

На правах рукописи

**КУРГАНОВ Сергей Александрович**

**СИМВОЛЬНЫЙ АНАЛИЗ  
И ДИАКОПТИКА  
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (ГОУ ВПО «УлГТУ»).

Научный консультант: доктор технических наук  
Филаретов Владимир Валентинович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Башарин Сергей Артемьевич;

доктор технических наук, профессор  
Филин Владимир Алексеевич;

доктор технических наук, профессор  
Шакиров Мансур Акмелович.

Ведущая организация: ФГУП НПО «Марс» (г. Ульяновск).

Защита состоится 29 сентября 2006 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ГОУ ВПО «СПбГПУ») по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ . . . . . “ . . . . . 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент

Н. М. Журавлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Символьные схемно-топологические методы (СТМ) не требуют как формирования уравнений линейных электрических цепей (ЛЭЦ), так и перехода к отображающему графу. Традиционный интерес к этим методам обусловлен рядом задач, которые решаются только с помощью СТМ. Это задачи существования схемных реализаций, параметров многополюсников и задачи диагностируемости ЛЭЦ. При этом «схемные преобразования являются первичными, а алгебраические процедуры – вторичными» [М.А.Шакиров.–1980,1984]. Это позволило СТМ схемных определителей стать универсальным инструментом для доказательства и уточнения топологических преобразований активных цепей [Л.И.Волгин, В.В.Филаретов.–2003, 2004].

Символьные методы исследования ЛЭЦ обладают существенными преимуществами по сравнению с численными методами, поскольку аналитические выражения: 1) обеспечивают совмещение «компактности и полноты информации» [К.С.Демирчян, П.А.Бутырин.–1988]; 2) «понятны самому широкому кругу специалистов и легко проверяются соответствующими экспертизами» [П.А.Бутырин, М.Е.Алпатов.–2002]; 3) позволяют наглядно представить функционирование цепи, провести эффективно многовариантный анализ и параметрический синтез цепи [А.А.Ланнэ и др.–1982]; 4) дают возможность исследовать общие свойства цепей [Л.В.Данилов, П.Н.Матханов, Е.Филиппов.–1990; С.А.Башарин, В.В.Федоров.–2004]; 5) позволяют определить параметрические границы разрешимости задач анализа и диагностики ЛЭЦ, исследовать устойчивость схемных реализаций цепей [Ю.И.Лыпарь.–2004]; 6) дают возможность получить точное значение отклика цепи в виде обыкновенной дроби, что особенно важно для плохо обусловленных цепей [Я.К.Трохименко.–2002] и оценки точности численных методов [А.Д.Артым, В.А.Филин, К.Ж.Есполов.–2001]; 7) методически более наглядны и доступны [П.А.Ионкин, В.Г.Миронов.–1976]. Для совмещения достоинств различных символьных и численных методов предложена концепция многометодных систем [Р.В.Дмитришин.–1996].

СТМ используются, прежде всего, для анализа линейных цепей. Для анализа нелинейных цепей они могут быть адаптированы на основе численно-аналитических методов [Ю.А.Бычков, С.В.Щербаков.–2002] и символьных передаточных функций [M.Iordache, L.Dumitriu, L.Mandache.–2003], [2, 3, 7, 8]. Для структурного синтеза ЛЭЦ применяются элементы СТМ, например, схемные миноры (многополюсники с подключенными нуллорами) [А.В.Бондаренко.–1977].

Актуальность темы подтверждается регулярно проводящимся международным семинаром «Символьные методы и их приложения к схемотехническому проектированию» (SMACD), материалами международных симпозиумов по цепям и системам (ISCAS), Средне-западных симпозиумов по цепям и системам (MWSCAS), Европейской конференции по теории цепей и проектированию (ECCTD). На важность темы указывает и тот факт, что в

последнее время все известные математические компьютерные системы были оснащены символьными блоками. «В наше время показателем интеллектуальной мощи компьютеров стали новейшие программные системы символьной математики или компьютерной алгебры» [В.П. Дьяконов.– 1998].

Символьные методы обладают преимуществами не только при анализе, но и при диагностике электрических цепей, которая является в настоящее время наиболее востребованным разделом теории цепей в практике эксплуатации и проектирования электро- и радиотехнических средств [К.С.Демурчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин.– 2004]. До сих пор параметрическая диагностика (задача определения параметров элементов) развивалась преимущественно на матрично-численной базе в работах К.С.Демурчяна, Н.В.Киншита, П.А.Бутырина и др. В то же время символьная параметрическая диагностика ЛЭЦ находится в начальной стадии развития и представлена отдельными публикациями [G.Fedi, S.Manetti, M.C.Piccirilli, J.Starzyk.– 1999; F.Constantinescu, C.V.Marin, M.Nitescu, D.Marin.– 2003].

Несмотря на существенные достоинства аналитических формул и пристальное внимание к символьной математике, СТМ пока не получили широкого применения. Это объясняется, во многом, их несовершенством:

1. Для построения выражений откликов цепей с произвольным числом независимых источников СТМ используются в сочетании с методом наложения (основанным на принципе наложения источников воздействия), что приводит к необходимости поиска множества схемных функций (СФ) при нахождении лишь одного отклика и препятствует получению экономичных по вычислительной сложности выражений для числителей откликов.

2. Символьные диакоптические (делением схемы на части) методы не позволяют делить схему на подсхемы оптимальным образом (пополам и по минимальному числу узлов) и использовать общее для схем числителя и знаменателя сечение, что препятствует получению компактных выражений и приводит к росту вычислительных затрат. Известные диакоптические СТМ ориентированы на анализ электронных цепей, содержащих, как правило, подсхемы с 3...5-ю полюсами, и не учитывают специфику электрических систем и сетей, имеющих подсхемы с большим числом (6 и более) полюсов.

3. Использование СТМ для решения задач диагностики ЛЭЦ обычно ограничивается поиском неисправностей, хотя не менее важной задачей является определение параметров элементов. Разработка эффективных методов параметрической диагностики сдерживается несовершенством существующих СТМ анализа ЛЭЦ. Кроме того, было бы целесообразным развивать оба эти раздела теории ЛЭЦ на основе одного математического аппарата.

Целью диссертационной работы является разработка новых *теоретических положений*, повышающих эффективность (экономичность по вычислительным затратам) символьного топологического анализа сложных линейных электрических цепей с произвольными многополюсными подсхемами, и обеспечивающих реализацию параметрической диагностики и расчет режимов электрических сетей.

Для достижения поставленной цели решаются задачи:

– обеспечения *компактной свертки* и *сокращения объема аналитических выкладок* при построении символьных выражений откликов и искомых параметров (в диагностике) для цепей с произвольным числом независимых источников (НИ) с помощью *неявного метода наложения (НМН)* ;

– повышения эффективности (снижения вычислительных затрат) диакоптического анализа путем разработки *метода выделения типовых многополюсников и подсхем*, выбора наилучшего и общего для числителя и знаменателя сечения с помощью *метода неравновесных схемных миноров*;

– диакоптического анализа цепей с многополюсными (6 полюсов и более) элементами и подсхемами путем кардинального сокращения числа необходимых сечений схемы (с помощью *НМН* и *метода схемно-алгебраической редукции*) и числа слагаемых в диакоптических формулах;

– символьной топологической (без уравнений) диагностики на основе предлагаемого *принципа косвенной компенсации* элементов с неизвестными параметрами с использованием направленного нумерованного нуллора.

Методы исследования. В работе использовались теория ЛЭЦ и аппарат схемных определителей. Для обоснования отдельных положений применялись матричная алгебра, теория элементарных функций, элементы комбинаторики.

Научная новизна основных результатов работы состоит в том, что в диссертации предложены:

1) *неявный метод наложения*, отличающийся от традиционного метода наложения возможностью построения выражения для отклика цепи с произвольным числом НИ с помощью только одной схемной функции вместо множества СФ по методу наложения;

2) *метод выделения независимых источников*, который в отличие от известного метода выделения параметров обеспечивает произвольное выделение параметров НИ и позволяет построить выражение отклика цепи с любым числом источников в виде отношения двух схемных определителей (вместо множества определителей);

3) *метод схемно-алгебраического выделения типовых многополюсников и подсхем*, который исключает повторяющиеся операции выделения двухполюсных ветвей и управляемых источников (УИ) в отличие от известного метода выделения элементов, а также позволяет сформировать *единую схемно-алгебраическую формулу (САФ)* для числителя и знаменателя;

4) метод выделения параметров (МВП) в *координатных базисах зарядов или магнитных потоков*, отличающийся от известного МВП в традиционном базисе напряжений и токов возможностью анализа цепей с переключаемыми конденсаторами и магнитных цепей непосредственно в исходном базисе – без излишнего преобразования параметров элементов;

5) диакоптический метод *неравновесных схемных миноров (НСМ)*, который отличается от известного метода схемных миноров возможностью использовать подсхемы с управляющими связями между ними, а, следовательно,

возможностью применять наилучшее (половинное и по наименьшему числу узлу) и общее для схем числителя и знаменателя сечение;

6) *метод схемно-алгебраической редукции*, отличающийся от метода матричной редукции отсутствием избыточности выражений и от схемной редукции возможностью использовать подсхемы произвольной сложности;

7) *принцип косвенной компенсации элементов с неизвестными параметрами* на базе ориентированного нумерованного нуллора, позволяющий в отличие от известного принципа компенсации на основе традиционного нуллора решить задачу символьной топологической диагностики и сформулировать *топологические условия диагностируемости ЛЭЦ*;

8) *компенсационные топологические методы* решения задачи диагностики на основе *прямой, косвенной и смешанной компенсации* с использованием УИ, позволяющие построить выражения для искомых параметров элементов с помощью только двух схемных определителей в отличие от множества определителей при использовании НИ.

#### Практическая значимость основных результатов.

1. Решена с помощью *неявного метода наложения* задача компактной свертки символьных выражений цепей с произвольным числом независимых источников, что позволяет получить символьные выражения откликов, экономичные по вычислительным затратам.

2. Сокращено многократно время диакоптического анализа электрических цепей с произвольным числом независимых источников за счет уменьшения с помощью *неявного метода наложения* числа внешних полюсов у подсхем (а, следовательно, числа слагаемых в диакоптических формулах) и сокращения числа сечений пропорционально числу независимых источников.

3. Уменьшено время анализа и увеличена компактность символьных формул произвольных линейных цепей за счет многократного применения готовых *схемно-алгебраических формул выделения многополюсников*, в которых сгруппированы слагаемые и выделены общие множители, а также за счет использования *наилучшего* (пополам и по минимальному числу узлов) и *общего для числителя и знаменателя сечения*.

4. Решена задача символьного анализа электрических цепей, делимых на подсхемы с большим числом полюсов (6 и более), в том числе электрических сетей и систем, за счет применения *диакоптического метода схемно-алгебраической редукции* и *неявного метода наложения*, сокращающих многократно (по сравнению с методом схемных миноров и традиционным методом наложения) число слагаемых в диакоптических формулах.

5. Предложено топологическое (без составления уравнений) решение линейной задачи символьной параметрической диагностики. При этом получают экономичные по количеству вычислительных операций выражения для искомых параметров. *Топологические условия диагностируемости ЛЭЦ* предназначены для выявления структурных вырождений схемы без построения уравнений.

