ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

На правах рукописи

Усынин Валентин Ильич

ТЕОРИЯ СТРУКТУРНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СИНТЕЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

05.09.05. Теоретическая электротехника

Диссертация в форме научного доклада
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1992

Работа выполнена в Киевском институте инженеров гражданской авиации

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН Украины доктор технических наук, профессор
Васильев В.В.
доктор технических наук, профессор
Нагорный Л.Я.
доктор технических наук, профессор
Бондаренко В.М.

Ведущая организация – Институт кибернетики АН Украины, Киев

Защита состоится "24" 11 1992 г. в 14.00 час. на заседании специализированного совета Д 016.30.03 при Институте электродинамики АН Украины
(252680, Киев-57, пр.Победы,56, тел.446-91-15).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электродинамики АН Украины.

Автореферат разослан "16" 10 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук Федий В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Диссертация посвящена развитию теории структур и структурного синтеза электрических цепей с двухполюсными и многополюсными компонентами, включая нестационарные и нелинейные параметры, с неограниченными числами переменных состояние узлов и элементов каждого физического типа.

В теоретической электротехнике к настоящему времени остаются не разрешенными фундаментальные вопросы теории структур электрических цепей, инвариантные по отношению к частным теоретическим представлениям и прикладным задачам. Более чем вековая история развития структурного знания в теоретической и прикладной электротехнике, электронике, в смежных разделах технических наук такова, что и сегодня принято считать, что электрические цепи являются объектами исключительно методического структурного эмпиризма Это знание представляет большое множество разрозненных теорий различных частных подходов и методов синтеза цепей, эквивалентных преобразований, анализа и изобретения структур. При этом основной объем результатов приходится на цепи с сосредоточенными постоянными, а среди них - на цепи с двумя типами параметров. Общий же случай цепей с тремя типами параметров, с нестационарными и нелинейными элементами, а также с многополюсными компонентами, в структурном отношении представляет по существу не исследованную область. В теории цепей распространено мнение об искусстве синтеза, о " кризисе изобилия" рецептурных методов, не связанных структурным единством. Структурный эмпиризм накладывает ограничения на заданный тип операторов цепей, их комбинации, на структуры цепей, физический тип и функциональный вид характеристик двухполюсных элементов и активных компонентов, на область значений параметров, включая фиксированные значения, характер критериев оптимальности структурных и параметрических реализаций. Все эти ограничительные свойства структурного эмпиризма находят прямое отражение в факторах неоптимальности компьютерных технологий по объему исходной информации и производительности. Среди них: большая структурная априорность (произвольность), значительная неопределенность направления перебора структур, необходимость исключить изоморфные цепи, возможные структурные вырождения, постоянный компромисс порядка и размерности расчетной модели, огромный объем вычислений, сопровождающий структурные преобразования и параметрический синтез, критериальный для ЭВМ даже самой высокой производительности.

Необходимость развития теории структур электрических цепей и структурного синтеза, исключающей в практических задачах ограничительные свойства частных подходов и методов, мотивируется историческим и современным состоянием теории структур, краткий анализ которой дан выше.

Тема диссертации разрабатывалась в соответствии с тематическим планом исследовательских работ и планом подготовки научных кадров Киевского института инженеров гражданской авиации. Тема связана с направлениями исследований в рамках научного совета АН Украины по комплексной проблеме "Теоретическая электротехника, электроника и моделирование", с народохозяйственной проблемой создания систем автоматизированного проектирования в области электротехники, с проблематикой высшей школы по совершенствованию и развитию учебного процесса и учебных дисциплин.

Цель работы. Разрешить вопросы фундаментальных структурнофизических закономерностей (взаимосвязей, соотношений) электрических цепей, не зависящих от частных теоретических представлений и прикладных задач, и разработать фундаментальный структурнофизический синтез, основанный на этих закономерностях, аналитические методы структурного синтеза и оптимизации структурных решений в рамках обобщенных моделей технических устройств и систем, принятых в теоретической электротехнике, свободных от недостатков частных подходов и методов структурного эмпиризма. Достижение указанных целей потребовало выработать ряд принципиально новых теоретических положений, сформулировать и разрешить следующие научные задачи:

I) исследование регулярности структурнофизических взаимосвязей электрических цепей по факторам внутренних структур, числам узлов и элементов каждого физического типа и их формализация;

2) исследование регулярности структурнофизических взаимосвязей электрических цепей по тем же факторам, что и в п.I, в случае максимального структурного расширения электрических цепей и их формализация;

3) разработка фундаментального структурнофизического синтеза, аналитических методов оптимизации структурного синтеза цепей по заданным операторам состояния, входным и передаточным

функциям, оптимизации решения ряда перечислительных задач; анализ структур моделей совместного структурнопараметрического синтеза;

4) разработка методов структурного синтеза цепей с многополюсными пассивными и управляемыми компонентами.

Методы исследования. Автор разработал и применяет собственные структурнофизические методы исследования в виде процедур решения задач двухмерной и трехмерной структурнофизической минимизации электрических цепей с последующим структурным расширением цепей. Применяются известные и новые структурнофизические понятия теории цепей. Для формальной записи электрических цепей и их внутренних структур применяются бинарные отношения и операции над ними.

Научная новизна. Впервые в теоретической электротехнике разработана теория структурнофизического моделирования и синтеза электрических цепей, разрешающая фундаментальные вопросы теории структур, полностью исключающая ограничительные свойства методической структурной эмпирии.

Впервые получены фундаментальные структурнофизические результаты, согласно которым электрические цепи регулярно взаимосвязаны во всем неограниченном пространстве цепей по следующим структурным факторам: внутренним структурам цепей, числам узлов, числам реактивных и резистивных элементов. Регулярность взаимосвязей сохраняется и в цепях с многополюсными компонентами, приведенными к эквивалентным схемам с пассивными и активными элементами. Формализация закономерностей в самом общем случае приводится к пяти связанным функциональным соотношениям от семи независимых переменных, каждая из которых имеет точный структурнофизический смысл. Одно из пяти функциональных соотношений отражает взаимосвязи цепей по внутренним структурам, формализуемые в терминах двухзначной логической алгебры бинарных отношений. Остальные четыре соотношения выражают взаимосвязи цепей по числам узлов, индуктивных, емкостных и резистивных элементов. Система пяти связанных функциональных соотношений от семи независимых переменных приводится ко всем более простым формам также пяти соотношений от двух, трех, четырех, пяти и шести независимых переменных. Все эти производные системы отражают взаимосвязи более частных цепей по сравнению с семимерным случаем. Всем системам пяти связанных функциональных соотношений соответствуют обобщенные формализации в виде эквивалентной семимерной функции и всех ее сужений (частных случаев), определяющих любую электрическую цепь как варианту, зависимую переменную, в неограниченном пространстве цепей.

Впервые разработаны фундаментальный структурнофизический синтез, аналитические методы структурного синтеза и оптимизации структурных реализаций, которые не накладывают никакие ограничения на характер прикладных задач, свободны от недостатков частных подходов и методов, охватывают любые обобщенные модели реализации технических устройств и систем. Технология структурного синтеза и оптимизации структурных реализаций определена самим структурнофизическими закономерностями.

Впервые разработаны и применены структурнофизические методы решения фундаментальных вопросов теории структур и формализации структурнофизических закономерностей, сущность которых кратко отмечена выше.

Автор защищает теорию структурнофизического моделирования и синтеза электрических цепей в совокупности основных результатов:

- новые структурнофизические характеристики и производные понятия;
- решение задач двухмерной и трехмерной структурнофизической минимизации; двухмерная и трехмерная закономерности, их формализация;
- структурное расширение цепей, семимерная закономерность, ее сужения, формализация, анализ сужений семимерного пространства;
- теоретические положения структурнофизического синтеза и оптимизации на основе двухмерной, трехмерной, семимерной закономерностей; метод сопряженных деревьев синтеза двухмерных и трехмерных цепей, заданных операторами состояния; оптимизация решения ряда перечислительных задач; семимерная структурная оптимизация, анализ моделей структурнопараметрической оптимизации;
- оптимизация структурного синтеза двухполюсников и трехполюсников для всех видов передаточных функций с параметрами трех типов; структурный синтез цепей с пассивными и активными многополюсными компонентами.

Практическая ценность. Значимость для науки состоит в разработке теории структурнофизического моделирования электрических цепей, в решении фундаментальных вопросов теории структур и структурнофизического синтеза. В высшей школе результаты практически значимы для развития учебных дисциплин по теоретической электротехнике, инженерной электрофизике, схемотехнических разделов аналоговой и цифровой электроники. В инженерной практике результаты работы могут служить единой научной основой для создания автоматизированных систем синтеза.

Реализация результатов. В высшей школе реализации результатов служат две авторские монографии, выполняющие роль учебных пособий по новым теоретическим вопросам структур в теоретической электротехнике, инженерной электрофизике, в схемотехнических разделах аналоговой и цифровой электроники. Наиболее целесообразным направлением внедрения в инженерные разработки является проектирование систем большой размерности, в частности топологий плоских и объемных интегральных схем.

Апробация работы. Результаты работы в полном объеме были доложены на семинарах по теории цепей в ИПМЭ (май 1986) и в ИЭД (октябрь 1986) АН Украины, на семинаре кафедры теории цепей Санкт-Петербургского электротехнического института связи (февраль 1985), на семинаре кафедры ТОЭ Московского энергетического института (декабрь 1986). Отдельные результаты периодически докладывались на семинарах научного совета АН Украины по комплексной проблеме "Теоретическая электротехника, электроника и моделирование", на научных конференциях Киевского института инженеров гражданской авиации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 53 работы. К защите представлено 47 работ, в том числе две монографии и 45 статей.

