

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Стенографический отчет

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.157.13
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

22 февраля 2002 года
Протокол № 11

Повестка дня:

Защита диссертации ФИЛАРЕТОВЫМ
Владимиром Валентиновичем на тему
**"Топологический анализ электрических цепей
на основе схемного подхода"**,
представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности
05.09.05 – Теоретическая электротехника.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор Миронов В.Г.
- доктор технических наук, профессор Бондаренко А.В.
- доктор технических наук, профессор Волгин Л.И.

Ведущая организация – Научно-исследовательский электромеханический
институт НПО "Антей"

Москва, 2002

Заседание диссертационного совета Д 212.157.13
 по присуждению ученой степени доктора технических наук
 22 февраля 2002 года, протокол № 11

№ п.п.	Фамилия, имя, отчество		Ученая степень и шифр специальности
1	Шмелев Сергей Константинович	председатель	д.т.н. 01.04.13
2	Герасимов Виктор Григорьевич	Заместитель Председателя	д.т.н. 05.09.05
3	Чобану Михаил Константинович	Ученый Секретарь	к.т.н. 01.04.13
4	Алексейчик Леонард Валентинович	член совета	д.т.н. 01.04.13
5	Булеков Владимир Петрович	член совета	д.т.н. 05.09.05
6	Бутырин Павел Анфимович	член совета	д.т.н. 05.09.05
7	Гусев Геннадий Григорьевич	член совета	д.т.н. 05.09.05
8	Диденко Валерий Иванович	член совета	д.т.н. 05.11.01
9	Желбаков Игорь Николаевич	член совета	д.т.н. 05.11.01
10	Кнеллер Владимир Юрьевич	член совета	д.т.н. 05.11.01
11	Курбатов Павел Александрович	член совета	д.т.н. 01.04.13
12	Малиновский Виталий Николаевич	член совета	д.т.н. 05.11.01
13	Миронов Владимир Георгиевич	член совета	д.т.н. 05.09.05
14	Немцов Михаил Васильевич	член совета	д.т.н. 01.04.13
15	Пищиков Всеволод Илларионович	член совета	д.т.н. 05.09.05
16	Покровский Алексей Дмитриевич	член совета	д.т.н. 01.04.13

Председательствующий - председатель диссертационного совета, доктор технических наук, профессор **С.К.Шмелев**.

С.К.Шмелев (председатель)

Разрешите начать работу совета, если нет возражений? Возражений нет, Из **18** членов диссертационного совета присутствуют **16**, по специальности рассматриваемой диссертации имеется **6** членов совета - докторов наук. Кворум имеется.

На нашем заседании присутствует гость из **Соединенных Штатов Америки**, профессор математики **Питтсбургского университета**, доктор **Синтия Вудберн**. Прошу любить и жаловать. Синти, пожалуйста, поучаствуйте в нашем заседании (*обращается к Синтии Вудберн по-английски*).

На повестке дня защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Филаретовым Владимиром Валентиновичем. Название диссертации "Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода". Специальность 05.09.05 "Теоретическая электротехника".

Работа была выполнена в **Санкт-Петербургском государственном техническом университете** на кафедре "**Теоретические основы электротехники**" и в **Ульяновском государственном техническом университете** на кафедре "**Электроснабжение**".

Научный консультант - доктор технических наук, профессор **М.А.Шакиров**.

Официальные оппоненты; доктор технических наук, профессор **В.Г.Миронов**; доктор технических наук, профессор **А.В.Бондаренко**; доктор технических наук, профессор **Л.И.Волгин**.

Ведущая организация - **Научно-исследовательский электромеханический институт НПО "Антей"**.

Если нет возражений, то мы принимаем к рассмотрению данную диссертацию и слово предоставляю ученому секретарю **Чобану Михаилу Константиновичу** для краткого доклада об основном содержании представленных документов. Пожалуйста.