6. Использование единого схемно-алгебраического аппарата (в основе которого лежат элементарные топологические преобразования – удаление и стягивание ветвей) как для символьного анализа, так и для диагностики упрощает освоение и использование предлагаемых методов, повышает эффективность их программной реализации.

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 компьютерных программах анализа и диагностики ЛЭЦ – *CIRSYMD*, *REDSYM*, *CIRMUL*, разработанных *В.В. Филаретовым* и входящих в систему *SCAD* (автор графического интерфейса – *Р.И.Березуев*, численного интерпретатора символических выражений – *Д.В.Шеин*) [48], которая снабжена подробным руководством и распространяется через Интернет-сайт <http://www.berezuev.hotbox.ru/SCAD.zip>.

Разработанные методы анализа и диагностики ЛЭЦ использованы: 1) в лаборатории световолоконной техники *Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники РАН (УФ ИПЭ РАН)* при анализе шумовых эквивалентных схем биполярных транзисторов; 2) в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*) для формирования символических выражений линейных цепей, а также реакций слабо нелинейных цепей, формируемых итерационной процедурой Пикара; 3) в Пензенском государственном университете для формирования символических выражений электрических фильтров, усилителей и преобразователей; 4) в ОАО «Татэнерго» (г. Казань) для анализа и диагностики электрических сетей и разработки плана их модернизации; 5) в ЗАО «Завод крупнопанельного домостроения № 1» (г. Ульяновск) для анализа, диагностики и оптимизации нагревательных сетей монолитных участков бетона.

Система *SCAD* внедрена в научные исследования и учебный процесс *Ченстоховского политехнического института* (Польша), в инженерную практику расчета отдельных узлов разрабатываемой в *УФ ИПЭ РАН* электронной аппаратуры. Символьный процессор программы *CIRSYMD* использован путем включения его в состав системы анализа электрических цепей *FASTMEAN* ([www.fastmean.ru](http://www.fastmean.ru)), разработанной в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций.

Апробация работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных конференциях «Проблемы нелинейной электротехники» (Киев, 1981, 1988), «Проблемы преобразовательной техники» (Киев, 1983, 1991), «Математическое моделирование в энергетике» (Киев, 1990), «Теория и методы расчета нелинейных цепей и систем» (Ташкент, 1982), «Радиотехнические измерения» (Новосибирск, 1984), на международных конференциях «Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий»

(Москва–Сочи, 1999), «Континуальные логико-алгебраические исчисления и нейроматематика в науке, технике и экономике (КЛИН)» (Ульяновск, 2001–2005), на Всероссийских конференциях по надежности в Пензе и Саратове (1994), информационным технологиям в Самаре, Казани, Тамбове (1995), Нижнем Новгороде (1996) и Ульяновске (1997), энергосбережению (Ульяновск, 1999–2001, 2003), радиотехническим системам (Ульяновск, 2001); на кафедре ТОЭ СПбГПУ (2005) и кафедре ТОЭ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2005).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации представлены в 50 работах (из них 6 статей в журнале РАН «Электричество»).

Личный вклад автора в работы (в соавторстве), где изложены положения, выносимые на защиту. В публикациях [11,14] диссертантом предложена идея о расчете цепей в однородных базисах зарядов или магнитных потоков. Работы [36, 40, 44, 46, 49] опубликованы совместно с научным консультантом В.В.Филаретовым. Результаты, изложенные в этих работах и выносимые на защиту, получены лично автором диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и библиографического списка, содержащего 334 наименования. Текстовая часть изложена на 306 страницах (иллюстраций 98, таблиц 19). В приложении на 8 страницах размещаются документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы.

**Первый раздел** «Аналитический обзор состояния символьного анализа, диакоптики и диагностики линейных электрических цепей» посвящен обоснованию и формулировке основных задач диссертационной работы.

Символьный анализ ЛЭЦ состоит в формировании выражения для отклика. Эта задача решается с помощью традиционного метода наложения [Л.В.Бессонов.– 2002], основанного на одноименном принципе, согласно которому отклик (напряжение или ток  $j$ -й ветви) записывается в канонической (явной) форме относительно воздействий

$$O_j = \sum_{i=1}^n F_{ji} X_i, \quad (1)$$

где  $X_i$  – напряжение или ток  $i$ -го соответствующего источника воздействия (всего  $n$  источников);  $F_{ji}$  – схемная (передаточная от ветви  $i$  к  $j$ ) функция; все переменные в комплексной (операторной) форме.

Метод наложения требует для любого отклика нахождения  $n$  числителей, что препятствует построению выражения СФ по критерию минимума вычислительной сложности. В то же время именно вычислительная сложность служит критерием оценки современных методов и программ символьного анализа [С.–J. Richard Shi, Xiang-Dong Tan.– 2000; R.Dmytryshyn, A.Kubaszek.– 2002]. Как следствие, метод наложения не позволяет минимизировать



количество формирующих операций, поскольку требует нахождения несколько раз одних и тех же повторяющихся сомножителей в различных СФ, многократного увеличения временных затрат на комбинаторные операции при выборе подсхем и т. д.

Поэтому необходимо разработать метод, который позволил бы формировать отклик цепи с произвольным числом источников с помощью только одной схемной функции. В отличие от метода наложения он должен обеспечивать произвольное выделение параметров независимых источников, как и других параметров схемы, обеспечивая реализацию правил оптимальной свертки (факторизации) алгебраических выражений [М.А.Бреуер.–1969] и схемных определителей [В.В.Филаретов.– 1995] не только для знаменателей, но и для числителей откликов или искоемых параметров (в задаче диагностики). Свертывание выражений через «вынесение общего множителя за скобку...предпочтительно по соображениям точности вычисляемого результата» [Н.С.Васильев.–1991]. «Точность программ обычно находится в прямой зависимости от числа проведенных численных операций, требуемых для получения результата», при этом «операции умножения и деления увеличивают ошибку вычисления в большей степени, чем операции сложения и вычитания» [Д.К.Фидлер, К.Найтингейл.–1985]. Свертывание выражений целесообразно и в случае использования для мультипликативных операций увеличенной (по сравнению с аддитивными операциями) разрядной сетки.

Однако современные математические компьютерные системы оснащены символьными блоками, которые предназначены для свертки алгебраических выражений без учета их соответствия структуре графа или схемы. Поэтому формируемые такими системами для задач теории ЛЭЦ символьные выражения во много раз сложнее, чем оптимальные выражения схемных определителей [R.Dmytryshyn.– 1998]. В табл. 1 дано сравнение показателей сложности символьных определителей (для полных цепей, элементы которых заданы проводимостями), полученных с помощью системы Maple (версия 9.5 2004г.) и программы GRAF, разработанной Д.В.Шеиным [В.В.Филаретов, Д.В.Шеин.– 1993, 1994] по методу выделения проводимостей.

Таблица 1. Сравнение вычислительной сложности определителей по GRAF и Maple

Число узлов/ветвей	4/6		5/10		6/15		7/21	
	*	+	*	+	*	+	*	+
GRAF, $k_c$	8	11	29	50	122	237	617	1259
Maple, $k_m$	12	15	75	114	678	1194	7765	15514
$k_m/k_c$	1,50	1,36	2,29	2,28	5,56	5,04	12,6	12,3

Учитывая изложенное, отметим, что компактную свертку символьных выражений и сокращение аналитических выкладок для откликов цепей с произвольным числом независимых источников можно обеспечить схемно-топологическими методами, предусматривающими нахождение отклика с помощью только одной схемной функции и обеспечивающими произвольное

выделение параметров независимых источников. Разработку таких методов отнесем к *первой задаче диссертационной работы*.

Анализ сложных электрических цепей с помощью СТМ невозможен без деления их на части. Вместе с тем формирование экономичных по вычислительной сложности выражений СФ требует деления схемы пополам по минимальному числу узлов. Это необходимо для обеспечения минимального числа слагаемых в диакоптических формулах (см. вторую строку табл. 2) и наиболее компактных выражений откликов [J.A.Starzyk, A.Konczykowska.– 1986; S.M. Chang, G.M. Wirzba.– 1994; В.В.Филаретов.– 2001]. Препятствует этому наличие в схеме числителя управляющей связи между входом и выходом [J.Braun.–1966], поскольку сечение схемы по управляющим связям считается крайне нежелательным [Г.Крон.–1978], а в известных СТМ невозможным. Кроме этого наличие управляющей связи между входом и выходом не позволяет использовать общее сечение для схем числителя и знаменателя, что увеличивает затраты на комбинаторные операции по поиску сечений.

Другая сложность диакоптического анализа проявляется при увеличении числа узлов  $u$  подсхем, что особенно характерно для многофазных электротехнических и электроэнергетических систем, в схемах которых присутствует большое количество источников и многополюсников (многофазных линий передачи, генераторов, трансформаторов). Так, подсхемы трехфазных электрических систем содержат обычно 6...10 полюсов. Это приводит к резкому увеличению числа слагаемых в диакоптических формулах (строка 2 в табл. 2).

Таблица 2. Число миноров и передаточных параметров для неавтономных подсхем

Число полюсов	3	4	5	6	7	8	9	10
Число миноров	6	20	70	252	924	3432	12870	48620
Число передаточных параметров	4	9	16	25	36	49	64	81

Многokратное уменьшение числа слагаемых в диакоптических формулах (строка 3 табл. 2) может дать применение редукции внутренних узлов подсхем [В.П.Сигорский.–1963], которая использует системы передаточных параметров  $Y$ ,  $Z$ ,  $H$ ,  $F$ ,  $A$  и  $B$  [В.П.Попов.–2000]. Эти системы параметров широко используются в численных диакоптических методах на основе многополюсников [Г.Т.Адоцу.–1965] и эквивалентных многомерных генераторов [М.А.Шакиров.–1980, 2001]. Редукция расширенной матрицы узловых проводимостей и представление СФ в виде последовательности выражений обеспечивает символьный анализ интегральных схем в тысячи узлов и элементов [М.М.Hassoun, P.M.Lin.–1995]. Однако матричное представление схемы обладает избыточностью [А.Б.Новгородцев.–1995], увеличивая вычислительные затраты.

Для решения поставленных выше задач топологического формирования символьных выражений для откликов и искомым параметрам требуется базовый схемно-топологический метод анализа активных ЛЭЦ. В качестве такого метода целесообразно использовать метод схемных определителей (МСО) [В.В.Филаретов.– 1996, 1998, 2001] на основе направленного нумерованного нуллора [J.Braun.–1965]. МСО обеспечивает формирование СФ в свернутом виде, использует в качестве рабочего объекта непосредственно схему замещения электрической цепи. Формируемые с помощью МСО выражения не содержат взаимно уничтожающихся слагаемых (дубликаций) и дробных подвыражений. Этот метод не имеет ограничений на элементный состав, допуская одновременное включение в схему z- и y-элементов, управляемых источников всех типов, идеальных операционных усилителей, независимых источников напряжения и тока. Минимизация объема выкладок достигается за счет применения топологических правил вырождения производных схем [М. М. Milic.– 1974; Н.Д. Fischer.– 1975; Т. Ozawa.– 1976] и нейтрализации элементов.

В то же время МСО не дает возможности выделять многополюсники и подсхемы, что увеличивает вычислительные затраты за счет поэлементного выделения повторяющихся фрагментов схем. Кроме этого, МСО был изначально предназначен для использования в базисе напряжений и токов, а для анализа, например, дискретно-аналоговых схем с переключаемыми конденсаторами требуется координатный базис напряжений и зарядов.