Структура работы. Диссертационный доклад содержит обобщенное изложение основных результатов и состоит из трех разделов:общая характеристика, основное содержание, выводы. Приводится список публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Основное содержание сконцентрировено по ключевым вопросам, излагаемым в индуктивном плане: структурнофизические характеристики, двухмерная закономерность, трехмерная закономерность, семимерная закономерность, семимерное пространство, семимерная функция, структурная оптимизация, оптимизация двухполюсников, оптимизация трехполюсников, структуры многополюсные.

I.Структурнофизические характеристики

Размерность. Электрическая цепь S с сосредоточенными параметрами включает в общем случае стационарные, нестационарные и нелинейные двухполюсные элементы. Если цепь содержит l индуктивных, c емкостных и g резистивных элементов и число ее связных узлов равно x, то четверка чисел (x, l, c, g) есть размерность данной электрической цепи. Другая форма размерности: $x, q = l + c + g$.

Степень. Если дерево d, состоящее в общем случае из стационарных, нестационарных и нелинейных элементов, содержит l^* индуктивных и c^* емкостных элементов, то число $K^* = c^* - l^*$ есть степень дерева d. Степень число резистивного дерева, в том числе с диссипативным типом нестационарных и нелинейных элементов, равна нулю. Степени деревьев произвольной цепи S образуют ограниченную совокупность чисел

$$\{K\} = \{-\nu, \ldots, -2, -1, 0, 1, 2, \ldots, \mu\}. \qquad (I.I)$$

Степени и их наборы не зависят от функционального характера параметров двухполюсных элементов.

Ранг. Ранг электрической цепи S с набором степеней (I.I) есть число

$$n = \nu + \mu, \quad n = (l_1 - c_1) + (c_2 - l_2), \qquad (I.2)$$

где: $-\nu = c_1 - l_1$, $\mu = c_2 - l_2$ - степени деревьев d_1, d_2 цепи S; l_1, c_1 и l_2, c_2 - суммарные числа стационарных,нестационарных и нелинейных индуктивных и емкостных элементов в d_1, d_2 соответственно. Ранг n - это собственная характеристика любой электрической цепи с сосредоточенными параметрами. В чисто стационарном случае (сосредоточенные постоянные) ранг равен числу собственных конечных и ненулевых частот. В терминах электродинамического состояния ранг есть минимальное число независимых переменных состояния.

<u>Эквивалентность</u>. Объединение всех электрических цепей равного ранга есть класс эквивалентности цепей по рангу $A(n)$. Совокупность этих классов упорядочивается естественным порядком натуральных чисел, представляющих значения ранга: $A(0), \ldots, A(n)$. Класс $A(n)$ является текущей структурной единицей универсального множества цепей (пространства цепей). В нулевой класс $A(0)$ входят цепи с однородными параметрами, а также цепи древообразной структуры.

<u>Сопряженные деревья.</u> Деревья d_1, d_2 данной цепи, степени которых максимальны по модулю, являются сопряженными деревьями. Сопряженные деревья - это структурнофизическая характеристика любой электрической цепи с сосредоточенными параметрами. Каждая пара деревьев d_1, d_2 со степенями - ν , μ определяет ранг цепи.

<u>Состояние.</u> Минимальная совокупность независимых переменных состояния может быть отождествлена с переменными реактивных двухполюсников сопряженных деревьев. Эта совокупность включает потокосцепления (токи) для индуктивных элементов и заряды (напряжения) для емкостных. Уравнения электрического равновесия относительно переменных реактивных двухполюсников имеют минимальный порядок, равный рангу.

<u>Уравнение ранга.</u> Это уравнение относительно степеней $-\nu, \mu$ как неизвестных в формуле ранга: $n = \nu + \mu$. Общее решение:

$$\nu = n - \xi,\ \mu = \xi;\quad \nu = \xi,\ \mu = n - \xi, \tag{I.3}$$

где ξ - целочисленная переменная. Если степени - ν, μ по модулю не превосходят ранга, то $\xi = 0, 1, \ldots, n$. Полный набор решений $-\nu(\xi), \mu(\xi)$, отражающий связные цепи, описывает их с точностью до степеней сопряженных деревьев. Дуальность форм (I.3), сводимая одна к другой, отражает структурнофизическую симметрию по отношению к индуктивным и емкостным элементам сопряженных деревьев цепей равного ранга.

<u>Переменная распределения.</u> Переменная ξ распределяет (раз-

деляет на части) по линейному закону ранг между степенями сопряженных деревьев. Из (I.2), (I.3) следуют равенства $n-\xi=l_1-c_1$, $\xi=c_2-l_2$, связывающие это распределение с разностями чисел реактивных элементов в сопряженных деревьях. Размерность сопряженных деревьев и соответственно размерность любых электрических цепей связана с переменной ξ, так как область ее значений определена фундаментальным числом - рангом системы. С распределительной функцией переменной ξ связаны любые производные структурные соотношения, в том числе структура уравнений состояния. Совокупность значений ξ разбивает полный класс эквивалентности $A(n)$ на отдельные классы $A(n,\xi)$. Степени полного множества деревьев любых цепей с характеристиками n,ξ образуют дуальные наборы:

$$-(n-\xi),\ldots,-1,0,1,\ldots,\xi; \tag{I.4}$$

$$-\xi,\ldots,-1,0,1,\ldots,(n-\xi), \tag{I.5}$$

соответствующие формам (I.3). Наборы (I.4), (I.5) охватывают цепи с общим типом параметров, симметричных в отношении реактивных элементов сопряженных деревьев. Для цепей с параметрами двух типов наборы сужаются.

2. Двухмерная закономерность.

Минимальность. Электрическая цепь является минимальной при данных n,ξ, если минимальна ее размерность:

$$x(n,\xi)=\min,\ q(n,\xi)=\min. \tag{2.I}$$

Область минимизации функционала размерности (2.I) составляют все цепи с характеристиками n,ξ, образующие класс эквивалентности $A(n,\xi)$.

Теорема единственности. Допустим, что существует минимальная цепь S ранга $n=1,2,3\ldots$ Тогда эта цепь содержит одну, и только одну, пару сопряженных деревьев d_1,d_2.

Доказательство теоремы основано на структурнофизической минимизации функционала размерности (2.I). При этом область допустимых значений переменной ξ составляет:

$$\xi=0,1,2,\ldots,n-1/2\ (n/2). \tag{2.2}$$

Область не зависит от форм (I.3). Значение $\xi=n-1/2$ относится к нечетному n, а $\xi=n/2$ (в скобках) - к четному. В случае цепей с общим типом параметров одно сопряженное дерево всегда является однородно реактивным, а другое - реактивнорезистивным. Сопряженные деревья не имеют одинаковых по физическому типу элементов. Ранг чисто реактивных цепей всегда четный, и следовательно $\xi = n/2$. Одно сопряженное дерево при этом является индуктивным, а другое- емкостным. Для индуктивнорезистивных и емкостнорезистивных цепей при любом n значение $\xi = 0$. Сопряженные деревья являются одно чисто реактивным, а другое - число резистивным.

<u>Функция размерности.</u> Минимальная цепь имеет размерность, которая является двухмерной функцией тех же аргументов n, ξ: чило узлов

$$\tau = n - \xi + 1 , \tag{2.3}$$

числа реактивных элементов

$$l = n - \xi \quad , \quad c = \xi , \tag{2.4}$$

дуально

$$l = \xi \quad , \quad c = n - \xi ; \tag{2.5}$$

число резистивных элементов

$$g = n - 2\xi . \tag{2.6}$$

Числа реактивных элементов (2.4) и (2.5) соответствуют формам (I.3). Число резисторов (2.6) не зависит от этих форм. Для четного n и $\xi = n/2$ из (2.6) следует $g = 0$. Если цепь имеет общий тип параметров, то по условию (2.I) в этом особом случае она содержит один резистор. Он входит в дерево низшей по модулю степени.

Суммарное число элементов минимальных цепей

$$l + c + g = 2(n - \xi). \tag{2.7}$$

Сопряженные деревья d_1, d_2 из полного множества пар, удовлетворяющих соотношениям (2.3) -(2.6), взаимно различаются структурой, но не распределением суммарного числа (2.7) на числа реактивных и резистивных элементов сопряженных деревьев:

$$l_1 = l = n - \xi , g_1 = 0 ; c_2 = c = \xi , g_2 = g = n - 2\xi ; \tag{2.8}$$

дуально -

$$l_1 = l = \xi , g_1 = g = n - 2\xi ; c_2 = c = n - \xi , g_2 = 0 . \tag{2.9}$$

Сохранение структуры. Совокупность всех минимальных цепей представляет неограниченное пространство структурнофизического минимума. Единственность сопряженной пары d_1, d_2 является внутренним структурнофизическим свойством минимальных цепей. В пространстве цепей существует структурный инвариант. Сущность инварианта состоит в сохранении структуры - структурного отношения, взаимосвязи - самой цепи и двух, и только двух, ее собственных частей в виде сопряженных деревьев. Минимальная цепь как текущая физическая структура, ее геометрия (граф) и размерность изменяются в диапазоне от простейшей двухэлементной цепи ($n=1, \xi=0$) и до цепей теоретически неограниченной размерности. Число пар сопряженных деревьев при этом остается неизменным, равным единице.

Линейное двухмерие. Любая минимальная цепь как физическая структура однозначно определяется в виде двухмерной линейной функции собственных сопряженных деревьев:

$$S(n,\xi)=d_1(n,\xi)+d_2(n,\xi). \qquad (2.10)$$

Логическому суммированию в (2.I0) соответствует соединение деревьев по парам узлов и объединение их ветвей (рис.I).

Вместе с линейностью по отношению к собственным сопряженным деревьям формула (2.I0) отражает и свойство сохранения структуры, так как число сопряженных деревьев, указанных в этой формуле, остается постоянным во всем неограниченном пространстве минимальных цепей. Линейность цепи и структурный инвариант при любых n, ξ не зависит от самих переменных n, ξ и от функционального вида характеристик нестационарных и нелинейных элементов.