М.К.Чобану (ученый секретарь)

Филаретов Владимир Валентинович, 1959 года рождения, родился 17 августа в городе **Ульяновске**. В 1982 году окончил с отличием **Ульяновский политехнический институт** по специальности "Радиотехника". В **1990** году получил ученую степень кандидата технических наук. Имеет **84** опубликованные научные работы, в том числе в журналах "**Электричество**" - **21**, "**Электронное моделирование**" - **3**, "**Известия высших учебных заведений**" - **3**, "**Electrical technology**" - **3**. Основные вехи трудовой деятельности Владимира Валентиновича. После того, как он был студентом **Ульяновского политехнического института**, работал там инженером, являлся аспирантом кафедры "Теоретические основы электротехники и общая электротехника", младшим научным сотрудником, научным сотрудником. Далее стал аспирантом кафедры "Теоретические основы электротехники" **Ленинградского политехнического института**, снова работал в должности научного сотрудника **Ульяновского политехнического института**, затем выполнял работу на должностях старшего преподавателя и доцента, проходил обучение в очной докторантуре **Санкт-Петербургского государственного технического университета**. В настоящее время работает доцентом кафедры "Электроснабжение" **Ульяновского государственного технического университета**. Проживает в городе **Ульяновске**. Все остальные документы также соответствуют необходимым требованиям.

С.К.Шмелев (председатель)

Имеются вопросы к **Михаилу Константиновичу**? Нет. В таком случае слово для доклада существенных и основных положений диссертации предоставляется соискателю ученой степени - Филаретову Владимиру Валентиновичу. Владимир Валентинович, 30-40 минут, пожалуйста.

В.В.Филаретов

Название диссертации: "Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода". В рамках этой темы была поставлена цель - разработка методологии символично-топологического анализа линейных стационарных электрических цепей с сосредоточенными параметрами. Для реализации поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи (*указывает на плакат 1*): 1) обобщение схемного подхода **Фойснера** для анализа активных электрических цепей; 2) разработка алгоритмов формирования оптимальных выражений символических схемных функций (ССФ) в произвольном базисе линейных элементов; 3) разработка методов анализа схем по частям.

Традиционные методы формирования ССФ, применяемых для анализа, синтеза и оптимизации электрических цепей, используют матричный, графовый или теоретико-множественный подходы (*показывает на плакат 2*). В этих подходах применяется отображение схемы матрицей, графом или структурным числом соответственно. Вместе с тем существует и еще один подход, который остался, однако, малоисследованным. Это так называемый схемный подход, который позволяет непосредственно от схемы, минуя промежуточные модели, перейти к ССФ, то есть получить прямое решение проблемы формирования ССФ.

Каковы же недостатки традиционных подходов к формированию ССФ? В общем случае параметр каждого элемента схемы содержится в четырех клетках матрицы узловых проводимостей: два раза с положительным знаком и два раза с отрицательным. Это приводит к появлению взаимно уничтожающихся слагаемых в выражениях ССФ, что влечет, как правило, к увеличению этих выражений в объеме, возрастанию погрешности при вычислениях на их основе. Графовый подход позволяет исключить избыточность при формировании ССФ для схем с двухполюсными элементами. Однако при анализе схем с управляемыми источниками такая избыточность возникает снова. Теоретико-множественный подход является по существу развитием матричного подхода, когда матрица кодируется списками элементов. При этом наследуются все недостатки матричного подхода. В схемном подходе мы имеем дело непосредственно со схемой и поэтому речь об избыточности идти не может.

Зарождение схемного подхода было выполнено в работах немецкого физика **Вильгельма Фойснера** в начале прошлого века (*указывает на плакат 4*). Фойснер использовал представление **Максвелла** для ССФ в виде отношения числителя и знаменателя $\Delta N/\Delta D$ (*указывает на формулу (1)*) и предложил способы разложения этих определителей. Вот выделение параметра u -ветви (*указывает на формулу (2)*), выделение параметра z -ветви (*указывает на формулу (3)*). Эти формулы подробно описаны в учебнике ТОЭ под редакцией **Петра Афанасьевича Ионкина**, но, к сожалению, в практике расчетов не нашли большого применения. Поэтому имеются

определенные сложности при объяснении предложенной методики, которая базируется на стягивании и удалении ветвей. Нижний индекс при символе Δ обозначает стягивание, а верхний - удаление соответствующих ветвей. Формулы (2) и (3) взаимно дуальные.