Таким образом, *второй задачей диссертационной работы* является создание *эффективных символьных диакоптических методов* анализа цепей с многополюсными подсхемами, в том числе электрических систем, путем многократного сокращения числа слагаемых в диакоптических формулах, обеспечения оптимального (половинного и по минимальному числу узлов) деления цепи на подсхемы независимо от наличия управляющих связей между ними, применения общего сечения для схем числителя и знаменателя, а также обобщения МСО на многополюсники как в традиционном базисе токов и напряжений, так и в базисах зарядов и магнитных потоков.

Диагностика ЛЭЦ сводится к двум задачам – поиску дефекта и определению параметров элементов. Поиск дефекта выполняется численными [С.А. Башарин.–1997], численно-аналитическими [О.И. Архангельский, Л.А. Мироновский.– 1995], символьными [Т. Wei, М. W. T. Wong, Y.S. Lee.– 1999; G.Fedi, A.Luchetta, S.Manetti, M.C.Piccirili.– 2000] и алгебро-семантическими [И.А. Головинский.–2005] методами, а также аппаратными средствами [Б.Л. Перельман, В.Г. Сидоров.–1979], [4,5]. Задача определения параметров элементов разработана значительно слабее. Она состоит, как правило, в численном решении линейных [П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская.– 2000, 2001], [25] или нелинейных [Дж. У. Бэндлер, А.Э. Салама.– 1985] уравнений, когда число точек проверки существенно меньше числа искомым параметров.

Символьная параметрическая диагностика ЛЭЦ, которая позволяет получить искомым параметр элемента в виде символьного выражения, содержащего известные параметры элементов, а также измеренные токи и

напряжения, сводится к аналитическому решению тех же линейных или нелинейных уравнений. Так, в линейной задаче диагностики выражения для сопротивления и емкости изоляции сети получены путем решения уравнений по методу контурных токов [А.А.Наволочный.– 2002]. Системы уравнений используются и для получения параметров линейных двухполюсных цепей [В.Ю.Кнеллер, Л.П.Боровских.– 1986; Б.В.Цыпин.– 2002]. В нелинейной задаче диагностики численно-аналитические выражения применяются для аппроксимации зависимостей нулей и полюсов ЛЭЦ от параметров искомым элементов [F.Constantinescu, C.V.Marin, M.Nitescu, D.Marin.– 2003]. Таким образом, в настоящее время не имеется схемно-топологической методологии для параметрической диагностики.

Представляет интерес топологическое (без составления уравнений) решение базисной задачи диагностики, которая является «удобной отправной точкой для построения более сложных моделей диагностики электрических цепей» [Н.В.Киниш, Г.Н.Герасимова, М.А.Кац.– 1983]. Достаточное условие разрешимости базисной задачи сводится к ненулевому определителю гибридной тополого-параметрической матрицы. Разрешимость задачи при минимальном количестве наблюдаемых ветвей связана с задачей суммы и пересечения матроидов [А.А.Гришкевич.– 2002].

Однако применить топологические методы непосредственно к исходной диагностируемой цепи невозможно, поскольку параметры некоторых элементов неизвестны. Задача диагностики может быть преобразована к задаче анализа путем компенсации элементов с неизвестными параметрами. Если напряжение или ток измерены на таких элементах, то эти элементы могут быть эквивалентно замещены источниками напряжения или тока по теореме о компенсации [Pomey.– 1919, В.И. Коваленков.– 1923; П.А. Азбукин.– 1924], такая компенсация называется здесь прямой. Если элементы не доступны для измерений, то в этом случае применяется компенсация, называемая *косвенной*. *Косвенная компенсация* с помощью независимых источников и идеальных усилителей – обычных нуллов [B.D.H.Tellegen.– 1954] – применяется для диагностики на основе систем уравнений [Н.В.Киниш, Г.Н.Герасимова, М.А.Кац.– 1983; S.L.Farchy, E.D.Gadzheva, L.H.Raykovska, T.G.Koujomdjiev.– 1995]. Однако обычный нуллов не приспособлен для применения топологических методов. Поэтому необходимо путем перехода от обычного нуллора к направленному нумерованному нуллору [J.Braun.–1965] *обобщить принцип косвенной компенсации для символьной топологической диагностики ЛЭЦ*, в чем и будет заключаться **третья задача** диссертации.

**Во втором разделе** диссертационной работы «Неявный метод наложения и символьный анализ линейных электрических цепей» решается **первая задача** диссертации – предлагается *неявный метод наложения* воздействий, позволяющий построить отклик цепи с произвольным числом независимых источников на основе только одной СФ, с меньшим объемом аналитических выкладок и в более компактном виде по сравнению с традиционным методом наложения.

Неявный метод наложения (НМН) [2,7,37,39,41–44,48–50]. Согласно *неявному методу наложения* отклик ЛЭЦ является неявной алгебраической суммой частных откликов ЛЭЦ при воздействии каждого из источников в отдельности и представляется в виде дробно-рационального выражения неканонического вида. *НМН* в отличие от традиционного метода наложения не накладывает никаких ограничений на вид формируемой функции числителя.

*НМН* реализуется с помощью преобразования независимых источников в управляемые источники. Преобразование выполняется на основе опорного источника, в качестве которого выбирается собственный источник цепи [37,44] или дополнительный единичный источник [37,39,44]. Реализации *НМН* различаются формой представления символьного выражения, трудоемкостью усвоения и применения.

Неявный метод наложения на основе собственного опорного источника [37,44]. Идея метода заключается в том, что один из независимых источников цепи используется в качестве опорного источника. Остальные независимые источники заменяются источниками, управляемыми соответствующей переменной опорного источника. Эквивалентность такого преобразования схемы доказывается соответствующей теоремой [44]. Таким образом, символьное выражение отклика может быть записано с помощью одной СФ

$$O_j = \frac{V_j(X_1/X_0, X_2/X_0, \dots, X_n/X_0)}{D} X_0, \quad (2)$$

где  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$  – параметры независимых источников, причем источник с параметром  $X_0$  выбран в качестве опорного источника. Решение в виде (2) существует и оно единственно, если определитель схемы  $D$  отличен от нуля.

Неявный метод наложения на основе единичного источника [37,44]. *Неявный метод на основе собственного опорного источника* прост в использовании, поскольку не изменяет структуры цепи и основан на стандартных операциях МСО. Однако при символьном задании параметра опорного источника, числитель не будет являться целой рациональной функцией, что может усложнить аналитическое исследование выражения отклика. Можно избежать этого, если ввести в схему единичный опорный источник напряжения (тока), а все независимые источники преобразовать в источники, управляемые напряжением (током) единичного источника. В этом случае любой отклик  $O_j$  в схеме представляется *одной СФ от единичного источника* к приемнику отклика. Этот отклик получается из (2) при  $X_0=1$ .

Сформулируем теорему о замене независимых источников *единичным опорным источником ЭДС*.

**Теорема 1.** Если в произвольной ЛЭЦ на рис. 1,а, определитель которой не равен нулю, ввести последовательно с некоторым источником ЭДС, например,  $\underline{E}_1$  дополнительный опорный источник ЭДС  $\underline{E}=1$ , а все независимые источники схемы заменить на УИ, управляемые напряжением опорного источника  $\underline{U}=\underline{E}=1$ , с параметрами (см. рис. 1,б)

$$k_1 = \frac{\underline{E}_1 - 1}{\underline{U}} = \frac{\underline{E}_1 - 1}{1}; k_l = \frac{\underline{E}_l}{\underline{U}} = \frac{\underline{E}_l}{1}; y_j = \frac{\underline{J}_j}{\underline{U}} = \frac{\underline{J}_j}{1}, \quad (3)$$

где  $l=2,3, \dots,n$ ;  $j=1,2, \dots,s$ ;  $k_1, k_l, y_j$  – коэффициенты передачи напряжения и передаточная проводимость соответственно, то напряжения и токи в любой ветви схемы не изменятся; подчеркиванием здесь и далее обозначаются комплексные переменные. В числителе выражения  $k_1$  от переменной  $\underline{E}_1$  вычитается единица для компенсации дополнительного источника  $\underline{E}=1$ .

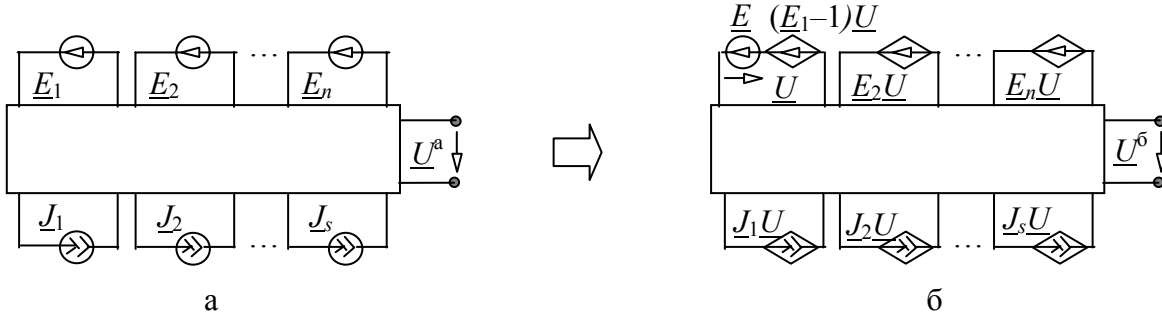


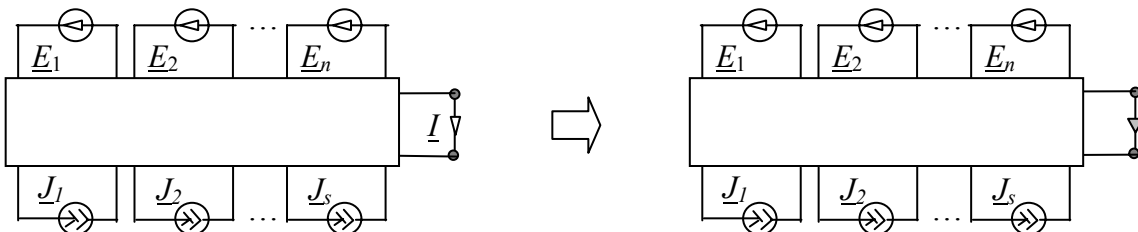
Рис. 1

Следствиями теоремы 1 являются САФ для искомого напряжения или тока, содержащие одну СФ от единичного источника к соответствующему приемнику. Например,

$$\underline{U}^a = \underline{U}^b = K_{UE=1} \cdot 1 = \frac{N_{KUE=1}}{D} = \left| \begin{array}{c} (E_1-1)U \\ \rightarrow U \quad E_2U \quad \dots \quad E_nU \\ \hline J_1U \quad J_2U \quad \dots \quad J_sU \end{array} \right|, \quad (4)$$

где  $K_{UE=1}$  – коэффициент передачи напряжения от единичного опорного источника  $\underline{E}$  к приемнику напряжения  $\underline{U}^b$ ;  $N_{KUE=1}$  – числитель коэффициента  $K_{UE=1}$ ; нуллятор изображен укрупненной заштрихованной стрелкой, а норатор – двойной стрелкой;  $D$  – определитель схемы знаменателя, которая получается из схемы на рис. 1,а путем нейтрализации всех независимых источников;  $|\cdot|$  – схемный определитель.