Структурнофизическая функция. Систему формул (2.3) - (2.6), (2.I0), определяющую текущую минимальную цепь как функцию двух аргументов n, ξ и структурных параметров в виде сопряженных деревьев d_1, d_2, можно представить в обобщенном функциональном виде:

$$S=R(n,\xi;\, d_1,d_2). \qquad (2.11)$$

Здесь R - двухмерная структурнофизическая функция, эквивалентная системе (2.3) - (2.6),(2.I0). Фиксирование аргументов n, ξ однозначно определяет размерность (I, l, C, g) любой минимальной цепи с данными n, ξ. Сопряженные деревья связаны с n, ξ. Поэтому в (2.11) они несут характер структурных параметров. Любая пара деревьев на множестве узлов $X=(1,2,\ldots,n-\xi+1)$ однозначно определяет саму цепь S согласно структурному инварианту (2.10).

Механические системы. Сущность структурнофизической закономерности для механических систем остается той же, что и в случае электрических цепей, с заменой электрических понятий на механические аналоги. В (2.3) - (2.6), (2.10) необходимо принять: x - число узлов механической системы; l, c - числа инерционных и упругих элементов соответственно; g - число демпфирующих элементов; S - механическая система, аналогичная соответствующей электрической цепи; d_1, d_2 - единственная пара сопряженных деревьев механической системы S. Переменная n = 1,2,3 - суммарное число консервативных (упругих и инерционных) элементов системы. Это число равно суммарному числу независимых переменных состояния: импульсов или моментов импульсов (скоростей) для инерционных элементов и перемещений (сил,моментов) для элементов упругих связей. В чисто стационарном случае (сосредоточенные постоянные) n равно также числу собственных конечных и ненулевых частот. Переменная ξ имеет аналогичный смысл: она распределяет суммарное число n консервативных элементов системы на числа l, c инерционных и упругих элементов согласно (2.5), (2.6) и соответственно суммарное число n независимых переменных состояния на те же числа l, c переменных состояния для инерционных и упругих элементов. Одно дерево из пары d_1, d_2 всегда является чисто консервативным (реактивным) с однородными элементами, а другое - консервативнодемпфирующим. Дерево или поддерево инерционных элементов всегда имеет единственную структуру лагранжевого дерева. Упругодемпфирующее дерево не имеет ограничений по структуре.

3. Трехмерная закомерность.

Реактивная структура. При сохранении минимального числа реактивных элементов $l+c=n$, содержащихся в сопряженных деревьях, цепи конечного ранга возрастающей размерности имеют менее сильную реактивную связность по сравнению с минимальными цепями. Неограниченный рост размерности цепей конечного ранга функционально связан со структурой самих цепей. Существуют электрические цепи, минимальность которых имеет место относительно собственной структурнофизической характеристики - реактивной структуры.

Реактивной структурой электрической цепи S является ее собственная чисто реактивная часть S^{lc}, которая содержит минимальное число реактивных элементов $l+c=n$ и определяет ранг цепи. Если $l+c>n$, то цепь имеет некоторое множество реактивных структур. Реактивная структура является минимальной, если $x=n-\xi+1$, и максимальной в случае $x=2n$. При $x=2n$ реактивная структура представляет n реактивных элементов, не имеющих между собой реактивной связи. Строго формально реактивные структуры взаимно различаются как бинарные физические структуры.

Минимальность. Электрическая цепь с характеристиками n,ξ является минимальной относительно данной реактивной структуры S^{lc}, если минимальна ее размерность:

$$x(n,\xi,S^{lc})=\min,\quad q(n,\xi,S^{lc})=\min. \tag{3.1}$$

Область минимизации функционала (3.I) включает все цепи с характеристиками n,ξ,S^{lc}. Размерности электрических цепей, минимальных относительно реактивных структур S^{lc}, являются функциями не только аргументов n,ξ, но и реактивной структуры.

Обобщение теоремы. Связь электрических цепей, удовлетворяющих функционалу (3.I), с сопряженными деревьями в общем случае реактивных структур дается следующим обобщением теоремы единственности.

Любая электрическая цепь S с характеристиками n,ξ, минимальная относительно реактивной структуры S^{lc}, содержит одну, и только одну, сопряженную пару деревьев, если реактивная структура S^{lc} является минимальной (число узлов $x=n-\xi+1$); для любой другой реактивной структуры цепь S содержит одну или несколько пар сопряженных деревьев d_1,d_2, имеющих общие резистивные элементы, при этом одно из этих деревьев всегда единственно и включает все резисторы минимальной цепи.

Доказательство этого обобщения основано на структурнофизической минимизации функционала размерности (3.I). Область допустимых значений ξ остается той же (2.2).

Функция размерности. Число узлов любой цепи, минимальной относительно реактивной структуры, изменяется в пределах:

$$n-\xi+1\leq x(S^{lc})\leq 2n. \tag{3.2}$$

От переменной ξ зависит только нижний предел. Сверх этого предела вплоть до значения $2n$ число узлов определяется исключительно реактивной стрктурой. Функция числа узлов с предельными значениями в (3.2) имеет вид:

$$x = n - \xi + p + 1. \tag{3.3}$$

Здесь p - целочисленная переменная структурного распределения реактивных элементов, соответствующая текущей реактивной структуре. Переменная p принимает значения: $p = 0, 1, .., n + \xi - 1$. Значение $p = 0$ относится к минимальной реактивной структуре, а верхнее значение $p = n + \xi - 1$ - к максимальной.

С учетом свойства единственности число резисторов как функция реактивной структуры имеет пределы:

$$n - 2\xi \leq g(S^{lc}) \leq 2n - \xi - 1. \tag{3.4}$$

Нижний предел в (3.4) относится к двухмерным минимальным цепям, а верхний - соответствует цепям с максимальной реактивной структурой. Сама функция числа резисторов относительно аргументов n, ξ, p имеет вид:

$$g = n - 2\xi + p. \tag{3.5}$$

В случае реактивных цепей $p = 0$. Для индуктивнорезистивных и емкостнорезистивных цепей $p = 0, 1, 2, .., n - 1 \ (\xi = 0)$.

Суммарное число элементов

$$l + c + g = 2(n - \xi) + p. \tag{3.6}$$

Распределение числа (3.6) на числа элементов сопряженных деревьев имеет вид:

$$l_1 = l = n - \xi, \ c_2 = c = \xi, \ g_2 = g = n - 2\xi + p; \tag{3.7}$$

дуально -

$$l_1 = l = \xi, \ g_1 = g = n - 2\xi + p; \ c_2 = c = n - \xi. \tag{3.8}$$

В случае (3.7) единственным является емкостнорезистивное дерево d_2. Сопряженное индуктивнорезистивное дерево d_1 при этом включает $g_1 = p$ резисторов, общих с деревом d_2. В дуальном варианте (3.8) сопряженные деревья d_1 и d_2 меняются местами.

Линейное трехмерие. Любая цепь, удовлетворяющая функционалу размерности (3.I), как физическая структура однозначно определяется в виде трехмерной линейной функции собственных сопряженных деревьев:

$$S(n,\xi,\rho) = d_1(n,\xi,\rho) + d_2(n,\xi,\rho). \qquad (3.9)$$

Логическому суммированию в (3.9) соответствует соединение деревьев по парам узлов и объединение двухполюсных элементов, аналогичное рис.I, исключая одноименные резисторы. Линейность трехмерных минимальных цепей относительно сопряженных деревьев при любых n,ξ,ρ не зависит от самих переменных n,ξ,ρ и от функционального вида характеристик нестационарных и нелинейных элементов.

Структурнофизическая функция. По аналогии с (2.II) систему (3.3), (3.5), (3.7)-(3.9) можно представить в обобщенном виде:

$$S = R(n,\xi,\rho; d_1, d_2). \qquad (3.I0)$$

Здесь R - трехмерная структурнофизическая функция, эквивалентная системе (3.3), (3.5), (3.7)-(3.9). Фиксирование аргументов n,ξ,ρ однозначно определяет размерность (x,l,c,g) любой минимальной трехмерной цепи с данными n,ξ,ρ. Сопряженные деревья d_1, d_2 в (3.I0) также связаны с n,ξ,ρ. Любая пара сопряженных деревьев на множестве узлов $X=(1,2,..,n-\xi+\rho+1)$ однозначно определяет саму цепь S согласно (3.9).

4. Семимерная закономерность.

Текущая цепь. Произвольная электрическая цепь - варианта в пространстве цепей - является текущей цепью. Множество цепей, минимальных относительно реактивных структур, включая двухмерный случай ($\rho=0$), образует нижнюю границу этого пространства, открытого в сторону неограниченно возрастающих значений ранга и размерности. Структура неограниченного роста цепей связана с минимальными трехмерными цепями. Каждая такая цепь $S(n,\xi,\rho)$ является образующей (производящей) для любой цепи, описываемой формулой:

$$S = S(n,\xi,\rho) + F, \qquad (4.I)$$

или с учетом (3.9) -

$$S = d_1(n,\xi,\rho) + d_2(n,\xi,\rho) + F. \qquad (4.2)$$

Здесь: S - текущая цепь, собственные характеристики которой n, ξ, ρ равны соответственным характеристикам минимальной цепи; F - дополнение к минимальной цепи, не изменяющее характеристик n, ξ, ρ. Дополнение влияет на структурные и непрерывные свойства цепи S, расширяя их по сравнению с минимальной цепью.