В литературе существует несправедливость по отношению к результатам *Фойснера*, поскольку его результаты обычно приписываются американцам *Персивалю* и *Мейсону*, которые выполнили аналогичные разработки спустя 50 лет после *Фойснера*. Определители простейших схем непосредственно вытекают из закона *Ома*, как показано на плакате 3. Желательно запомнить, что определитель z -петли равен z , определитель висячей z -ветви равен 1. Определители простейших усхем находятся по дуальности. Разложение исходной схемы выполняется до этих четырех простейших схем. На первом этапе выделяется, например, проводимость и получаются две менее сложные производные схемы. Далее с ними поступают аналогично рекурсивно до получения упомянутых тривиальных схем.

Недостаток подхода *Фойснера* состоит в том, что процедура нахождения числителя отличается от процедуры нахождения знаменателя и требует перечисления путей передачи. Нами в кандидатской диссертации было показано, что самый неэффективный способ разложения определителя - разложение по путям. Поэтому формула (5) (*указывает на плакат 4*) снижает ценность подхода *Фойснера* и наводит на мысль о его совершенствовании.

Чтобы избежать перечисления контуров и сделать процедуру нахождения числителя и знаменателя единой, нами введен идеальный схемный элемент, названный неудаляемым управляемым источником (НУИ). Почему он неудаляемый? Потому, как показано на плакате 5, генератор НУИ, обозначенный в виде спаренной стрелки, подобен как генератору напряжения, так и генератору тока. Аналогично этому приемник НУИ, обозначенный одинарной стрелкой, подобен как приемнику напряжения (вольтметру), так и приемнику тока (амперметру). Таким образом, вырождение НУИ наступает как при замыкании, так и при размыкании, его генератора или приемника. Вырождение схемы наступает в случаях, когда: 1) возникают бесконечно большие токи или напряжения; 2) значение тока или напряжения становится неопределенным (неопределенность вида $0/0$).

Введенный НУИ позволил получить схемные выражения для ССФ (*указывает на плакат 7*). Здесь показаны все передаточные и входные функции. Как видно, при нахождении числителей передаточных ССФ используется генератор НУИ и приемник НУИ. Входной источник заменяется генератором НУИ противоположной ориентации, а нагрузка - приемник тока или напряжения заменяется приемником НУИ. Затем находим определитель полученной схемы. Таким образом, задача нахождения ССФ сводится к разложению определителей двух схем. При этом исключается трудоемкое применение формулы (5).

В случае входных ССФ задача упрощается. В этом случае можно избежать применения НУИ, поскольку последовательное соединение генератора и приемника НУИ соответствует разомкнутой ветви, а их параллельное соединение эквивалентно короткозамкнутой ветви. На плакате 7 рассмотрены особенности включения НУИ. Вырождение схемы наступает как при замыкании, так и при размыкании, генератора или приемника НУИ.

Для выделения НУИ используются схемно-алгебраические выражения, которые показаны ниже. В результате мы к классическим простейшим схемам: z-петле, висячей z-ветви, u-петле, висячей u-ветви добавляем еще две простейшие схемы с одним НУИ. Определитель схемы, в которой генератор и приемник НУИ ориентированы согласно по отношению к одному из узлов, равен 1. В случае встречной ориентации генератора и приемника НУИ определитель равен -1.

Введение нового схемного элемента НУИ, кроме формулировки схемных выражений ССФ, позволило избежать применения для этой цели традиционной матричной алгебры и выполнять выделение параметров управляемых источников (УИ) всех четырех типов, как показано на плакате 9, то есть источника тока, управляемого напряжением; источника напряжения, управляемого напряжением; источника напряжения, управляемого током и источника тока, управляемого током. Общая формула имеет такой вид: определитель схемы, содержащей УИ (обобщенный параметр χ) равен сумме определителей двух схем. В первой схеме у нас вместо выделяемого УИ помещен НУИ, а именно, генератор УИ замещается генератором НУИ, приемник УИ замещается приемником НУИ. Вторую схему мы получаем в соответствии с физическими свойствами данного УИ, то есть источник тока и приемник напряжения размыкаются, источник напряжения и приемник тока стягиваются.

В частности, на плакате 8 показана некоторая схема, в которую помещен источник тока, управляемый напряжением. Определитель этой схемы получается по формуле (6) или по соответствующему так называемому схемно-алгебраическому выражению. Ниже показано, как выполняется нахождение передаточной ССФ по напряжению. Как найти числитель? Вместо независимого источника напряжения ставится генератор НУИ противоположной ориентации, а вместо вольтметра - приемник НУИ такой же полярности. Определитель полученной схемы является числителем. Знаменатель находится также, как характеристическое уравнение схемы, то есть источник напряжения стягивается, а вольтметр - приемник напряжения удаляется из схемы. Искомая передаточная функция находится как отношение $\Delta N / \Delta D$.