Метод выделения независимых источников [37,44]. НМН на основе *единичного опорного источника* требует введения в схему дополнительного источника. Предлагаемый *метод выделения независимых источников* позволяет формировать отклики в виде отношения целых рациональных выражений неканонического типа, используя непосредственно исходную схему. В то же время этот метод требует введения *понятия определителя схемы с независимыми источниками* и операций *выделения параметра независимого источника*. Схема числителя (рис. 2,б) в этом случае получается заменой в исходной схеме на рис.2,а приемника тока (напряжения) нуллатером.



Схемно-алгебраическая формула для искомого тока имеет вид

$$\underline{I} = \left| \begin{array}{c} \begin{array}{c} \leftarrow \text{---} \leftarrow \text{---} \leftarrow \\ \underline{E}_1 \quad \dots \quad \underline{E}_{n-1} \quad \underline{E}_n \\ \text{---} \end{array} \\ \text{---} \\ \begin{array}{c} \rightarrow \text{---} \rightarrow \text{---} \rightarrow \\ \underline{J}_1 \quad \dots \quad \underline{J}_{s-1} \quad \underline{J}_s \\ \text{---} \end{array} \end{array} \right| \Bigg/ D, \quad (5)$$

где источники  $\underline{E}_2, \underline{E}_3, \dots, \underline{E}_{n-2}$  и  $\underline{J}_2, \underline{J}_3, \dots, \underline{J}_{s-2}$  не показаны.

Предлагаемая формула выделения источника ЭДС, например  $\underline{E}_n$ , имеет вид

$$\Delta = \underline{E}_n \Delta(\underline{E}_n \rightarrow \text{норатор}; E, J = 0) + \Delta(\underline{E}_n = 0), \quad (6)$$

где  $\Delta(\underline{E}_n \rightarrow \text{норатор}; E, J = 0)$  – определитель схемы, получаемой из схемы числителя (5) путем замены источника ЭДС  $\underline{E}_n$  на норатор и нейтрализации всех остальных независимых источников;  $\Delta(\underline{E}_n = 0)$  – определитель схемы, получаемой из схемы числителя (5) в результате нейтрализации источника  $\underline{E}_n$ .

Запишем формулу (6) в схемно-алгебраическом виде

$$\Delta = \underline{E}_n \left| \begin{array}{c} \text{---} \quad \dots \quad \text{---} \quad \rightarrow \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \leftarrow \text{---} \leftarrow \text{---} \leftarrow \\ \underline{E}_1 \quad \dots \quad \underline{E}_{n-1} \\ \text{---} \\ \rightarrow \text{---} \rightarrow \text{---} \rightarrow \\ \underline{J}_1 \quad \dots \quad \underline{J}_{s-1} \quad \underline{J}_s \\ \text{---} \end{array} \right|. \quad (7)$$

Формулы выделения для независимого источника тока аналогичны (6) и (7). Все эти формулы доказываются с помощью *неявного метода наложения*.

Применение *НМН* и *метода выделения независимых источников* сокращает объем аналитических выкладок при нахождении отклика *в число раз, равное приблизительно числу независимых источников*. Это обеспечивается вследствие сокращения числа определителей в числителе до одного единственного и исключения многократного формирования общих повторяющихся многочленов. При соблюдении правил оптимальной свертки схемных определителей получаются выражения, отличающиеся *меньшей вычислительной сложностью* по сравнению с методом наложения.

Эффективность *НМН* по сравнению с традиционным методом наложения (МН) для анализа электрических и электронных схем подтверждается исследованием выражений [44], сформированных программой *CIRSYM* [42] (см. табл. 3). Строки табл. 3 соответствуют рассматриваемым электроэнергетическим сетям и системам: 1) однофазной пятиузловой сети, содержащей источники тока и источники ЭДС [В.А.Веников.–1981]; 2)

однофазной пятиузловой сети с двумя трансформаторами и задающими токами в узлах [Н.А.Мельников.– 1966]; 3) трехфазной сети с двумя нагрузками – треугольником и звездой сопротивлений и с учетом взаимоиндуктивностей между линейными проводами; 4) несимметричной трехфазной системе [М.А.Шакиров.–2003], содержащей синхронный генератор (СГ), трансформатор, линейные провода с взаимоиндуктивностями и нагрузку в виде звезды сопротивлений; 5) энергосистеме, содержащей 22 узла, 7 генераторных, 24 сетевых и 7 нагрузочных элементов [Г.Т. Адоңу.– 1965]; 6) несимметричной трехфазной системе, содержащей два СГ, два трансформатора, линейные провода с взаимоиндуктивностями и нагрузку в виде звезды сопротивлений.

Таблица 3. Показатели сложности символьных выражений откликов для некоторых электрических сетей и систем

№	Схема замещения	Количество умножений				Количество сложений и вычитаний			
		в числителе			в знаменателе	в числителе			в знаменателе
		МН	НМН	Эконом. раз		МН	НМН	Эконом. раз	
1	однофазной пятиузловой сети	22	7	3,1	2	20	13	1,5	5
2	однофазной девятиузловой сети	34	20	1,7	25	12	11	1,1	14
3	трехфазной сети с двумя нагрузками	45	30	1,5	40	76	53	1,4	52
4	трехфазной системы с одним СГ	471	368	1,3	412	200	285	1,4	293
5	энергосистемы с 7-ю ЭДС	500	293	1,7	133	404	272	1,5	149
6	трехфазной системы с двумя СГ	10372	8166	1,3	5514	4791	4125	1,2	3339

Как видно из табл. 3, *НМН сокращает* по сравнению с методом наложения число трудоемких операций умножения в числителе в 1,3...3,1 раза при одновременном уменьшении числа сложений. Это значительное сокращение вычислительных затрат, особенно при многовариантном анализе.

Однако главное достоинство *неявного метода наложения* состоит в том, что при его использовании *уменьшается число полюсов у подсхем*, поскольку множество независимых источников заменяется одним источником, причем с заземленным полюсом. Сокращение числа внешних полюсов подсхемы на  $(2m-1)$  полюсов ( $m$  – число независимых источников в подсхеме) *приводит к уменьшению количества слагаемых в диакотических формулах в десятки-сотни раз* (см. строку 2 табл. 2). Кроме этого, *НМН сокращает число схемных определителей в числителе отклика и, следовательно, число сечений и количество комбинаторных операций на их поиск, пропорционально числу*



независимых источников и тем самым *снижает во много раз временные затраты* символьного диакоптического анализа. Эти вопросы подробно рассмотрены в третьем разделе диссертации.

**В третьем разделе** диссертационной работы «Схемно-алгебраический анализ электрических цепей делением их на части» решена **вторая задача** диссертации – разработаны диакоптические методы, позволяющие существенно улучшить вычислительные характеристики схемно-топологических методов и тем самым рассчитать схемы, делимые на подсхемы с числом полюсов 6 и более, что дает *возможность провести символьный анализ многофазных электрических систем и сетей*, которые в символьном виде до сих пор не рассчитывались. При этом рассматриваются три типа символьных выражений: 1) единые дробно-рациональные формулы; 2) последовательные формулы (ПФ), состоящие из подвыражений без операций деления; 3) ПФ из подвыражений с операциями деления.

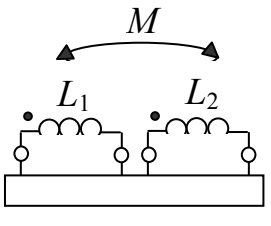
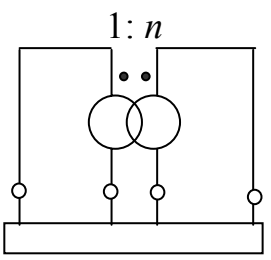
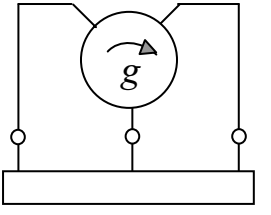
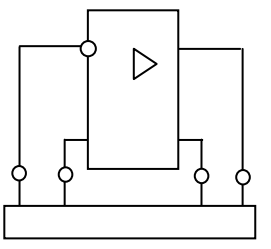
Диакоптическое формирование единых дробно-рациональных выражений. Для совершенствования этого направления: 1) предложен *метод выделения многополюсников и типовых каскадов* [36,37,45]; 2) разработан *метод выделения элементов в нетрадиционных системах координат* зарядов и магнитных потоков [11,14–22,36–38]; 3) метод схемных миноров *обобщен* на основе предложенных *неравновесных схемных миноров* на цепи, содержащие подсхемы с управляющими связями между ними, чтобы обеспечить оптимальное (половинное) деление схемы для формирования наиболее компактного выражения, а также использовать общее сечение для схем числителя и знаменателя [36,46,48]; 4) предложен *комбинированный явно- неявный метод* наложения, использующий как традиционный метод наложения, так и *неявный метод наложения* воздействий, позволяющий обеспечить оптимальное деление схем с независимыми источниками [44,48,50].

Метод выделения многополюсников [31,36,37,45,47,50]. На основе предложенных *схемно-алгебраических формул выделения многополюсников* МСО распространен на электрические блок-схемы. Обобщенный МСО использует понятие *определятеля блок-схемы*, алгебраически тождественного известному понятию определителя соответствующей схемы замещения. Различие между определителями состоит в методах их формирования, в структуре получаемых функций и количестве аналитических операций.

Для формирования определителей электрических блок-схем предлагается применять *схемно-алгебраические формулы выделения параметров многополюсников*. В табл. 4 приведены для примера САФ некоторых многополюсных схемных элементов. Эти и другие САФ получаются с помощью схем замещения соответствующих многополюсников [36,37,47].

Таблица 4. Примеры САФ выделения многополюсников

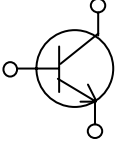
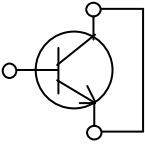
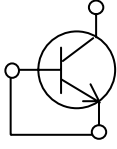
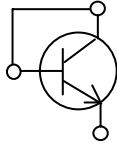
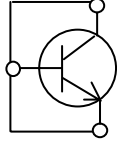
№	Левая часть САФ	Правая часть САФ
1		Взаимоиндуктивность

		$p^2 (L_1 L_2 - M^2) \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  +$ $+ pM \left( \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  \right) +$ $+ pL_1 \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  +$ $+ pL_2 \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right $
2	<p style="text-align: center;">Идеальный трансформатор</p> 	$n^2 \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + n \left( \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + \right.$ $\left. \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  \right) + \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right $
3	<p style="text-align: center;">Идеальный гиратор</p> 	$g^2 \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right $ $+ g \left( \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  \right)$
4	<p style="text-align: center;">Операционный усилитель с коэффициентом усиления <math>K_{Oy}</math> и выходной проводимостью <math>Y_{вых}</math></p> 	$K_{Oy} Y_{вых} \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  +$ $+ Y_{вых} \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right  + \left  \begin{array}{c} \circ \quad \circ \quad \circ \quad \circ \\ \hline \end{array} \right $

Наряду со *схемно-алгебраическими формулами* в методе выделения *многополюсников* используются *определители их элементарных схем*, то есть схем, содержащих один многополюсник, полюсы которого в различной комбинации разомкнуты, замкнуты или соединены между собой через норатор и нуллятор. В табл. 5 даны также для примера *определители элементарных схем* низкочастотного биполярного транзистора с *h-параметрами* ( $\Delta_{Hэ} = h_{11э} h_{22э} - h_{12э} h_{21э}$ ) в схеме с общим эмиттером.