Структура дополнения F связана со структурой минимальной трехмерной цепи и условием неизменности характеристик n, ξ, ρ. В общем случае дополнение F имеет реактивнорезистивный характер. Ранг дополнения равен нулю. Этим определяется инвариантность ранга текущий цепи (4.I). Как следует из (I.2), (I.3), нулевой ранг имеют однородные и неоднородные цепи. Размерности этих цепей не ограничены. Степени сопряженных деревьев могут быть положительными, отрицательными или нулевыми. Ненулевые степени взаимно компенсируются, сохраняя неизменным ранг суммарной цепи (4.I). Структурнофизические факторы, определяющие неограниченный рост цепей, имеют регулярный характер.

<u>Контурноузловое дополнение.</u> В формуле (4.I) дополнение F состоит из трех однородных систем: индуктивной $F_\ell(\alpha, u)$, емкостной $F_c(\beta, v)$ и резистивной $F_g(\gamma, h)$. Здесь: α, β, γ - числа узлов соответствующих систем, исключая общие узлы с минимальной цепью из их числа (3.3); u, v, h - числа двухполюсных элементов, считая любые параллельные в каждой из однородных систем. Системы $F_\ell(\alpha, u), F_c(\beta, v), F_g(\gamma, h)$ в общем случае состоят из отдельных подсистем. Связи подсистем с минимальной цепью и между собой удовлетворяют условию инвариантности характеристик n, ξ, ρ.

Индуктивные и емкостные части систем $F_\ell(\alpha, u)$ и $F_c(\beta, v)$, соединенные непосредственно с любыми узлами индуктивных и соответственно емкостных элементов сопряженных деревьев в (4.2), а также резистивные части системы $F_g(\gamma, h)$, соединенные с любыми узлами минимальной цепи, не имеют ограничений по структуре и типу связей с минимальной цепью. При этом для суммарной цепи (4.2) сохраняются характеристики n, ξ, ρ. Все остальные части систем $F_\ell(\alpha, u), F_c(\beta, v), F_g(\gamma, h)$, не имеющие непосредственных связей с минимальной цепью, входят в эти системы как последовательные фрагменты (один общий узел). В частности, отдельные индуктивные и емкостные части систем $F_\ell(\alpha, u), F_c(\beta, v)$ могут иметь только один общий узел непосредственно с емкостными и соответственно индуктивными фрагментами сопряженных деревьев в (4.2). Структура и число подобных последовательно соединенных подсистем не ограничены. Обобщенной узловой характеристикой систем $F_\ell(\alpha,u)$, $F_c(\beta,\vartheta)$, $F_g(\gamma,h)$ является суммарное число узлов $\lambda=\alpha+\beta+\gamma$.

Дендритное дополнение. Это дополнение является реактивно-резистивной цепью деревообразной структуры, представляющей частный случай контурноузловых систем, соединенных последовательно. Каждая из подсистем дендритного дополнения имеет один общий узел с минимальной трехмерной цепью. Число подобных подсистем и их размерности не ограничены. Характеристики n, ξ, ρ при этом сохраняются. Числа узлов и элементов дендритных структур учитываются переменными u, ϑ, h, λ.

Семимерная цепь. Текущая цепь с контурноузловым дополнением является функцией семи структурнофизических аргументов $n, \xi, \rho, u, \vartheta, h, \lambda$:

$$S(n,\xi,\rho,u,\vartheta,h,\lambda)=S(n,\xi,\rho)+F(u,\vartheta,h,\lambda),$$
$$F(u,\vartheta,h,\lambda)=F_\ell(\alpha,u)+F_c(\beta,\vartheta)+F_g(\gamma,h). \tag{4.3}$$

Переменные $\lambda=\alpha+\beta+\gamma$ и u,ϑ,h принимают в общем случае взаимно независимые неограниченные значения: $\alpha,\beta,\gamma=0,1,2,..;\ u\geq\alpha, \vartheta\geq\beta, \gamma\geq h$. На рис. 2 показан пример обобщенной модели семимерной цепи $S(n=5,\xi=2,\rho=2,u,\vartheta,h,\lambda)$ на основе трехмерной цепи $S(n=5,\xi=2,\rho=2)$ с нефиксированными значениями переменных u,ϑ,h,λ.

Функция размерности. Размерность семимерных цепей типа (4.3) является функцией тех же семи аргументов: число узлов

$$\mathfrak{T}=n-\xi+\rho+\lambda+1, \tag{4.4}$$

числа реактивных элементов

$$\ell=n-\xi+u,\quad c=\xi+\vartheta, \tag{4.5}$$

дуально-

$$\ell=\xi+u,\quad c=n-\xi+\vartheta; \tag{4.6}$$

число резистивных элементов

$$g=n-2\xi+\rho+h. \tag{4.7}$$

5. Семимерное пространство.

Семимерное сужение. Полное пространство структурнофизических измерений - полная система структурнофизических координат - есть множество независимых структурнофизических переменных:

$$(n, \xi, \rho, u, v, h, \lambda). \tag{5.1}$$

В наиболее общем случае реактивнорезистивных цепей переменные n, ξ принимают ненулевые значения: $n = 1, 2, \ldots$; $\xi = 1, 2, \ldots, n-1/2\,(n/2)$. Этим значениям n, ξ и полному числу неформальных комбинаций переменных ρ, u, v, h, λ соответствует фиксированное множество сужений семимерия (5.1), в которых определены цепи различного числа измерений. Это число изменяется от двух n, ξ до семи согласно (5.1), включая все промежуточные: 3-, 4-, 5-, 6-, 7-мерные. Совокупности структурнофизических переменных в пространствах равной размерности различные. Во всех этих подпространствах структурнофизические переменные принимают только ненулевые значения. С учетом нулевых значений переменных ρ, u, v, h, λ все сужения пространства (5.1) совпадают с ним, и, следовательно, все электрические цепи являются семимерными структурнофизическими функциями в пространстве цепей. Размерности электрических цепей, определенных в подпространствах семимерия (5.1), даются формулами (4.4) - (4.7) с учетом нулевых значений соответствующих аргументов.

Узловое сужение. Если суммарное число узлов $\lambda = 0$, то соответствующее сужение семимерия (5.1) является шестимерным пространством

$$(n, \xi, \rho, u, v, h) \tag{5.2}$$

Все неформальные сужения пространства (5.2) представляют подпространства с числом измерений от двух n, ξ до шести согласно (5.2).

Парное сужение. Если $\lambda \neq 0$ и $u \geq \alpha, v \geq \beta, h \geq \gamma$, то парные переменные u, λ; v, λ; h, λ учитываются как один комбинаторный элемент в множестве сужений семимерия (5.1) с ненулевыми значениями чисел узлов α, β, γ. Вне пар u, λ; v, λ; h, λ переменная λ отражает несвязаные узлы, что не имеет физического смысла. Все неформальные сужения пространства (5.1) с учетом отмеченной парности переменных представляют подпространства с числом измерений от четырех вида n, ξ, u, λ; n, ξ, v, λ; n, ξ, h, λ и до семи согласно (5.1).

Частное сужение. Если $\xi = 0$, то семимерие (5.I) приводится к шестимерию

$$(n, u, \vartheta, h, \lambda). \tag{5.3}$$

В другом особом случае $\xi = n/2$, n - четно, и $\rho = 0$ семимерие сужается и пятимерию

$$(n, u, \vartheta, h, \lambda). \tag{5.4}$$

В пространствах (5.3), (5.4) и всех неформальных сужениях этих пространств определены частные цепи, общий тип параметров которых задается только дополнёниями с переменными u, ϑ, h, λ к минимальным индуктивнорезистивным, емкостнорезистивным цепям в случае (5.3) ($\xi = 0$) и к минимальным чисто реактивным цепям в случае (5.4) ($\xi = n/2$, $\rho = 0$).

Электрические цепи, имеющие только два типа параметров, определены: индуктивнорезистивные цепи в пространстве

$$(n, \rho, u, h, \lambda) \tag{5.5}$$

($\xi = 0$, $\vartheta = 0$); емкостнорезистивные цепи в симметричном пространстве

$$(n, \rho, \vartheta, h, \lambda) \tag{5.6}$$

($\xi = 0$, $u = 0$); чисто реактивные цепи в пространстве

$$(n, u, \vartheta, \lambda) \tag{5.7}$$

($\xi = n/2$, n - четное, $h = 0$). Во всех неформальных сужениях пространств (5.3) - (5.7) определены более частные цепи с двумя типами параметров.

6. Семимерная функция

Общая функция. Система формул (4.3) - (4.7), определяющая текущую цепь как функцию семи структурнофизических аргументов и структурных параметров в виде сопряженных деревьев d_1, d_2 согласно (4.2) и контурноузловых дополнений F_ρ, F_c, F_g , может быть представлена в обобщенном функциональном виде:

$$S = R(n, \xi, \rho, u, \vartheta, h, \lambda; d_1, d_2, F_\rho, F_c, F_g). \tag{6.I}$$

Здесь R - семимерная структурнофизическая функция, эквивалентная системе (4.3) - (4.7). Фиксирование значений аргументов однозначно определяет размерность (x, ℓ, c, g)

любых цепей с данными значениями аргументов согласно (4.4)-(4.7). Сопряженные деревья d_1, d_2 и контурноузловые дополнения F_ϱ, F_c, F_g связаны с аргументами семимерия (5.I). Ввиду этого в (6.I) они несут характер структурных параметров. Задание структурных параметров $d_1, d_2, F_\varrho, F_c, F_g$, подчиненных условию инвариантности характеристик η, ξ, ρ, однозначно определяет саму цепь S согласно (4.3).

Сужение функции. Структурнофизическая функция R сужается на всех подпространствах семимария (5.I): узловых, парных, частных. Предельными случаями сужений являются двухмерная $R(\eta,\xi; d_1, d_2)$ и трехмерная $R(\eta,\xi,\rho; d_1, d_2)$ функции, соответствующие минимальным двухмерным и трехмерным цепям. Все суженные функции при учете нулевых значений аргументов и соответственных "пустых" структурных параметров являются семимерными.