На плакате 10 показан пример анализа простой пассивной схемы с использованием разработанного подхода. Сначала находится ΔN , а затем - ΔD с помощью формулы (4). Ниже на этом же плакате дается пример анализа схемы с источником напряжения, управляемым напряжением. При этом используется формула выделения параметра такого УИ из второй строки плаката 9. Изложенное выше позволило обобщить традиционный схемный подход, сделать его более пригодным для использования в учебном процессе. Однако для сложных схем необходимо разработать такие методы, которые позволяют формировать выражения ССФ, оптимальные по вычислительной сложности. При решении этой задачи был использован алгоритм оптимальной свертки алгебраических выражений, известный из вычислительной математики. Алгоритм *Бройера* (1969 г.) основан на первоочередном вынесении за скобку символа с максимальным показателем участия. По аналогии с этим алгоритмом были установлены правила оптимального формирования ССФ: правило показателей участия, правило кратности и правило половинного деления. Предложенные правила позволили формировать оптимальные выражения ССФ непосредственно, то есть минуя трудоемкие процедуры получения развернутого выражения, как это делается в вычислительной математике, и

последующей его свертки. Нами в кандидатской диссертации было показано, что традиционный подход к формированию вложенных выражений не приемлем для анализа сложных схем. 10-20 узлов - это "потолок" для алгоритма свертки по **Бройеру**.

Использование правил формирования оптимальных выражений ССФ позволило многократно увеличить предельную сложность анализируемых схем и получить оптимальные выражения определителей для классических схем с полной, цепной и лестничной структурами. На плакате 12 показан пример схемы с четырьмя узлами, который использовался еще в работе **Кирхгофа** 1847 года, в работе **Максвелла** 1873 года, ..., то есть "любимая" схема. Для ее определителя было получено минимальное выражение, которое также приводится на плакате.

Плакат 14 содержит данные о числе операций умножения в символьных определителях полных схем с 4 - 6 и более узлами. При этом показано, что количество операций значительно меньше, точнее на много порядков меньше, чем количество операций в развернутых выражениях определителей. Следует отметить, что количество слагаемых-деревьев в развернутых выражениях определителей полных схем равно q^{q-2} (где q - число узлов), то есть весьма велико. Например, для полной схемы с 10 узлами количество деревьев равно 10^8 и, конечно, говорить о получении оптимального выражения для такой схемы на современных компьютерах традиционным путем не приходится. Между тем, именно алгоритм **Бройера** используется в оптимизирующих компиляторах с алгоритмических языков.

На плакате 13 показан пример использования правила половинного деления. В чем состоит это правило? Исходная схема делится на две подсхемы приблизительно одинаковой сложности. Аналогичным образом поступают с полученными подсхемами и т.д. рекурсивно до получения подсхем минимальной размерности. В работе доказано, что именно такой способ деления обеспечивает минимум операций умножения и сложения. За рубежом используется иной способ деления - способ наращивания. Кстати, этот способ был заложен еще в работе **Фойснера** и предусматривает выделение подсхем минимальной размерности в исходной схеме и производных от нее схемах. Используя этот способ, профессора **Гассон** и **Лин** из **Соединенных Штатов Америки** пришли к неверному заключению о невозможности формирования единых выражений, то есть выражений без операций присваивания, для числителей и знаменателей ССФ сложных электрических цепей. Нами это положение опровергнуто и показано, в частности, что количество вычислительных операций в выражениях определителей, сформированных в соответствии с установленными правилами оптимального синтеза, для цепных схем зависит линейно от числа звеньев.

Чтобы дополнить теорию формирования ССФ для полных схем в работе был рассмотрен специальный класс полных схем, так называемые полные уравновешенные схемы, удовлетворяющие условию равновесия **Уитстона-Новикова**. На плакате 16 показан пример анализа полной уравновешенной схемы с 5 узлами. Прежде всего необходимо преобразовать эту схему в эквивалентную звезду. Традиционные формулы, которые используются при решении этой задачи, - формулы **Новикова**, **Горева-Костенко**, содержат операции извлечения квадратного корня и обладают избыточностью. Нами показано, что в случае, когда независимые проводимости полной уравновешенной схемы образуют единственный контур,

иррациональные операции можно полностью исключить. Если в качестве независимых проводимостей используется подсхема с большим количеством контуров, то минимальное количество иррациональных операций равно числу этих контуров. Итак, в работе получены оптимальные выражения для ССФ полных уравновешенных схем, что потребовало общего решения классической задачи преобразования таких схем в эквивалентную звезду. Истоки этой задачи восходят к работе *Кеннелли* 1899 года.

