования линейных электрических цепей и допусков на элементы.– М.: ОФЭРНиО Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФЭРНиО 00214; №ГР 50200900973.– 11.09.2009.

### **Список основных сокращений**

ИНУН	Источник напряжения, управляемый напряжением
ИНУТ	Источник напряжения, управляемый током
ИТУН	Источник тока, управляемый напряжением
ИТУТ	Источник тока, управляемый током
ЛЭЦ	Линейная электрическая цепь
МСО	Метод схемных определителей
ССФ	Символьная схемная функция
УИ	Управляемый источник