7. Структурная оптимизация.

Теоретическая основа. Теоретической основой структурного синтеза и оптимизации структурных реализаций являются семимерные структурнофизические закономерности и их сужения. При ненулевых значениях аргументов семимерные цепи имеют самые общие по структуре совместные интегродифференциальные и алгебраические операторы. Двухмерные и трехмерные цепи отражают лишь интегродифференциальные операторы. Семимерные закономерности и их сужения приводят к адекватным регулярным структурнофизическим методам синтеза цепей и оптимизации структурных реализаций по заданным операторам. Эти методы не накладывают никакие ограничения на заданный тип оператора, уравнения состояния в различных базисах, входные и передаточные функции, их комбинации, на физический и функциональный вид двухполюсных элементов, область значений параметров, включая фиксированные значения, характер критериев оптимальности структурных и параметрических решений. Методы абсолютно минимальны по исходной информации, так как не привлекают никакие априорные представления. Технология структурного синтеза определена самими структурнофизическими закономерностями.

Двухмерные оптимизации. Двухмерные цепи представляют структурные реализации интегродифференциальных операторов, заданных в любой форме, с особенностью вырождения на нулевой и бесконечной частотах, так как одно из сопряженных деревьев включает только однородные реактивные элементы. Эти реализации, эквивалентные по характеристикам n, ξ, оптимальны по критериям минимальной двухмерной размерности и минимальному числу структурных параметров в виде сопряженных деревьев d_1, d_2, из которых составляются синтезируемые цепи. Структурные реализации перекрывают весь диапазон возможных двухмерных решений. В частности, структурные реализации абсолютно минимальны при $\xi = 1$ по числу реактивных элементов $\min l(n,\xi) = 1$, $\min c(n,\xi) = 1$, а при $n-1/2$ $(n/2)$ – по числу резисторов $\min g(n,\xi) = 1$, числу узлов $\min x(n,\xi)$ и суммарному числу элементов $\min q(n,\xi)$. По отношению к любым фиксированным значениям отдельных компонентов размерности из x, l, c, g все остальные компоненты и соответствующие им цепи как двухмерные функции также абсолютно минимальные.

Метод сопряженных деревьев. Непосредственно по рангу n заданного оператора, единственной исходной информации для структурного синтеза, и фиксированным значениям переменной $\xi = 0, 1, 2, \ldots, n-1/2$ $(n/2)$, отражающим требования к структурным реализациям по числу элементов каждого физического типа, по формулам (2.3) – (2.6) определяются размерности, строятся сопряженные деревья на множестве узлов $X = (1, 2, \ldots, n-\xi+1)$ с учетом (2.8),(2.9) и сами синтезируемые двухмерные цепи:

$$n \to x, l, c, g, d_1, d_2, S(n,\xi). \qquad (7.1)$$

На рис.3 показана цепь ранга $n = 5, \xi = 2$, отвечающая условиям двухмерной структурной оптимизации: $\min l(n,\xi) = 3$, $\min c(n,\xi) = 2$, $\min g(n,\xi) = 1$, $\min x(n,\xi) = 4$, $\min q(n,\xi) = 6$. Множеств узлов $X = (1,2,3,4)$. Сопряженные деревья равны:

$$d_1 = \begin{pmatrix} 1,2 & 2,3 & 3,4 \\ L & L & L \end{pmatrix}, \quad d_2 = \begin{pmatrix} 2,4 & 3,4 & 1,3 \\ C & C & G \end{pmatrix}.$$

Сама цепь $S(n=5, \xi=2) = d_1 + d_2$. На нулевой и бесконечной частотах цепь имеет особенность вырождения, связанную с индуктивным деревом d_1.

Трехмерные оптимизации. Трехмерные цепи исключают особенность вырождения на нулевой и бесконечной частотах. Структурные реализации на основе этих цепей охватывают интегродифференциальные операторы общего типа. Подобно предыдущему случаю, трехмерные реализации, эквивалентные по характеристикам n, ξ, p, оптимальны по критерию минимальной трехмерной размерности и минимальному числу структурных параметров в виде сопряженных деревьев или другой пары - реактивной структуры S^{lc} и резистивного дополнения с условием (3.3), (3.5). Структурные реализации перекрывают весь диапазон возможных трехмерных решений. Реализации с абсолютно минимальными числами реактивных элементов $\min l(n,\xi)=1, \min c(n,\xi)=1$, резисторов $\min g(n,\xi,p)=2$, числом узлов $\min x(n,\xi,p)$ и суммарным числом элементов $\min q(n,\xi,p)$ имеют место при $p=1$ и тех же значениях ξ, что и в двухмерном случае. Фиксирование отдельных компонентов размерности также приводит к минимальным трехмерным реализациям.

<u>Структурный синтез</u>. Методика структурного синтеза трехмерных цепей на основе сопряженных деревьев аналогична двухмерному случаю. По рангу заданного оператора и фиксированным значениям переменных ξ, p, отражающим те же требования в отношении чисел элементов, а также условия невырожденности заданного оператора на нулевой и бесконечной частотах, определяются согласно (2.4),(2.5),(3.3),(3.5) размерности, строятся сопряженные деревья на множестве узлов $X=(1,2,\ldots,n-\xi+p+1)$ с учетом (3.7), (3.8) и сами синтезируемые трехмерные цепи:

$$n \to x, l, c, g, d_1, d_2, S(n,\xi,p). \qquad (7.2)$$

Трехмерная цепь ранга $n=5, \xi=2, p=2$, показанная на рис. 4,удовлетворяет условиям трехмерной структурной оптимизации: $\min l(n,\xi)=3, \min c(n,\xi)=2, \min g(n,\xi,p)=3,$

$$\min x(n,\xi,p)=6, \ \min q(n,\xi,p)=8.$$

Множество узлов X = (I,2,3,4,5,6). Сопряженные деревья равны:

$$d_1=\begin{pmatrix} 1,2 & 2,3 & 3,4 & 2,6 \\ L & L & L & G \end{pmatrix}, \quad d_2=\begin{pmatrix} 4,5 & 5,6 & 4,3 & 1,5 & 2,6 \\ C & C & G & G & G \end{pmatrix}.$$

Сама цепь $S(n=5, \xi=2, p=2)=d_1+d_2$. На нулевой и бесконечной частотах цепь не имеет особенности вырождения двухмерных цепей.

Возможен вариант структурного синтеза на основе построения реактивной структуры S^{lc} и резистивного дополнения с учетом размерности (2.4),(2.5),(3.3.),(3.5) и единственности одного из сопряженных деревьев на множестве узлов $X=(1,2,\ldots$ $\ldots, n-\xi+p+1)$.

<u>Оптимизация перечислений.</u> Структурнофизические закономерности дают возможность оптимизировать решение задач перечис-

ления эквивалентных цепей и их классов. Применительно к двухмерным и трехмерным цепям методики перечисления включают генерацию полных множеств сопряженных деревьев и их последующую композицию согласно (2.IO), (3.9). При этом учитываются особенности перестановок однородных параметров.

Решение задачи перечисления двухмерных цепей, эквивалентных по характеристикам n, ξ, приводит к значениям нижнего и верхнего пределов числа цепей, равных соответственно:

$$(n-\xi+1)^{n-\xi-1} \quad ; \left[(n-\xi)!\,(n-\xi+1)^{n-\xi-1}\right]^2 .$$

Нижний предел отражает несущественность всех перестановок однородных параметров в сопряженных деревьях, а верхний - наоборот существенность всех таких перестановок, учитывающих фиксированные неравные значения однородных параметров или их различие по собственным стационарным и нелинейным характеристикам.

Решение задачи частотного разбиения полного класса двухмерный цепей с сосредоточенными постоянными дает оценку числа цепей, различие динамических свойств которых определено исключительно резервом структуры: это число меньше или равно

$$(n-\xi)!\,(n-\xi+1)^{2(n-\xi)-3}$$

Структурнофизические закономерности представляют естественную основу оптимизации решений более сложных перечислительных задач, связанных с многомерными цепями, не привлекая при этом априорные математические понятия.

Семимерные оптимизации. Инвариантными относительно типа интегродифференциальных операторов являются структурные реализации в рамках семимерных цепей с контурноузловым дополнением (4.3) и их сужений от семимерных до трехмерных. Структурные реализации с конкурными дополнениями вида $F_\ell(u), F_c(v)\,(\alpha=\beta=0)$ минимальны по двухмерным и трехмерным числам узлов (2.3), (3.3) и резисторов (2.6), (3.5). Числа же реактивных элементов зависят от n, ξ, u, v согласно (4.5), (4.6).

Оптимальный структурный синтез осуществляется по методу сопряженных деревьев (7.I), (7.2) для двухмерных и трехмерных составляющих семимерных цепей и общей формуле (4.3), которая в случае дополнений $F_\ell(u), F_c(v)$ имеет вид:

$$S(n,\xi,\rho,u,v) = S(n,\xi,\rho) + F_\ell(u) + F_c(v) \qquad (7.3)$$

Трехмерные и четырехмерные сужения производны от (7.3). Дополнения $F_\ell(u)$ и $F_c(\delta)$ строятся на подмножествах узлов индуктивных и соответственно емкостных фрагментов сопряженных деревьев.

Структурный синтез цепей для заданных совместных интегродифференциальных и алгебраических операторов определен общей структурной формулой (4.3) и функциями размерности (4.4) - (4.7). Минимальные двухмерные ($\rho=0$) и трехмерные цепи в (4.3) отражают интегродифференциальную составляющую заданного оператора. Контурноузловые дополнения $F_\ell(\alpha,u), F_c(\beta,\delta), F_g(\gamma,h)$ соответствуют индуктивным, емкостным и омическим составляющим алгебраической части совместного оператора.