Все сказанное касается формирования оптимальных выражений для схем с двухполосными элементами. Нас же прежде всего интересовали ССФ активных электрических цепей. Поэтому были разработаны эквивалентные схемные упрощения, дополнительные преобразования схем с УИ, которые способствовали бы получению оптимальных выражений ССФ таких схем и одновременно минимизировали бы объем требуемых выкладок. На плакате 17 представлена таблица, которая позволяет выполнять упрощение исходной схемы до того, как мы приступили к разложению ее определителя по формулам (2) - (4) или по формулам выделения управляемых источников, которые уже обсуждались на плакате 9. На плакатах 17, 18 и 19 как раз и представлены такие преобразования, компьютерная реализация которых обеспечила резкое сокращение вычислительных затрат и повышение качества формируемых выражений ССФ. Алгоритм формирования оптимальных выражений ССФ для активных электрических цепей приведен на плакате 20.

Эффективная реализация правила половинного деления в общем случае требует всесторонней разработки вопросов формирования ССФ по частям - диакоптики. Для этого вновь был использован введенный в работе схемный элемент НУИ. На плакате 21 представлены внешние характеристики трехполюсника, которые достаточны для его задания как "кирпичика" другой более сложной схемы. Искомые характеристики получаются как определители схем, образованных из рассматриваемой подсхемы путем подсоединения НУИ в различных комбинациях. Варианты реализации формулы деления на части по трем узлам, обобщающей формулу (4), представлены на плакате 22. Предложенные формулы отличаются от известных формул отсутствием в сомножителях взаимно уничтожающихся слагаемых, что влечет повышение точности вычислений.

Методы схемной диакоптики обобщены в работе на случай деления схемы по произвольному числу узлов. При этом количество параметров подсхемы минимально и равно числу слагаемых диакоптических формул. Проведено сравнение разработанных методов с наиболее эффективным для символьно-топологического анализа методом *Д-деревьев*, разработанным *Романом Васильевичем Дмитришиным*, который здесь у нас присутствует. Например, для задания подсхемы с 10 внешними узлами требуется свыше 1000000 *Д-деревьев* и всего 48620 миноров. Таким образом, метод *Д-деревьев* оказывается непригодным для деления схем по большому числу узлов. Практически более 7-8 узлов для реализации на современных компьютерах брать нельзя.

На плакате 23 представлены полные схемы с УИ, которые были использованы для тестирования предложенного алгоритма формирования оптимальных по числу операций вычитания выражений ССФ. В качестве пассивной подсхемы берется полная схема с 8 узлами (28 у-ветвей) и к ней подсоединяются четыре различных

комбинации УИ. Было проведено сравнение сформированных выражений с выражениями, полученными на основе матричных и графовых методов. Установлено, что количество операций вычитания в оптимальных по этому критерию выражениях во много раз меньше аналогичных операций в выражениях, полученных на основе модифицированного разложения Лапласа или разложения унисторного графа. В частности, для тестовой схемы №2 число вычитаний составляет 63 операции вместо 17 и 6 тысяч операций вычитания соответственно. Таким образом, имеет место резкое повышение устойчивости при вычислениях ССФ на основе предложенных оптимальных выражений.

На плакате 24 показан пример анализа полосового фильтра. Схема полосового фильтра используется в качестве тестовой в течение полутора десятилетий, начиная с работы *Стажика* и *Кончиковской* 1986 года. Полученная нами формула передаточной ССФ этой схемы заняла вторую позицию по вычислительной эффективности в мировом рейтинге формул, представленном на австралийском сайте *Бена Родански*.