Таблица 5. Определители элементарных схем биполярного транзистора

№	1	2	3	4	5
---	---	---	---	---	---

Схема					
$\Delta$	$h_{22э}$	1	$\Delta_{Hэ}$	$\Delta_{Hэ} - h_{12э} + h_{21э} + 1$	$h_{11э}$

*Метод выделения многополюсников* позволяет сократить число операций для формирования СФ и откликов, поскольку использует уже готовые формулы для целых фрагментов схем. Метод дает возможность сформировать более компактные выражения, поскольку в САФ сгруппированы слагаемые. Наиболее компактная (в 2...3 и более раз) свертка выражений достигается при учете одинаковых параметров, которые характерны как для интегральных схем, так и для электрических трехфазных систем, содержащих симметричные подсхемы с одинаковыми элементами.

Метод выделения элементов в компонентных базисах зарядов и магнитных потоков [11,13–22,36,37,38,50]. САФ многополюсников и определители элементарных схем электрокомпонентов, аналогичные формулам в табл. 4 и 5, предназначены для работы с блок-схемами в координатах напряжений и токов. Однако схемы некоторых классов цепей проще характеризуются не в традиционных координатах токов и напряжений, а в других, альтернативных координатах, например, цепи с переключаемыми конденсаторами – в координатах напряжений и зарядов [11,15,18], магнитные цепи – в координатах токов и магнитных потоков [14,19–22].

Для исследования таких цепей предложены схемно-символьные методы анализа и диагностики в координатах зарядов или магнитных потоков. Это избавляет от излишних схем замещения и позволяет формулировать соответствующие методы анализа непосредственно в исходных координатах.

В силу взаимного соответствия заряда и тока формулы выделения параметров в базисе заряда и напряжения могут быть получены из формул выделения параметров в базисе тока и напряжения путем соответствующей замены параметров. Например, формулы выделения емкости  $C$  и эластанса  $S$  (величины, обратной к  $C$ ) имеют соответственно вид

$$\Delta = C\Delta_C + \Delta^C \quad \text{и} \quad \Delta = S\Delta^S + \Delta_S, \quad (8)$$

где  $\Delta$  – определитель схемы; верхние (нижние) индексы означают, что в схеме удалены (стянуты) соответствующие элементы.

Формулы для выделения параметров источников заряда и источников, управляемых зарядом, получаются путем обобщения формулы выделения УИ в координатах напряжения и тока [R.Hashemian.–1977; В.В.Филаретов.– 1998]

$$\Delta = \chi\Delta(\chi \rightarrow N) + \Delta(\chi = 0), \quad (9)$$

где  $\chi$  – параметр УИ, например, для источника напряжения, управляемого зарядом, параметр  $\chi$  является передаточным эластансом;  $\Delta(\chi \rightarrow N)$  – определитель производной схемы, в которой УИ заменен на нулор;  $\Delta(\chi = 0)$  – определитель производной схемы, в которой УИ нейтрализован. Нейтрализация

элементов УИ проводится согласно их физическому содержанию: источник заряда (напряжения) удаляется (стягивается), приемник заряда (напряжения) стягивается (удаляется).

Предлагаемая формула для выделения ключа имеет вид

$$\Delta = \alpha\Delta_{\alpha} + \underline{\alpha}\Delta^{\alpha}, \quad (10)$$

где верхний (нижний) индекс  $\alpha$  означает удаление (стягивание) ключа. Ключ характеризуется переключательной функцией  $\alpha(t)$ , причем  $\alpha(t_3)=1$ , если в момент времени  $t_3$  ключ замкнут и  $\alpha(t_p)=0$ , если ключ в момент времени  $t_p$  разомкнут. Инверсная функция  $\underline{\alpha}$  принимает противоположные значения.

Метод выделения параметров в базисе зарядов позволяет получать при символьном анализе схем с переключаемыми конденсаторами более экономичные выражения и без избыточных (нулевых) слагаемых, которые имеют место в расширенном узловом базисе [В.Г.Миронов.–2003].

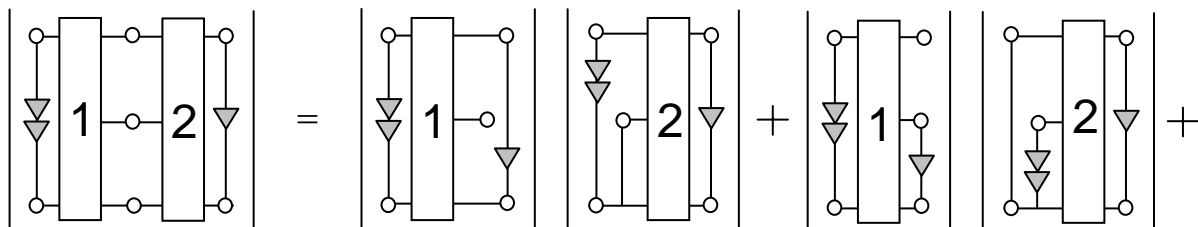
Метод неравновесных схемных миноров (НСМ) [36,43,46]. Для обеспечения возможности деления цепи на подсхемы с управляющими связями между ними, вводятся неравновесные схемные миноры, которые в отличие от известных (назовем их равновесными) схемных миноров [В.В.Филаретов.–2001], содержат различное (на число управляющих связей) количество нораторов и нуллаторов. Это позволяет получить диакоптическую формулу для произвольной цепи, разделенной по любому числу узлов на подсхемы с управляющими связями между ними.

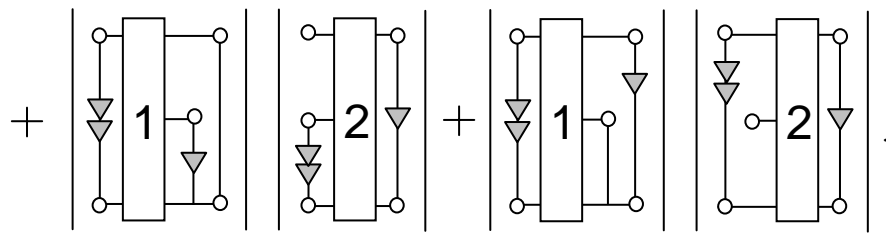
Число слагаемых (миноров) этой формулы меньше числа слагаемых при таком же делении этой цепи на подсхемы при отсутствии управляющих связей на 10...50 % (см. табл. 6, где  $n+1$  – число узлов подсхемы), что противоречит известному положению о нежелательности управляющих связей между подсхемами [Г.Крон.– 1972]. В случае схемно-символьного анализа даже выгодно делить цепь на подсхемы с управляющими связями между ними.

Таблица 6. Сравнение числа равновесных  $v_{n+1}$  и неравновесных  $\psi_{n+1}$  схемных миноров

$n+1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$v_{n+1}$	2	6	20	70	252	924	3432	12870	48620
$\psi_{n+1}$	1	4	15	56	210	792	3003	11440	43758
$\frac{\psi_{n+1}}{v_{n+1}} 100\%$	50,0	67,0	75,0	80,0	83,0	86,0	87,5	89,0	90,0

Применение неравновесных схемных миноров особенно эффективно для деления схемы числителя, поскольку вход и выход у нее всегда связаны управляющей связью и одновременно разнесены обычно в разные части схемы. К примеру, САФ для схемы числителя, делимой по трем узлам, имеет вид





Из табл. 7 видно, что с помощью *неравновесных схемных миноров* получается диакоптическая формула с числом слагаемых в 4,2 ... 6 раз меньше, чем при таком же делении схемы с помощью равновесных схемных миноров, возможном при введении дополнительного нуллора и узла. Такое сокращение числа слагаемых объясняется наличием большого количества нулевых сомножителей при использовании равновесных схемных миноров.

Таблица 7. Сравнение числа слагаемых в декомпозиционных формулах (для числителя), полученных на основе равновесных  $\nu$  и неравновесных  $\psi$  схемных миноров

$n+1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{V_{n+2}}{\psi_{n+1}} 100\%$	6,00	5,00	4,70	4,50	4,40	4,33	4,29	4,25	4,22

Важным достоинством предлагаемого *метода неравновесных схемных миноров* является возможность использования *общего сечения для схем числителя и знаменателя*. При этом число комбинаторных операций по поиску сечений сокращается на число сочетаний  $C_q^m$ , где  $q$  – общее число узлов цепи, а  $m$  – число узлов сечения. Значительная экономия затрат объясняется преобладающими затратами (на порядок) на поиск первоначального сечения схемы по сравнению с остальными. Вычислительные эксперименты (использовался компьютер с процессором 1.1 ГГц и оперативной памятью 128 Мбайт) с программой *CIRSYMD*, реализующей *метод общего сечения*, подтверждают ожидаемую экономию (см. табл. 8).

В качестве примеров анализа *методом неравновесных схемных миноров* рассматриваются: 1) активный полосовой фильтр (АПФ) [J.A.Starzyk, A.Konczykowska.– 1986]; 2) избирательный усилитель (ИУ) [Э.А.Лаксберг.– 1973]; 3) операционный усилитель (ОУ)  $\mu A741$ , а также типичная контурная сеть [Г.Крон.–1978], изоморфная арматурным каркасам железобетонных конструкций [Ш.Н.Хусаинов.– 1998] (см. четвертую и пятую строки табл. 8). Показатели сложности первых трех схем приведены в табл. 9. Как видно, время построения СФ уменьшается в 1,7... 4,8 раза при использовании общего для числителя и знаменателя сечения.

Таблица 8. Использование общего сечения при разложении числителя и знаменателя СФ

№	Схема	Время при разных сечениях	Время при едином сечении	Экономия, раз
1	АПФ	2,4 с	0,49 с	4,8

2	ИУ	64 с	19 с	3,2
3	ОУ $\mu A741$	42 с	24 с	1,8
4	Сеть (28 узлов)	50 с	29 с	1,7
5	Сеть (38 узлов)	3 мин. 29 с	1 мин. 40 с	2,1

Последовательные выражения, состоящие из подвыражений без операций деления [36,43,44]. При получении такого типа выражений для цепей с несколькими независимыми источниками предлагается использовать метод иерархического объединения подсхем по методу схемных миноров в сочетании с *НМН*. *НМН* сокращает число полюсов у подсхем и тем самым уменьшает многократно (строка 2 в табл. 2) число слагаемых в диакоптической формуле. При этом уменьшается число комбинаторных операций по поиску сечений.

Диакоптические формулы по методу как равновесных, так и *неравновесных* схемных миноров усложняются с увеличением числа полюсов подсхемы по комбинаторному закону (табл. 2 и 6). Однако разработанный в этом разделе *метод схемно-алгебраической редукции* обеспечивает многократное сокращение числа параметров подсхемы и, следовательно, числа слагаемых в диакоптических формулах.

Метод схемно-алгебраической редукции [33,36,43,49] использует для описания неавтономных многополюсников системы передаточных параметров:  $Y, Z, H, F, A$  и  $B$ . Для устранения избыточности матричного представления, предложено использовать редукцию не на основе матриц, а на основе *САФ многополюсников и элементарных схем многополюсников* [31,33,36]. Это позволило распространить метод редукции на произвольные линейные элементы и избежать появления одинаковых слагаемых с противоположными знаками. *Схемно-алгебраическая редукция* выполняется иерархически путем попарного объединения подсхем до получения трехполюсника или многополюсника, содержащего только внешние полюсы исходной схемы. По его передаточным параметрам записывается искомая передаточная функция или отклик, которые имеют вид последовательности выражений с операциями деления. Порядок иерархического объединения подсхем устанавливается по правилу наименьшего количества полюсов получаемого многополюсника [Р.В.Дмитришин, Ю.И.Шаповалов.– 1975, 1978]. При этом сложность используемых подсхем произвольная. В то время как известные методы схемной [Э.А.Лаксберг.–1990] и символьно-полиномиальной [Р.В.Дмитришин.– 1985] редукции предусматривают единовременное исключение подсхем сложностью не более одного узла или контура.