Структурнопараметрическая оптимизация. Двухмерные, трехмерные и многомерные реализации, оптимальные в структурном отношении, однозначно приводят к адекватным оптимизированным по структуре моделям параметрического синтеза. Математическая структура этих моделей функционально связана с переменными n, ξ, ρ, а в многомерном случае - со всеми остальными переменными u, δ, h, λ. Этим исключается априоризм структур моделей параметрического синтеза. Вся процедура структурного и параметрического синтеза на основе семимерных закономерностей, представляющая единый структурнопараметрический синтез, управляема по структурным и параметрическим переменным оптимизации.

8. Оптимизация двухполюсников.

Трехмерные оптимизации. Двухмерные относительно n, ξ двухполюсники представляют структурные реализации входных функций с нулевым или бесконечным значением на граничных частотах. Трехмерные двухполюсники с переменными n, ξ, ρ для любого $\rho=1,2,\ldots,n+\xi-1$ снимают частотную особенность предыдущего случая. Двухмерные и трехмерные двухполюсники удовлетворяют теореме единственности и ее обобщению, перекрывают весь диапазон двухмерных и трехмерных реализаций, эквивалентных по характеристикам n, ξ, ρ и типу входной функции, оптимальны по отношению ко всем структурным факторам, отмеченным выше для этого класса цепей.

Структурный синтез. Синтез двухмерных и трехмерных двухполюсников осуществляется по методу сопряженных деревьев. Исходная информация, как и в предыдущих случаях, абсолютно минимальная

ная. Непосредственно по рангу заданной несокращенной входной функции (степени полинома знаменателя) определяются размерности x, l, c, g , строятся сопряженные деревья с учетом (2.8), (2.9) ($p=0$), (3.7), (3.8) ($p\neq 0$) и сами двухполюсники согласно (7.I), (7.2). Структура сопряженных деревьев относительно входа двухполюсника определена граничными значениями заданной функции. Для минимальных функций сопряженные деревья содержат обязательный резонансный фрагмент. Структурно выполняются все остальные условия, следующие непосредственно из заданных функций.

Предположим, что несокращенная входная функция сопротивления имеет порядок $n=m=5$ и граничные значения $Z(0)$, $Z(\infty)\neq 0,\infty$. Оптимальный трехмерный двухполюсник с переменными $n=5,\ \xi=2,\ p=1$ показан на рис.5. Структурная реализация удовлетворяет условиям: $\min l(n,\xi)=3$, $\min c(n,\xi)=2$, $\min g(n,\xi,p)=2$, $\min x(n,\xi,p)=5$. Множеств узлов $X=(1,2,3,4,5)$. Сопряженные деревья равны:

$$d_1=\begin{pmatrix} 1,2 & 2,3 & 3,4 & 1,5 \\ L & L & L & G \end{pmatrix},\quad d_2=\begin{pmatrix} 2,5 & 2,3 & 2,4 & 1,5 \\ C & C & G & G \end{pmatrix}.$$

Сам двухполюсник $S(n=5,\xi=2,p=1)=d_1+d_2$.

Граничные значения взаимно независимые. При $\xi=1$ реализуются двухполюсники с абсолютно минимальными числами реактивных элементов : $\min l(n,\xi)=1$ или симметрично $\min c(n,\xi)=1$.

Семимерные оптимизации. Двухполюсники, инвариантные относительно типа входной функции, реализуются также в классе семимерных цепей с контурноузловым дополнением и их сужений от шестимерных до трехмерных, как это показало выше. Пятимерные, четырехмерные и трехмерные двухполюсники с реактивными дополнениями вида $F_l(u), F_c(v)$ также являются минимальными по двухмерным и трехмерным числам узлов (2.3),(3.3) и резисторов (2.6), (3.5). Структурный синтез этих двухполюсников определен методом сопряженных деревьев (7.I), (7.2) и структурной формулой (7.3) с учетом (4.4)-(4.7). Максимизация двухполюсников по числу непараллельных реактивных элементов имеет место в области

$$n-\xi+1\leq x(n,\xi,p)\leq n+2 .$$

Двухполюсники с числом узлов в этой области потенциально обладают наиболее широкими входными свойствами в рамках модели (7.3).

Структурнопараметрическая оптимизация. Структура системы компонентных уравнений двухмерных, трехмерных и многомерных двухполюсников адекватна данным реализациям. В пятимерных,четырехмерных и трехмерных двухполюсниках типа (7.3) структура компонентных уравнений является функцией переменных n, ξ, ρ, u, v. Оптимизации систем компонентных уравнений относительно переменных n, ξ, ρ, u, v проявляются в минимизациях чисел искомых параметров, чисел сомножителей в детерминантных функциях и чисел суммируемых слагаемых в каждом уравнении. Функциональная полнота пятимерных двухполюсников ранга n, оцениваемая соотношением числа элементов и порядка системы компонентных уравнений, имеет место при условии: $u+v \geq 2(\xi+1)-\rho$. С учетом (3.5) $u+v \geq n-g+2$. Свойство функциональной полноты связано с числом резисторов g. При минимальном числе резисторов $\min g(n,\xi,\rho)=2$ число $u+v \geq n$. В пятимерных двухполюсниках достигается любое оптимальное соотношение чисел реактивных и резистивных элементов, в том числе и при $g=2$.

9. Оптимизация трехполюсников.

Трехмерные оптимизации. Двухмерные и трехмерные структурные реализации трехполюсников оптимальны по отношению к тем же структурнофизическим факторам, что и в случае двухполюсников. Структурный синтез этих трехполюсников с любым типом несокращенной функции осуществляется по методу сопряженных деревьев. Структура сопряженных деревьев по отношению к внешним узлам трехполюсников определена регулярными наборами (I.4), (I.5) степеней деревьев и их подмножеств. Наборы отражают структуру полиномов заданных передаточных функций (далее применительно к функции передаточного сопротивления).

Передача полная. Трехполюснику с полной несокращенной передаточной функцией соответствуют полные (не усеченные) наборы степеней деревьев (I.4), (I.5). По рангу трехполюсника n, представляющего степень знаменателя, и фиксированным значениям ξ, ρ определяются размерности x, l, c, g, строятся сопряженные деревья d_1, d_2, отражающие наборы (I.4), (I.5) и частотные граничные значения, и сами двухмерные и трехмерные трехполюсники согласно (7.I), (7.2).

Пусть передаточная несокращенная функция сопротивления трехполюсника имеет порядок $n=m=5$ и граничные значения $Z(0), Z(\infty) \neq 0, \infty$. Оптимальная структурная реализация трехполюсника с переменными $n=5, \xi=2, \rho=1$, показанная на рис.6, удовлетворяет условиям: $\min l(n,\xi)=3$,

$\min c(n,\xi)=1, \min g(n,\xi,p)=2, \min x(n,\xi,p)=5$. Набор (I.4) при этом имеет вид: –3, –2, –I, 0, I, 2. Множество узлов $X=(1,2,3,4,5)$. Сопряженные деревья равны

$$d_1=\begin{pmatrix} 1,2 & 1,4 & 3,4 & 4,5 \\ L & L & L & G \end{pmatrix},\ d_2=\begin{pmatrix} 1,3 & 2,3 & 2,5 & 4,5 \\ C & G & C & G \end{pmatrix}.$$

Сам трехполюсник $S(n=5,\xi=2,p=1)=d_1+d_2$. Граничные значения взаимно независимые. В симметричном варианте реализуется трехполюсник с минимальным числом индуктивных элементов $l(n,\xi)=1$

Передача высокочастотная. В этом случае полином числителя передаточной функции не имеет пропусков степеней комплексной частоты, но усечен в сторону понижающихся степеней. При этом наборы (I.4),(I.5) преобразуются соответственно к виду:

$$\xi-i,\ \xi-i+1,\dots,\xi-1,\ \xi;$$

$$n-i-\xi,\ n-i-\xi-1,\dots,n-\xi-1,\ n-\xi;$$

$i=0,1,2,\dots,n-1$. Методика сопряженных деревьев в целом повторяется.

Передача низкочастотная. Для данной функции наборы (I.4), (I.5) преобразуются к виду:

$$-(n-\xi),-(n-\xi-1),\dots,\xi-i;$$
$$-\xi,-(\xi-1),\dots,n-(i+\xi);$$

$i=1,2,\dots,n$. Методика синтеза повторяется.

Передача среднечастотная. Полином числителя представляет сумму степеней комплексной частоты без крайних слева и справа степеней и со сплошным (без пропусков) набором промежуточных степеней. Общий подход к структурному синтезу по методу сопряженных деревьев не изменяется. Учет структурных особенностей сводится к двум предыдущим случаям.

Передача полосная. Если пропуски полосной функции составляют два и более слагаемых подряд, в том числе в разных интервалах многочлена числителя, то подобные функции рассматриваются как сокращенные. Домножая полосные функции до ближайших функций со сплошным отрезком комплексной частоты полинома числителя, приходим к регулярной методике структурного синтеза на основе сопряженных деревьев.

Предельные структуры. Расширение структур трехполюсников, инвариантных по отношению к типу передаточной функции, осуществляется в рамках семимерных цепей и их сужений. Нижние и верхние пределы трехполюсников, эквивалентных по типу передаточных функций, при этом определены минимальной трехмерной цепью. Текущее трехмерное число узлов трехполюсников с любой передаточной функцией сопротивления изменяется в пределах:

$$n-\xi+1 \leq x(n,\xi,\rho) \leq 2n-\xi+1$$

в случае (2.4) и соответственно -

$$n-\xi+1 \leq x(n,\xi,\rho) \leq n+\xi-1$$

для (2.5). Пределы для минимального трехмерного числа резисторов при этом равны соответственно:

$$n-2\xi \leq g(n,\xi,\rho) \leq 2n-\xi-1, \tag{9.1}$$

$$n-2\xi \leq g(n,\xi,\rho) \leq n-\xi-1. \tag{9.2}$$

Максимизация трехполюсников по числу непараллельных реактивных элементов, предельно расширяющих передаточные свойства в рамках модели (7.3), имеет место в той же области числа узлов, что и для двухполюсников: $n-\xi+1 \leq x(n,\xi,\rho) \leq n+2$.