Необходимо сказать, что эта схема полосового фильтра довольно проста, она делится на части по трем узлам. Более сложной является схема *Э.А.Лаксберга* (указывает на плакат 25), которая в 1973 году была применена для тестирования численных программ анализа, и только спустя пять лет стало возможным применить для анализа этой схемы программу топологического анализа *АС-7*, разработанную *Ю.И.Шапаловым* - учеником *Романа Васильевича Дмитришина*. Схема *Лаксберга* делится на части по четырем и пяти узлам, и в данной работе впервые получено полностью символьное выражение для этой схемы, поскольку результатом программы *АС-7* являлись полиномиальные коэффициенты ССФ в численном виде, то есть только один параметр - частота задавался в качестве символа.

Возможности разработанной методологии были опробованы на схемах в интегральном исполнении. Схема операционного усилителя $\mu A741$ (советский аналог 140УД7) представлена на плакате 26. Формула передаточной ССФ этой схемы, полученная нашей программой, сравнивалась с формулой - результатом программы *STAINS Бена Родански*, которая, судя по публикациям в Интернете, является наиболее эффективной среди программ символьного анализа. Так, объем предложенной формулы больше на 11%, но в ней отсутствуют операции деления, а число операций вычитания меньше в 3 раза, что повлекло увеличение точности вычислений на 4 порядка при незначительном уменьшении быстродействия.

В разработанной методологии единственная операция деления. Выражения для числителей и знаменателей ССФ не содержат операций деления. Дело в том, что мы имеем возможность задавать катушки индуктивными сопротивлениями, а конденсаторы - емкостными проводимостями. Это предусмотрено, наряду с заданием всех типов УИ и идеальных операционных усилителей, в пакете программ *SYMBOL*. Следует отметить, что существующие за рубежом программы символьного анализа непригодны для формирования гибридных выражений. Причиной этого, по-видимому, является то, что в качестве базы для известных программ обычно используется метод узловых напряжений. Контурно-узловые методы более сложны для формализации и компьютерной реализации.

Чтобы организовать "запасной аэродром" для разработанной методологии было предложено схемное отображение матрицы. Берется матрица произвольной

физической природы и отображается схемой с источниками тока, управляемыми напряжением. С этой схемой мы поступаем так, как с обычной электрической схемой, то есть все разработанные методы оказываются непосредственно применимыми для аналитического решения систем линейных алгебраических уравнений произвольной физической природы. Причем получаемые символьные выражения характеризуются высокой точностью. Это продемонстрировано в работе на плохообусловленных матрицах *Гильберта* и других матрицах, которые использовались для тестирования программного обеспечения машины "Мир" (язык *Аналитик*) в *Институте кибернетики АН УССР*. Как известно, язык Аналитик обеспечивал работу с неограниченной разрядностью. Так вот, одна из тестовых матриц девятого порядка требует для численного решения не менее 38 десятичных разрядов. Для вычисления по нашей формуле потребовалось всего лишь 15 знаков. Программа решения систем линейных алгебраических уравнений в символьном виде также включена в пакет программ *SYMBOL*.

В заключение подведу основные результаты работы. Разработан аппарат схемных определителей, альтернативный матричному аппарату. При этом числитель и знаменатель ССФ являются определителями двух схем - схемы числителя и схемы знаменателя. Разработаны методы выделения параметров, которые позволяют избежать появления взаимно уничтожающихся слагаемых в выражениях ССФ. Разработаны методы анализа по частям, свободные от ограничений на число внешних узлов подсхем и состав линейных элементов в подсхемах. Создана специализированная методология для символьного анализа полных уравновешенных схем. Полученные результаты реализованы в пакете программ для формирования оптимальных выражений ССФ и аналитического решения систем линейных алгебраических уравнений электрических цепей и уравнений произвольной физической природы.

Благодарю за внимание.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Теперь можно задавать вопросы соискателю. С вашего разрешения я начну. Владимир Валентинович, есть ли ограничения на классы схем, которые Вы анализируете? В частности, на нелинейные цепи, переходные процессы. Показано ли в Вашей работе, можете ли Вы сказать, решены ли в Вашей работе задачи, которые другими методами не решаются, вообще не решаются. Можете Вы ответить на такой вопрос?

В.В.Филаретов

Да, я в начале сказал, что мы ограничились рассмотрением линейных стационарных электрических цепей с сосредоточенными параметрами. В рамках этого класса были решены такие задачи, которые ранее вообще не подлежали анализу. В частности, впервые были разложены определители полных схем с 10-12 узлами, ранее о формировании определителей таких схем никто не помышлял. Потом эта популярная схема полосового фильтра. Для нее нами получена минимальная передаточная ССФ, которая была перепечатана в трудах международного симпозиума "*Символьный анализ и его применение в схемотехническом проектировании*" в

статье *Бена Родански*, как пример компактной формулы среди ряда методов и программ.