Метод схемно-алгебраической редукции предлагается использовать в сочетании с *НМН* [37,44,50]. Это позволяет для получения отклика сократить число формируемых СФ пропорционально числу независимых источников. Если независимые источники имеются в нескольких подсхемах, то для анализа такой схемы следует применять *комбинированный явно-неявный метод наложения* воздействий. Этот метод состоит в том, что для каждой из подсхем в отдельности используется *НМН*, при этом число независимых источников в каждой подсхеме сокращается до одного заземленного источника и

множественно в соответствии с табл. 2 уменьшается число параметров подсхемы. Для схемы в целом используется традиционный метод наложения, но уже для схемы с количеством источников, сокращенным до числа автономных подсхем. До этого же числа сокращается количество необходимых схемных определителей. При этом уменьшается пропорционально числу схемных определителей количество сечений и соответственно сокращаются комбинаторные затраты на их поиск. Таким образом, при использовании *явно- неявного метода наложения* вычислительные затраты на формирование числителя уменьшаются в число раз, равное приблизительно отношению общего количества независимых источников к числу автономных подсхем.

В табл. 9 приведены результаты тестирования программы *REDSYM*, реализующей *метод схемно-алгебраической редукции*. Для сравнения взяты результаты программы *SECIRSYM*, в которой реализован метод объединения подсхем на основе схемных миноров. В качестве тестовых схем используются три первых схемы из табл. 8 и электроэнергетическая система (ЭС) [К.Ф.Вагнер, Р.Д.Эванс.–1936] с четырьмя синхронными генераторами и трехфазными трансформаторами, а также двумя трехпроводными линиями, в которой исследуется произвольный несимметричный режим. Сложность схем характеризуется количеством содержащихся в них двухполюсных элементов (ДЭ), УИ или нуллов  $N$  и числом полюсов  $u$  подсхем: 3...4, 3...5, 3...4 и 6...8 для АПФ, ИУ, ОУ и ЭС соответственно.

Таблица 9. Сравнение вычислительной эффективности диакоптических методов

№	Схема	Сложность схемы		Метод схемных миноров [В.В.Филаретов.–2001]				Метод схемно- алгебраической редукции, 2005			
		ДЭ	УИ ( $N$ )	* /	+ –	=	t	* /	+ –	=	t, с
1	АПФ	44	(13)	266 1	156 97	116	23с	79 26	34 26	85	21
2	ИУ	84	9	3327 36	2363 558	647	28с	1326 264	1022 257	341	11
3	ОУ $\mu A741$	191	26	1882 116	2240 98	642	20с	1329 620	1417 138	808	12
4	ЭС	32	54	110324 4	62664 42645	22118	2ч	13984 1033	9086 2721	1197	54

Для частного варианта указанной энергетической системы с одинаковыми параметрами для всех фаз получено в симметричных и фазных координатах символьное и точное численное значение (в виде обыкновенной дроби  $2836565360640/1979147843$  А) тока короткого замыкания одной из фаз.

В табл. 10 приведено число полюсов  $u$  подсхем и количество деревьев для контурных сетей [Г. Крон.– 1978], как показатель сложности схемы, и количество умножений, как показатель сложности выражений, полученных с помощью программы *REDSYM*. Как видно, сложность выражений по *методу*

*схемно-алгебраической редукции* увеличивается медленнее, чем топологическая сложность схем, что обеспечивает анализ схем с многополюсными подсхемами.

Таблица 10. Сравнение числа деревьев контурных сетей и числа умножений в символьных выражениях

№сети	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Число узлов	9	16	25	36	49	64	81	100	121	144	200
Число ветвей	12	24	40	60	84	112	144	180	220	264	370
Число контуров	4	9	16	25	36	49	64	81	100	121	171
Число полюсов у подсхем	–	5	6	7	8	9	10	11	12	13	11
Число деревьев	192	$1.0 \cdot 10^5$	$5.6 \cdot 10^8$	$3.2 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{27}$	$8.3 \cdot 10^{33}$	$5.7 \cdot 10^{42}$	$4.0 \cdot 10^{52}$	$3.0 \cdot 10^{63}$	$2.9 \cdot 10^{89}$
Число умножений	24	193	$1.9 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	$4.9 \cdot 10^5$	$8.7 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^6$	$4.8 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^5$

При исследовании точности численных расчетов [50] рассмотрен кварцевый фильтр со схемой замещения 14-го порядка, характеризующейся плохой численной обусловленностью [Р.В. Дмитришин.–1980]. Для коэффициента передачи этого фильтра сформированы 12 символьных функций, которые расположены ниже по возрастанию числа трудоемких мультипликативных операций: 1) дробно-рациональная функция (ДРФ) по методу *неравновесных схемных миноров (МНСМ)* с подвыражениями по методу *схемно-алгебраической редукции (МСАР)* [36,46,49]; 2) последовательная формула (ПФ) по МСАР [36,49]; 3) ПФ по методу блочного Гауссова исключения [Дж.Ортега.–1991, М.М. Hassoun, Р.М. Lin.– 1995]; 4) ПФ по методу эквивалентного многомерного генератора ЭДС (ЭМГЭ) с использованием переноса 2-го рода [М.А. Шакиров.–1980,2001]; 5) ПФ по методу редукции узлов [Р.В. Дмитришин.–1980]; 6) ПФ с одной операцией деления по методу схемных миноров (МСМ) [В.В. Филаретов.–2001]; 7) ПФ по методу исключения Гаусса; 8) свернутая ДРФ по МНСМ [36,46]; 9) единая ДРФ по МСМ; 10) ДРФ, числитель и знаменатель которой сгруппированы по Горнеру; 11) каноническая ДРФ и 12) развернутая ДРФ – отношение развернутых полиномов. Их характеристики приведены в табл. 11.

Таблица 11. Количество вычислительных операций в различных символьных выражениях передаточной функции кварцевого фильтра



№	Операции→ Функции↓	*	*	/	+	-	=
1	<i>Комбинированная ДРФ по МСАР и НСМ</i>	60	43	17	43	0	14
2	<i>ПФ по МСАР</i>	75	58	17	50	1	39
3	ПФ по методу блочного Гауссова исключения	83	59	24	22	11	42
4	ПФ по методу ЭМГЭ	94	50	44	30	32	68
5	ПФ по методу редукции узлов	102	72	30	34	0	54
6	ПФ с одной операцией деления	117	116	1	84	0	27
7	Последовательная функция по методу Гаусса	121	81	40	22	31	111
8	Единая свернутая ДРФ по МНСМ	279	278	1	96	0	1
9	Единая свернутая ДРФ по МСМ	310	309	1	106	2	1
10	Групповая ДРФ	13130	13129	1	6432	0	1
11	Каноническая ДРФ	13435	13434	1	6432	0	1
12	Развернутая ДРФ	96057	96056	1	6432	0	1

В табл. 12 приведено число верных (совпадающих) разрядов в численных значениях (получены с помощью системы Maple) комплексной АЧХ при частоте номинального максимума.

Таблица 12. Количество верных разрядов в численных результатах передаточной функции кварцевого фильтра

№ символьной функции по табл. 11	Число (доля в %) верных знаков при различных разрядных сетках			
	60	30	18	8
1	57 (95)	26 (87)	14 (78)	5 (63)
2	57 (95)	27 (90)	14 (78)	5 (63)
3, 4	57 (95)	26 (87)	15 (83)	5 (63)
5	56 (93)	26 (87)	15 (83)	4 (50)
6	57 (95)	26 (87)	15 (83)	5 (63)
7	57 (95)	26 (87)	14 (78)	5 (63)
8, 9	54 (90)	24 (80)	11 (61)	1 (13)
10, 11	45 (75)	15 (50)	3 (17)	0 (0)
12	45 (75)	14 (47)	1 (5,6)	0 (0)

Как видно из табл. 12, *комбинированная ДРФ и ПФ по МСАР* обеспечивают высокую точность результата (от 63 до 95 % верных знаков в зависимости от разрядной сетки) при вычислительных затратах в 1,4... 2 раза меньших (табл. 11), чем у известных формул. *Выигрыш по времени* от применения *МСАР* *растет многократно* (в 100 и более раз) при увеличении числа независимых источников и числа полюсов у подсхем (табл. 9).

**В четвертом разделе** «Символьная диагностика линейных электрических цепей методом компенсации электрокомпонентов» решена **третья задача** диссертации: 1) *принцип косвенной компенсации* обобщен для топологических методов [26,28,32,41]; 2) задача символьной диагностики переведена с помощью *обобщенного принципа компенсации* на общую с анализом схемно-

символьную базу [32,37]; 3) предложены компактные САФ в виде отношения двух определителей независимо от числа независимых источников и измеренных откликов [32,37,50]; 3) разработаны символьные компенсационные методы диагностики, дающие возможность получить экономичные по числу операций выражения для искомых параметров [32,37,41,50]; 5) сформулированы топологические условия диагностируемости ЛЭЦ [32,40].

Для компенсации элементов с неизвестными параметрами предлагается использовать прямую, косвенную и смешанную компенсацию. Косвенная компенсация обобщена соискателем для решения задачи символьной топологической диагностики [32]. Предлагаемая смешанная компенсация предусматривает использование как прямой, так и косвенной компенсации. В соответствии с перечисленными способами компенсации символьные компенсационные методы подразделяются на методы прямой, косвенной и смешанной компенсации. Каждый из этих методов заключается в переходе от исходной диагностируемой цепи к схеме с компенсированными элементами (СКЭ) и формированию по ней выражений параметров.

Метод прямой компенсации на основе НМН [37,44,50]. Предлагаемый метод, в отличие от метода прямой компенсации на основе традиционного принципа наложения, позволяет получить компактные и экономичные по сложности выражения для искомых параметров.

Метод косвенной компенсации [32,34,37] основан на следующей теореме.

**Теорема 2.** В невырожденной цепи любой двухполюсный элемент  $s$  – сопротивление  $Z_s$ , проводимость  $Y_s$ , генераторы УИ всех четырех типов, независимые источники ЭДС  $E_s$  или тока  $J_s$  – может быть скомпенсирован путем замены его норатором при одновременной фиксации на другой произвольной наблюдаемой ветви  $f$  измеренного на ней напряжения  $U_f$  с помощью включенного параллельно этой наблюдаемой ветви фиксирующей ветви по напряжению.

Фиксирующая ветвь по напряжению представляет собой последовательное соединение независимого источника ЭДС  $E^C=U$  и нуллатора. Ток  $I$  фиксируется включением в разрыв соответствующей ветви фиксирующей ветви по току – параллельного соединения независимого источника тока  $J^C=I$  и нуллатора.

Предложенные СКЭ на основе направленного нумерованного взвешенного нуллора, в отличие от СКЭ на основе обычного, ненаправленного, нуллора [Н.В.Киншт, Г.Н.Герасимова, М.А.Кац.–1983], могут быть проанализированы методом схемных определителей, то есть теорема 2 содержит топологическое решение задачи диагностики.