Структурнопараметрическая оптимизация. Оптимизации систем компонентных уравнений для трехполюсников по переменным n,ξ,ρ,u,v имеют место относительно тех же факторов, что и в случае двухполюсников. Вопросы функциональной полноты трехполюсников с заданным соотношением чисел реактивных и резистивных элементов также аналогичны случаю двухполюсников, поскольку порядок системы компонентных уравнений трехполюсников не превосходит этой характеристики для двухполюсников эквивалентного ранга.

10. Структуры многополюсные.

Семимерное преобразование. Цепи с многополюсниками формируются путем преобразований семимерных цепей, инвариантных относительно переменных семимерия, на основе эквивалентных схем замещения многополюсников. Индуктивные, емкостные и резистивные составляющие схем замещения при этом представляют собственные части исходных семимерных цепей и их частных случаев. Семимерные цепи не накладывают никакие органичения на типы схем замещения многополюсников. Преобразование семимерных цепей в цепи с многополюсниками представляет регулярный метод структурного синтеза цепей с произвольными многополюсниками.

Трансформаторный многополюсник. Формирование цепей с трансформаторами соответствует общему подходу преобразования семимерных цепей. Схемы замещения трансформаторов могут быть простейшими двухэлементными и сложными многоэлементными. Число трансформаторов в эквивалетных цепях зависит от схем замещения и переменных семимерия. В случае трехмерных цепей и двухэлементных схем замещения число трансформаторов изменяется соответственно дуальным формам (2.4), (2.5) в пределах:

$$0 \le t(n, \xi, p) \le n - \xi/2; \quad 0 \le t(n, \xi, p) \le \xi/2.$$

Равенства слева и справа имеют место для $n = 1,2$ и $p = n + \xi - 1$ ($x = 2n$, трансформаторы отсутствуют), а справа – для четных $n - \xi, \xi$.

Усилительный многополюсник. Общий подход к преобразованию семимерных цепей с усилителями не изменяется. Однозначное построение структурных аналогов с усилителями как невзаимными многополюсниками требует выбора входа-выхода. Число усилительных многополюсников в эквивалентных цепях также определяется схемами замещения и переменными семимерия. Применительно к трехмерным цепям и усилительным трехполюсникам число этих компонентов изменяется в пределах:

$$0 \le u^*(n, \xi, p) \le g - 1/2; \quad 0 \le u^*(n, \xi, p) \le g/2.$$

В первой формуле g нечетно, во второй – четно. Число g определяется формулами (9.I), (9.2).

Управляемые элементы. Структуры цепей с управляемыми источниками и гираторами непосредственно определяются цепями из двухполюсных компонентов путем структурных преобразований, инвариантных относительно n, ξ, p и других переменных семимерия. Для цепей передачи выполняется также эквивалентность по типу передачи. Структуры трехполюсников с источниками тока и гираторами определяются структурами продольных ветвей для цепей из двухполюсных компонент. Применительно к трехмерным минимальным цепям и любому типу передачи, реализуемой трехполюсником, текущее число источников тока i^* и гираторов j^* изменяется в пределах:

$$0 \le i^*(n, \xi, p) \le n - 1; \quad 0 \le g^*(n, \xi, p) \le n - 1.$$

Аналогичные оценки имеют место для трехполюсников с управляемыми источниками напряжения. В случае многопетлевых структур количество источников напряжения, контуров обратных связей и их структура, а также число самих активных трехполюсников являются функцией числа поперечных ветвей соответственных цепей из двухполюсных компонентов. Преобразования минимальных трехмерных и более сложных цепей как регулярный метод структурного синтеза распространяется на цепи с неоднородными активными элементами.

Произвольный многополюсник. Схема замещения произвольного многополюсника сама может представлять семимерную цепь определенной структуры и размерности. Структурный синтез цепей с таким многополюсником также реализуется в рамках семимерных цепей более общей структуры и больших значений размерности по переменным семимерия при инвариантности относительно фиксированных характеристик.

ВЫВОДЫ.

В данной работе в соответствии с темой, целями и задачами исследования разработана теория структурнофизического моделирования и синтеза электрических цепей. При этом получены следующие основные результаты.

1. Доказано, что электрические цепи и системы с сосредоточенными параметрами подчиняются регулярным структурнофизическим закономерностям. Закономерности не зависят от частных теоретических представлений и прикладных задач. Наиболее общей является семимерная закономерность. Она сужается к шести-, пяти-, четырех-, трех- и двухмерным закономерностям. Электрическая цепь определена в семимерном пространстве независимых структурнофизических координат. Каждое из семи измерений имеет конкретный структурнофизический смысл. Дан анализ сужений семимерного пространства, в которых определены более частные цепи. Структурнофизические закономерности представляют фундаментальный результат теоретической электротехники. В практическом плане это позволяет рекомендовать принципиально новую методологию проектирования, связанного со структурным синтезом.

2. Разработан структурнофизический метод исследования структур цепей и формализации закономерностей. Формализация закономерностей приведена к связанным системам пяти функциональных соотношений от семи независимых структурнофизических переменных и обобщенно в виде структурнофизической функции в семимерном пространстве. Формализованные закономерности дают возможность построить

и рекомендовать принципиально новую технологию структурного синтеза - фундаментальный структурнофизический синтез.

3. Установлено, что двухмерная закономерность сопряжена с фактом сохранения структуры и структурной линейностью двухмерных цепей по отношению к собственным сопряженным деревьям. Свойством структурной линейности обладают также трехмерные цепи. В практическом отношении это означает, что структуры, минимизируемые по числам реактивных и резистивных элементов, находятся только в этих классах цепей и заведомо известны при любом порядке системы.

4. Фундаментальный структурнофизический синтез охватывает любые обобщенные модели реализации технических устройств и систем по заданным операторам. Технология синтеза определена структурнофизическими закономерностями. Исходная информация абсолютно минимальная, так как не привлекаются никакие априорные представления, полностью исключаются ограничительные свойства частных подходов и методов. Это дает основание рекомендовать фундаментальный структурнофизический синтез в качестве единой базы построения автоматизированных систем синтеза.

5. Разработан метод сопряженных деревьев для структурного синтеза цепей из двухполюсных компонент, оптимизации структурных реализаций, решения перечислительных задач по заданным интегродифференциальным операторам состояния, входным и передаточным функциям. Структурные реализации удовлетворяют критериям минимальных значений двухмерных или трехмерных чисел узлов и элементов каждого физического типа. Метод не имеет ограничений по применению. Рекомендуется для автоматизированных систем синтеза.

6. Разработаны методы оптимизации структурного синтеза в рамках семимерной закономерности применительно к цепям из двухполюсных компонент, заданных интегродифференциальными и смешанными операторами, а также для двухполюсников и трехполюсников. Дан анализ связи этих методов со структурой моделей параметрического синтеза. Методы рекомендуются для автоматизированных систем синтеза.

7. Разработан метод структурного синтеза цепей с пассивными и активными многополюсными компонентами. Синтез сводится к преобразованию цепей из двухполюсных компонент в цепи с многополюсниками на основе эквивалентных схем замещения многополюсников. Семимерные цепи не накладывают ограничения на тип многополюсников,

схемы замещения, на смешанный тип компонентов, что важно при применении в структурном синтезе промышленно выпускаемых компонент. Метод рекомендуется для автоматизированных систем синтеза.

8. Фундаментальность структурнофизических закономерностей дает основание рекомендовать высшей школе ввести их изучение в обязательные программы по теоретической электротехнике, инженерной электрофизике, схемотехническим разделам аналоговой и цифровой электроники, другим смежным разделам технических дисциплин для специальностей электротехнического, радиоэлектронного и системотехнического профилей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Усынин В.И. Структуры цепей в САПР. - Киев: Вища школа, 1988. - 168 с.

2. Усынин В.И. Структура множества цепей. - Киев: Вища школа, 1980 - 102 с.

3. Усынин В.И. О некоторых формальных характеристиках электрической цепи // Кибернетика. - 1971. - № 5. - С.35-37.

4. Усынин В.И. Элементы множественного анализа электрической цепи. - В сб.: Вычислительная техника и энергетика. -Киев: ИЭД АН УССР, 1974. - С.17-20.

5. Усынин В.И. Алгебра цепей и анализ. - В сб.-: Математическое моделирование и теория электрических цепей. - Киев: ИЭД АН УССР, 1978, вып.6. - С.15-24.

6. Усынин В.И. Электрическая цепь как пересечение классов //Известия Академии наук Киргиской ССР. - 1971. - №6. -С.22-23.

7. Усынин В.И. Эквивалентность электрических цепей по типу // Известия Академии наук Киргиской ССР. - 1972. - №2. С.43-44.

8. Усынин В.И. О синтезе операционного преобразователя // Кибернетика. - 1974. - № 5. С.49-50.

9. Усынин В.И. Синтез двухполюсника на основе сопряженных деревьев. - В сб.: Математическое моделирование и теория элект-

рических цепей. - Киев. ИЭД АН УССР, 1974, вып.12. - С.146-149.

10. Усынин В.И. К определению числа собственных частот электрической цепи // Известия вузов. Энергетика. - 1975. - №3. С.113-116.

11. Усынин В.И. Степень дерева и ранг цепи. - В сб.: Математическое моделирование и теория электрических цепей. - Киев. ИЭД АН УССР, 1975, вып.13. - С.161-164.