Недостатком таких СКЭ является необходимость применения традиционного метода наложения при нахождении формулы для искомого параметра. Построения большого числа схемных определителей, равного удвоенной сумме исходных и компенсирующих источников ЭДС и тока, можно избежать, используя НМН.

Построенные на основе НМН формулы для искомого сопротивления, параметра произвольного УИ, ЭДС и тока независимых источников имеют вид

$$Z_s = \frac{U_s}{I_s} = \frac{V_s^U(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}{V_s^I(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}, \quad (11) \quad X_s = \frac{B_s}{A_l} = \frac{V_s^B(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}{V_l^A(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}, \quad (12)$$

$$\underline{E}_s = \frac{V_s^E(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}{D}, \quad (13) \quad \underline{J}_s = \frac{V_s^J(\bar{E}, \bar{J}, \bar{U}, \bar{I})}{D} \quad (14)$$

соответственно. В (11)–(14)  $V_s^U, V_s^I, V_s^B, V_l^A, V_s^E, V_s^J$  – символьные неканонические многочлены, в которых переменными являются как известные сопротивления, проводимости, параметры УИ, так и измеренные напряжения (вектор  $\bar{U}$ ), токи (вектор  $\bar{I}$ ), а также известные параметры независимых источников воздействия (векторы ЭДС  $\bar{E}$  и тока  $\bar{J}$ );  $B_s, A_l$  – токи или напряжения  $l$ -й управляющей и  $s$ -й управляемой ветвей УИ, например, для ИНУН  $B_s = U_s$  и  $A_l = U_l$ .

Метод косвенной компенсации на основе НМН [37,41,44,50]. Построение формул вида (11)–(14) по этому методу выполняется с помощью *теоремы о косвенной компенсации на основе НМН*.

**Теорема 3.** Любой двухполюсный элемент  $s$  в невырожденной цепи на рис. 6,а – сопротивление  $Z_s$ , проводимость  $Y_s$ , генераторы УИ всех четырех типов, независимые источники ЭДС  $\underline{E}_s$  или тока  $\underline{J}_s$  – может быть скомпенсирован, как показано на рис. 6,б, путем замены его норатором при одновременной фиксации на другой произвольной наблюдаемой ветви  $f$  измеренного на ней напряжения  $\underline{U}_f$  с помощью включенного параллельно этой ветви фиксирующего двухполюсника в виде последовательного соединения нуллатора и зависимого источника напряжения с параметром

$$k = \underline{U}_f / \underline{E} = \underline{U}_f / 1, \quad (15)$$

управляемого напряжением  $\underline{U}$  дополнительно введенного последовательно с произвольной ветвью единичного источника ЭДС  $\underline{E}=1$ .

Для нейтрализации источника  $\underline{E}$  в СКЭ на рис. 6,б последовательно и встречно ему включен другой единичный управляемый источник ЭДС  $1 \cdot \underline{U}$ . Заменяв в СКЭ согласно НМН все независимые источники на источники, управляемые напряжением единичного опорного источника, получим *схему с неявным замещением независимых источников*. Анализ этой схемы позволяет получить формулу для определения параметра любого двухполюсного элемента. В частности, для сопротивления и проводимости имеем

$$Z_s = -\Delta_z / \Delta^z, \quad (16) \quad Y_s = -\Delta^y / \Delta_y, \quad (17)$$

где  $\Delta_z, \Delta^z$  – определители производных схем, полученных из *схемы с декомпенсированным искомым элементом* (рис. 7), путем стягивания и удаления сопротивления  $Z_s$  соответственно;  $\Delta^y, \Delta_y$  – определители производных схем, полученных из *схемы, аналогичной рис. 7*, удалением и стягиванием  $Y_s$  соответственно. *Схема с декомпенсированным элементом* формируется путем восстановления в СКЭ искомого элемента и перемещения норатора на место опорного источника.

Параметр произвольного УИ имеет вид

$$\chi = -\Delta(\chi = 0)/\Delta(\chi \rightarrow N), \quad (18)$$

где  $\Delta(\chi = 0)$ ,  $\Delta(\chi \rightarrow N)$  – определитель схемы с декомпенсированным элементом  $\chi$ , в которой УИ нейтрализован или преобразован в нулор.

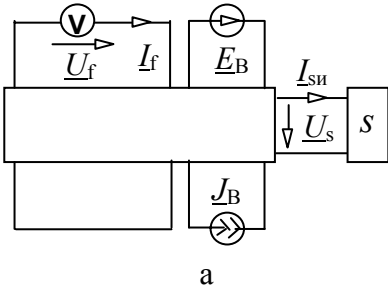
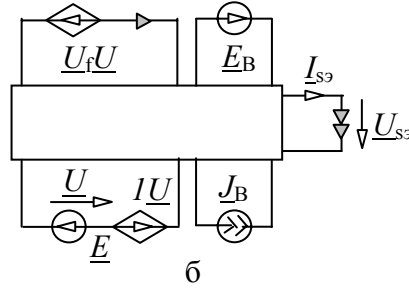


Рис. 6



б

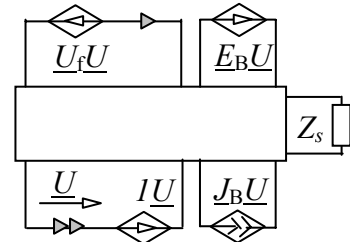


Рис. 7

Диагностические формулы вида (16)–(18) благодаря использованию *НМН* идентичны и компактны для всех элементов, в том числе независимых источников. Они позволяют получить отклики в виде дробно-рациональных выражений вида (11)–(14). При соблюдении правил компактной свертки получаются выражения, обладающие меньшей вычислительной сложностью (число трудоемких операций умножения сокращается в 1,3...3,1 раза), чем выражения, сформированные на основе метода наложения.

Метод смешанной компенсации [32,37,41]. СКЭ в этом случае формируется смешанным образом, а для получения искоемых параметров применяются, как при косвенной компенсации, формулы вида (16)–(18). *Метод смешанной компенсации* оказывается более эффективным по сравнению с *методом косвенной компенсации* как по числу элементов в СКЭ, так и по числу формирующих операций.

Топологические условия диагностируемости цепи [32,40]. *Топологические условия* выводятся из достаточных условий диагностируемости – ненулевого режима диагностируемого элемента и ненулевого определителя СКЭ. Для выполнения условия ненулевого режима: 1) искомые сопротивления и проводимости не должны образовывать сечения (контуры) с нуллаторами и приемниками напряжения (тока); 2) генераторы напряжения (тока) с искомыми параметрами не могут образовывать контуров (сечений) с нуллаторами и приемниками тока (напряжения).

Чтобы исключить типичные случаи невыполнения условия ненулевого определителя СКЭ необходимо пользоваться *топологическими правилами*: 1) все вольтметры должны принадлежать одному произвольному дереву схемы и не образовывать контуров как отдельно, так и в совокупности с независимыми генераторами напряжения, приемниками тока и нуллаторами; 2) все амперметры должны входить в произвольное множество хорд и не образовывать сечений как отдельно, так и в совокупности с независимыми генераторами тока, приемниками напряжения и нуллаторами; 3) элементы с неизвестными параметрами – двухполюсные ветви, генераторы напряжения и тока независимых и управляемых источников – не должны образовывать контуров как отдельно, так и в совокупности с независимыми и управляемыми генераторами напряжения и наторами; 4) элементы с неизвестными

параметрами – двухполюсные ветви, генераторы тока и напряжения независимых и управляемых источников – не должны образовывать сечений, как отдельно, так и в совокупности с независимыми и управляемыми генераторами тока и нораторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана эффективная по вычислительным затратам и ориентированная на построение компактных выражений *схемно-символьная методология анализа, диакоптики и диагностики* сложных линейных электрических цепей, делимых на произвольные многополюсные (6 полюсов и более) подсхемы, что обеспечивает символьное исследование электрических сетей и систем. Реализацию цели диссертации обеспечили следующие результаты.

1. Решена задача компактной свертки символьного выражения отклика цепи с произвольным числом независимых источников путем разработки *неявного метода наложения*, позволяющего представить отклик *с помощью только одной схемной функции* в отличие от традиционного метода наложения, требующего множество схемных функций. С помощью *НМН* получаются более компактные и экономичные по количеству вычислительных операций (умножений для числителя в 1,3...3,1 раза меньше) выражения, чем при использовании метода наложения. *НМН* сокращает объем аналитических выкладок в число раз, приблизительно равное числу независимых источников.

2. Повышена эффективность диакоптического анализа цепей с произвольным числом независимых источников путем сокращения числа полюсов у подсхем и уменьшения числа требуемых сечений с помощью *неявного метода наложения*. Тем самым обеспечивается *уменьшение времени анализа* в число раз, равное отношению числа независимых источников к числу автономных подсхем.

3. Разработан эффективный метод построения символьных выражений цепей, содержащих типовые многополюсники, подсхемы и каскады, – *метод выделения многополюсников* (взаимоиндуктивностей, транзисторов, гираторов, трансформаторов, асинхронных двигателей и др.), позволяющий сократить (в 1,5...2 раза) число требуемых схемных определителей и исключить многократное повторение операций выделения двухполюсных элементов и УИ. Все это *уменьшает вычислительные затраты и снижает сложность выражений* схемных функций, откликов и искомых параметров элементов.

4. Предложено решение диакоптической задачи построения *наилучшего* (половинного и по минимальному числу узлов) и *общего для схем числителя и знаменателя сечения* путем разработки метода *неравновесных схемных миноров*, сокращающего время анализа в 1,7...4,8 раза при одновременном уменьшении числа вычислительных операций в символьных выражениях.

5. Решена задача диакоптического анализа сложных электрических цепей с многополюсными (6 полюсов и более) элементами и подсхемами, в том числе электрических сетей, путем разработки *метода схемно-алгебраической*

*редукции*, позволяющего предотвратить катастрофический рост числа слагаемых в диакоптических формулах при увеличении числа полюсов подсхем. Метод *схемно-алгебраической редукции* совместно с *неявным методом наложения* уменьшает время анализа в 10...100 и более раз по сравнению с известными методами.

6. Предложено решение задачи символьного топологического анализа цепей в исходном *компонентном базисе зарядов или магнитных потоков* – без излишнего преобразования параметров элементов. Это позволяет выполнять схемно-символьный анализ дискретно-аналоговых схем с переключаемыми конденсаторами непосредственно в координатах напряжение – заряд. При этом получаются экономичные символьные выражения без тождественно нулевых слагаемых, которые имеют место в матричных методах.

7. Решена линейная задача *символьно-топологической диагностики* цепей путем разработки *принципа компенсации* элементов с неизвестными параметрами на основе направленного нумерованного нуллора, независимых и управляемых источников. Предложены *методы прямой, косвенной и смешанной компенсации*, позволяющие получить решение линейной задачи диагностики в виде экономичных по числу вычислительных операций символьных выражений для искомым параметров.

8. *Предлагаемые методы*, как показало исследование электрических фильтров, избирательных и операционных усилителей, дискретно-аналоговых схем, электрических сетей и систем, *превосходят* известные символьные методы как по быстрдействию, так и по компактности выражений.

Таким образом, в диссертации изложены новые *теоретические положения*, которые способствуют дальнейшему эффективному развитию современной теории электрических цепей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих источниках.