12. Усынин В.И. Теорема единственности электрической цепи одного вида. - В сб.:Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1974, вып.2. - С.39-40.

13. Усынин В.И. Синтез цепи заданного ранга и минимальной размерности. - В сб.: Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1974, вып.2. - С.41-43.

14. Усынин В.И. Предельные двухполюсники. - В сб.: Математическое моделирование и теория электрических цепей. - Киев: ИЭД АН УССР,1975, вып.13. - С.164-167.

15.Усынин В.И. Структурное свойство единственности и реализация минимальных цепей. - В сб.: Электроника и моделирование. -Киев.:ИЭД АН УССР,1975, вып.9. -С.34-43.

16. Усынин В.И. Некоторые условия построения сопряженных деревьев при синтезе минимальных двухполюсников. - В сб.:Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, вып.10. - С.11-14.

17. Усынин В.И. Об эквивалентности минимальных цепей по рангу. - В сб.: Вычислительная техника и моделирование сложных систем в гражданской авиации. - Киев. Киевский институт инженеров гражданской авиации, 1975. - С.59-64.

18. Усынин В.И. Структурное свойство единственности цепи, минимальной относительно реактивной структуры. - В сб.: Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1976, вып. 13. - С.12-14.

19. Усынин В.И. Некоторые закономерности структур цепей. - В сб.: Математическое моделирование и терия электрических цепей. - Киев: ИЭД АН УССР 1978, вып.16. -С.21-24.

20. Усынин В.И. О потенциальной полноте двухполюсников. - В сб.: Вычислительная техника и моделирование сложных систем в гражданской авиации. - Киев: Киевский институт инженеров гражданской авиации, 1975. - С.65-68.

21. Усынин В.И. Оценка эквивалентных цепей. - В сб.: Электронное моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1977. -С.17-20.

22. Усынин В.И. Функциональная полнота цепей. - В сб.: Электронное моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1977. - С.12-16.

23. Усынин В.И. Минимальность аналоговых цепей относительно реактивно-многополюсных структур. - В сб.: Электрические цепи, сигналы, системы. - Киев: ИЭД АН УССР, 1979. - С.3-6.

24. Усынин В.И. Структурный инвариант минимальных нестационарных и нелинейных электрических цепей // Доклады АН УССР. Сер. А - 1983. - № 11. - С.81-82.

25. Усынин В.И. О построении интегрирующих электрических схем // Известия вузов. Электромеханика. - 1959 - № 9.

26. Усынин В.И. Об электрических схемах - аналогах изгибаемого стержня // Известие вузов. Электромеханика. - 1960 - № 7.

27. Усынин В.И. О некоторых электрических дифференцирующих схемах и их приложении к решению дифференциальных уравнений //Известия вузов. Электромеханика. - 1960 - № 9.

28. Усынин В.И. Дифференциальный анализатор с использованием трансформаторов // Известия вузов. Электромеханика. - 1961.- № 11.

29. Усынин В.И. Анализатор систем алгебраических уравнений, - В сб.: Электрическое моделирование. - Киев, 1962, вып.1.

30. Усынин В.И. Об электрическом моделировании интегральных уравнений. - В сб.: Электрическое моделирование. - Киев: КИИГА, 1962, вып.1.

31. Усынин В.И. Электрическая схема прибора для вычисления производных высших порядков и кратных интегралов функций одной переменной. В сб.: Электрическое моделирование. - Киев: КИИГА, 1962, вып.1.

32. Усынин В.И. О структурах трансформаторного анализатора обыкновенных дифференциальных уравнений. - В сб.: Вычислительная техника. - Киев. ИК АН УССР, 1962.

33. Усынин В.И. Принципы построения трансформаторных анализаторов дифференциальных, линейных интегральных и алгебраических уравнений. - В сб.: Труды второй межвузовской научно-технической конференции по электрическому моделированию. - Новочеркасск: Новочеркасский политехнический институт, 1962.

34. Усынин В.И. Трансформаторный дифференциальный анализатор линейных уравнений. Авторское свидетельство № 147370 с приорите-

том от 13.04.1961 // Бюллетень изобретений - 1962. - № 10.

35. Усынин В.И. Трансформаторный дифференциальный анализатор линейных уравнений с постоянными коэффициентами. Авторское свидетельство № 147369 с приоритетом от 13.04.1961 // Бюллетень изобретений. - 1962. - № 19.

36. Усынин В.И. Анализатор дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на трансформаторах тока. Авторское свидетельство № 149266 с приоритетом от 09.11.1961 // Бюллетень изибретений. - 1962. - № 5.

37. Усынин В.И. Применение метода итераций при моделировании рам с помощью четырехполюсных схем (на английском языке). - В сб.: Международная серия монографий по электронике. - Лондон: Пергамонпресс, т.30, 1965.

38. Усынин В.И. К обоснованию решения обыкновенных дифференциальных уравнений на электронных машинах непрерывного действия. - В сб.: Математическое моделирование и теория электрических цепей. - Киев: ИК АН УССР, 1966, вып.4.

39. Усынин В.И. к теории дифференциального анализатора. - В сб.: Математическое моделирование и теория электрических цепей. -Киев: ИК АН УССР, 1966, вып.1.

40. Усынин В.И. Об отношении натурального индекса к степени характеристического уровнения электрической цепи // Известия Академии наук Киргизской ССР - 1972. - № 1.

41. Усынин В.И. Применение теоретико-множественных понятий к формальному определению электрической цепи. - В сб.: Конструирование математических машин и устройств. - Киев: ИК АН УССР,1973.

42. Усынин В.И. О линейном функционально полном аналоговом преобразователе. В сб.: Вычислительная техника и энергетика. -Киев: ИЭД АН УССР, 1971.

43. Усынин В.И., Шибицкий В.П. О перечислении деревьев электрической цепи. - В сб.: Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1974, вып. 4.

44. Усынин В.И.,Шибицкий В.П. Множественные алгоритмы формирования уравнений линейных электрических цепей. - В сб.: Матаматическое моделирование и теория электрических цепей. - Киев: ИЭД АН УССР, 1975, вып.13.

45. Усынин В.И., Шибицкий В.П. Моделирование на ЭВМ в частотной области электронной цепи, определенный как бинарное отношение. - В сб.: Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1975, вып. 7.

46. Усынин В.И.,Шибицкий В.П. Множественный расчет передачи электронной цепи перечислением деревьев. - В сб.: Электроника и моделирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1975, вып.8.

47. Усынин В.И.,Шибицкий В.П. Моделирование электронной цепи в гибридном каноническом базисе с применением бинарных представлений. - В сб.: Анализ и машинное проектирование. - Киев: ИЭД АН УССР, 1980.

Личный вклад. Автор диссертации самостоятельно разработал теорию структурнофизического моделирования и синтеза электрических цепей, изложенную по совокупности результатов в индивидуальных публикациях / I-42/.

В соавторских публикациях / 43-47 / рассмотрены приложения ряда теоретических результатов, опубликованных в индивидуальных работах диссертанта, к решению конкретных вопросов компьютерного моделирования задач анализа и синтеза электрических и электронных цепей. Лично автору в этих работах принадлежит: в /43/ постановка задачи и метод решения, основанный на теоретических результатах, ранее опубликованных в индивидуальных статьях / 3,6,7,4I/; в /44-45/ постановка задач и метод решения, основанный на теоретических результатах и их развитии, ранее опубликованных в индивидуальных статьях /3,6,7,4I,4/; в /46/ постановка задачи и метод решения, основанный на теоретических результатах и их развитии, ранее опубликованных в индивидуальных статьях /3,6,7,4I,4,8,9/; в /47/ постановка задачи и метод решения, основанный на теоретических результатах и их развитии, ранее опубликованных в индивидуальных статьях / 3,6,7,4I,4,8,9,5/.

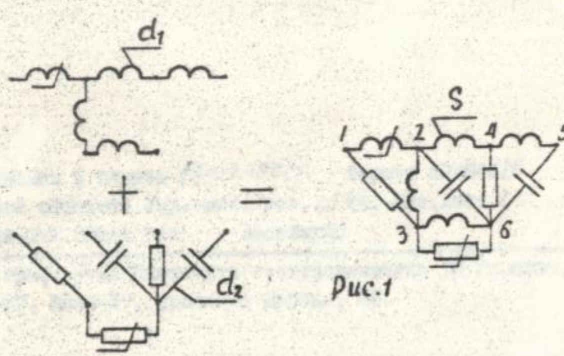

Рис.1

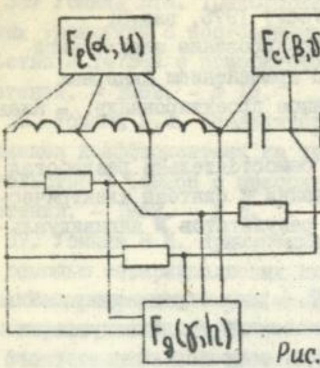

Рис.2

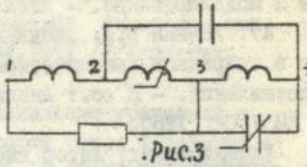

Рис.3

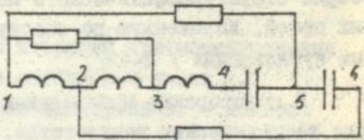

Рис.4

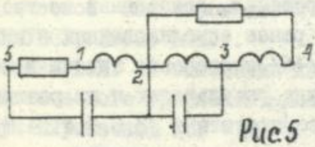

Рис.5

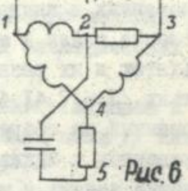

Рис.6

Ус

Подписано к печати 13.07.1992 г. Формат 60х84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист, 2,0 Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 120. Заказ 716. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.