1. Курганов С.А., Филаретов В.В. Анализ биполярных интегральных схем методом независимых токов // Электрон. техника. Сер. 3: Микроэлектроника.– 1981.– Вып. 6 (96).– С. 37–40.

2. Курганов С.А., Филаретов В.В. Метод многовариантного анализа статического режима электронных схем // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. 1-й Всесоюз. конф.– Киев: Наук. думка, 1981.–Ч. 1.– С. 174–177.

3. Курганов С.А., Филаретов В.В. Использование обратных компонентных функций в моделях многовариантного анализа статического режима электрических цепей // 6-я Всесоюз. конф. по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем: Тез. докл.–Ташкент: Политехн. ин-т, 1982.– Ч.2.– С. 121–122.

4. А. с. 918902 СССР. Устройство для моделирования полевого транзистора / С.А. Курганов, С.В.Троицкий.– Оpubл. 1982.– Бюл. № 13.

5. А. с. 966628 СССР. Устройство для контроля интегральных схем / С.А. Курганов, С.В. Троицкий, П.К. Барткавичус.– Оpubл. 1982.– Бюл. № 31.
6. Курганов С.А., Филаретов В.В. Формирование узловых уравнений электроэнергетических цепей и сетей на основе множеств ветвей // Изв. вузов. Энергетика.– 1983.– № 4.– С. 26–28.
7. Курганов С.А., Филаретов В.В. Метод многовариантного анализа нелинейных электронных схем // Электричество.– 1983.– № 5.– С. 42–43.
8. Курганов С.А. Оптимизационные модели выпрямительных схем // Тез. докл. 3-й Всесоюз. конф. «Проблемы преобразовательной техники».– Киев: Институт электродинамики АН УССР, 1983.– С. 29–32.
9. Курганов С.А., Филаретов В.В. Комбинированный метод анализа электрических цепей // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Электромеханика.– 1984.– № 5.– С. 63–67.
10. Курганов С.А. Формирование моделей электроэнергетических цепей и сетей по методу независимых токов путем последовательного учета компонентов // Изв. вузов. Энергетика, 1984.– № 10.– С. 55–58.
11. Курганов С.А., Савиновский Ю.А. Метод анализа электронных цепей на основе базиса независимых зарядов // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1984.– № 11.– С. 47–51.
12. Курганов С.А. Формирование моделей электронных цепей измерительных устройств в базисе независимых напряжений путем последовательного учета компонентов//Радиотехнические измерения в диапазоне высоких и сверхвысоких частот: Тез. докл. Всесоюз.конф.– Новосибирск,1984.–С. 120–121.
13. Курганов С.А. Методы формирования математических моделей электрических цепей с магнитными элементами: Автореф. дис... канд. техн. наук:05.09.05(Теорет. электротехника) /Ленингр. политехн. ин-т.–Л.,1985.–19 с.
14. Курганов С.А., Савиновский Ю.А., Кайнов А.П. Применение метода независимых потоков для анализа электрических цепей // Электричество.– 1986.– № 2.– С. 74–76.
15. Курганов С.А. Гибридный контурный метод анализа электронных цепей // Изв. вузов. Радиоэлектроника.– 1987.– № 6.– С. 68–71.
16. Курганов С.А. Метод контурных токов с индуктивной матрицей параметров // Изв. вузов. Электромеханика.– 1987.– № 7.– С. 5–9.
17. Савиновский Ю.А., Курганов С.А. Второй метод независимых токов для анализа электрических цепей с магнитными элементами // Численные эксперименты в проектировании радиоэлектронной аппаратуры.– Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1987.– Вып. 1.– С. 65–69.
18. Курганов С.А. Гибридный контурный метод с *RLS*-матрицей параметров для анализа электрических цепей // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. Всесоюз. конф.– Киев: Ин-т проблем моделирования в энергетике АН УССР, 1988.– С. 187–188.
19. Курганов С.А. Гибридный узловой метод анализа электрических цепей // Электричество.– 1988.– № 2.– С. 76–79.

20. Курганов С.А. Расширение области использования программ расчета установившегося режима электрических цепей на основе метода узловых магнитных потоков // Изв. вузов. Энергетика.– 1988.– № 5.– С. 30–34.

21. Курганов С.А. Гибридный контурный метод с резистивно-индуктивной матрицей параметров для анализа электроэнергетических систем // Математическое моделирование в энергетике: Тез. докл. Всесоюз. конф.– Киев, 1990.– Ч. 3.– С. 99–100.

22. Курганов С.А. Гибридный контурный метод с резистивно-индуктивной матрицей параметров для анализа электрических цепей // Изв. вузов. Электромеханика.– 1991.– № 6.– С. 14–21.

23. Булавочкин В.П., Курганов С.А. Автоматизированное проектирование полузаказных специализированных интегральных схем на базовых матричных кристаллах // Перспективные информационные технологии в высшей школе: Тез. докл. Всероссийской конф.– Тамбов, 1995.– С. 135–136.

24. Курганов С.А. Диагностика нелинейных цепей автомобильной электроники методом узловых сопротивлений // Системные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий: Материалы международной конф.– Москва–Сочи, 1999.– С. 72–74.

25. Курганов С.А., Капустин А.А. Анализ плохо обусловленных моделей вентильных преобразователей / Электротехнические системы и комплексы.– Магнитогорск: Магнитогорский гос. тех. ун-т.– 2000.– Вып. 5.– С. 79–83.

26. Курганов С.А. Диагностика электрических сетей на основе схемно-символьного подхода // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышл.: Материалы 3-й Российской конф.–Ульяновск.–2001.– С.106–108.

27. Курганов С.А. Параметрическая адаптация линейных безынерционных электронных цепей на основе схемно-символьного подхода//Логико-алгебраические методы, модели, прикладные приложения: Тр. междунар. конф. КЛИН-2001.– Ульяновск: УлГТУ, 2001.– С. 24–26.

28. Курганов С.А., Никитин С.А. Диагностика электрических сетей на основе аналитического подхода // Энергосбережение в Поволжье.– 2001.–№ 2.– С. 79–81.

29. Курганов С.А. Схемно-символьное решение базисной задачи диагностики электронных цепей в статическом режиме // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: Тр. Всероссийской конф.– Ульяновск, 2001.– С. 233–235.

30. Курганов С.А. Комбинаторный подход к учету нагрузки при синтезе линейных электрических цепей//Системы искусственного интеллекта: Алгоритмы обработки и модели:Тр.межд.конф.КЛИН-2002.–Ульяновск,2002.– Т. 4.– С. 93–95.

31. Курганов С.А., Филаретов В.В. Анализ установившихся режимов линейных электрических цепей методом схемных определителей: Учебное пособие.– Ульяновск: УлГТУ, 2002.– 148 с.

32. Курганов С. А. Символьный подход к решению задачи диагностики электрических цепей // Электричество.– 2002.– № 8.– С. 49–52.– То же.–



Kurganov S.A. A symbolic approach to solving the problem of linear electronic circuit diagnostics // *Electrical technology Russia*.– 2002.– N 3.– P. 70–77.

33. Курганов С.А. Схемно-алгебраические формулы для определения цепных параметров проходных четырехполюсников в символьной форме // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: Синтез и анализ: Тр. межд. конф. КЛИН-2003.–Ульяновск: УлГТУ, 2003.– Т. 4.– С. 52–55.

34. Курганов С.А., Филаретов В.В. О применении операционных усилителей для компенсации импедансов независимыми источниками // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: Синтез и анализ: Тр. межд. конф. КЛИН-2003.–Ульяновск: УлГТУ, 2003.– Т. 4.– С. 55–58.

35. Курганов С.А., Филаретов В.В. Использование схемных функций при вариации параметров управляемых источников в линейных электронных цепях // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: Синтез и анализ: Тр. межд. конф. КЛИН-2003.–Ульяновск: УлГТУ, 2003.– Т. 4.– С. 59–63.

36. Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ линейных электронных цепей на основе схемно-алгебраических формул выделения параметров многополюсников // *Электричество*.– 2003.– № 6.– С. 52–65.

37. Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ и диагностика линейных электрических цепей методом схемных определителей: Учебное пособие.– Ульяновск: УлГТУ, 2003.– 228 с.

38. Курганов С.А. Метод схемных определителей в базисе зарядов и напряжений для анализа цепей с переключаемыми конденсаторами // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2004. Ульяновск: УлГТУ, 2004.– Т. 4.– С. 64–69.

39. Курганов С.А., Филаретов В.В. Метод управляющего генератора для анализа линейных цепей с несколькими источниками воздействия // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН–2004. Ульяновск: УлГТУ, 2004.– Т. 4.– С. 69–75.

40. Курганов С.А., Филаретов В.В. Топологические необходимые и достаточные условия решения базисной задачи диагностики // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2004. Ульяновск: УлГТУ, 2004.– Т. 4.– С. 75–80.

41. Курганов С.А., Филаретов В.В. Метод косвенной компенсации на основе управляемых источников для символьной диагностики линейных цепей // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2004.–Ульяновск: УлГТУ, 2004.– Т. 4.– С. 75–80.

42. Вольнов В.Е., Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ сложных электрических цепей и сетей с помощью программы *CIRSYMD* // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2004. Ульяновск: УлГТУ, 2004.– Т. 4.– С. 75–80.

43. Березуев Р.И., Курганов С.А., Филаретов В.В., Шеин Д.В. Символьный анализ и диагностика электронных цепей.– М.: ОФАП Госкоорцентра Минобрнауки России.– №ОФАП 3981; №ГР 50200401291.– 2004.

44. Курганов С.А., Филаретов В.В. Неявный принцип наложения воздействий в линейных электрических цепях//Электричество.–2005.–№1.– С.32–43.

45. Курганов С.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраические тождества топологических функций для линейных электрических цепей// Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр.межд.конф.КЛИН-2005.Ульяновск: УлГТУ, 2005.–Т.3.С.95–105.

46. Курганов С.А., Филаретов В.В. Формирование передаточных функций электронных цепей по частям методом неравновесных двоичных векторов // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН - 2005.– Ульяновск: УлГТУ, 2005.Т.3.– С.106–116.

47. Курганов С.А., Филаретов В.В. Автоматизированное построение схемно-алгебраических формул выделения многополюсников//Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр.межд.конф.КЛИН-2005.Ульяновск: УлГТУ, 2005.–Т.3.–С.85–95.

48. Березуев Р.И., Курганов С.А., Филаретов В.В., Шеин Д.В. Компьютерная система SCAD символьного анализа и диагностики линейных электронных цепей// Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2005.– Ульяновск: УлГТУ, 2005.– Т. 3.– С. 3–10.

49. Вольнов В.Е., Курганов С.А., Филаретов В.В. Символьный анализ электронных цепей и электрических систем методом схемно-алгебраической редукции // Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика: Тр. межд. конф. КЛИН-2005.– Ульяновск: УлГТУ, 2005.– Т. 3.– С. 34–41.

50. Курганов С.А., Филаретов В.В. Схемно-алгебраический анализ, диакоптика и диагностика линейных электрических цепей: Учебное пособие.– Ульяновск: УлГТУ, 2005.– 320 с.

#### Список основных сокращений

МСО	метод схемных определителей
НМН	<i>неявный метод наложения</i>
Норатор	взвешенный нумерованный ориентированный норатор
Нуллор	взвешенный нумерованный ориентированный нуллор
Нуллатор	взвешенный нумерованный ориентированный нуллатор
САФ	<i>схемно-алгебраическая формула</i>
СТМ	схемно-топологический метод