С.К.Шмелев (председатель)

Так... Пожалуйста, вопросы. Для членов совета, прошу называть фамилию, а для других присутствующих еще и организацию, которую они представляют. Я просто хочу сказать, как трудно бывает расшифровывать аудиостенограмму, когда до конца не распознаются голоса участников заседания.

В.И.Пищиков (член совета)

Скажите, пожалуйста, какие ограничения Вы видите, например по числу узлов, с учетом возможностей вычислительной техники и ее применения и т.д.

В.В.Филаретов

В рамках этого сравнительно узкого класса схем никаких ограничений я не вижу, поскольку в полном объеме реализована диакоптика, то есть без ограничений на число внешних узлов в подсхеме. Вот к примеру схема операционного усилителя $\mu A741$, блок-схема которой приведена на плакате 26. В ней 76 узлов и 26 транзисторов. Особой разницы не будет, если мы увеличим ее сложность на порядок. Наша программа с такой схемой справится. Это же относится к системам уравнений с разреженными матрицами. Другое дело полные схемы, эффективное деление их на части невозможно. У практических схем структура разреженная, что создает условия для их деления на слабо связанные одна с другой подсхемы. Мы делим такие схемы на части с использованием введенного правила половинного деления. Это приводит к резкому увеличению скорости разложения, сокращению числа производных схем, объема выкладок и количества операций в формируемых выражениях ССФ. Таким образом, каких-либо принципиальных ограничений мы не видим.

В.И.Пищиков (член совета)

Вы оптимистичны.

В.В.Филаретов

Мы хотим даже конкурировать с матричными методами в части не только точности вычислений, но и в части эффективности. Для этого, в частности, ведутся работы по созданию специализированных компиляторов на базе формируемых оптимальных выражений ССФ.

П.А.Бутырин (член совета)

Скажите, пожалуйста, Вы большое внимание в своем докладе уделили методу *Фойснера*. На четвертом плакате представлено классическое правило *Лапласа*, которое Вы почему-то называете методом *Фойснера*. Если *Фойснер* впервые применил правило *Лапласа* к электрическим схемам, то в чем его заслуга.

В.В.Филаретов

Заслуга *Фойснера* в том, что он применил эту формулу к схеме, а *Лаплас* - к матрице.

П.А.Бутырин (член совета)

Так в чем же специфика?

В.В.Филаретов

Специфика в чем? Матрица у нас не простая, а матрица схемы. А в матрице узловых проводимостей у-схемы параметр каждого элемента входит в четыре клетки. Правильно? Поэтому формула *Лапласа* должна применяться таким образом, чтобы убрать выделяемый параметр из четырех клеток матрицы.

П.А.Бутырин (член совета)

Нет проблем!

В.В.Филаретов

Хорошо, я продолжаю.

П.А.Бутырин (член совета)

Я удовлетворен. Второй вопрос. Вы сказали, что матрице линейной алгебраической системы можно сопоставить схему и использовать методы анализа этой схемы по частям, что внесет некий элемент новизны. Известны правило *Лапласа*, билинейная теорема, и т.д., позволяющие вычислять определитель с помощью миноров по частям. Ваш метод, очевидно, дает тот же самый результат или он дает некие новые математические закономерности, которые ранее не были известны. Если те же самые, то нет новизны, если новые, то почему Вы не отобразили это на языке математики?

В.В.Филаретов

В чем здесь тонкость... Еще в 17 веке был разработан аппарат определителей. В нем использовалась нумерация строк и столбцов. $(-1)^{i+j}$ - классическое правило знака. Нами же используется топологическое правило нахождения знака, а это позволяет минимизировать операции вычитания, то есть полученные выражения оказываются более устойчивыми к вычислениям. А недостаток классического правила знаков состоит в том, что по знаку определителя матрицы узловых проводимостей или контурных сопротивлений нельзя судить об устойчивости схемы. Возникает неоднозначность.

П.А.Бутырин (член совета)

Я Вас не так спросил. Вы сказали, что для любой матрицы, то есть не матрицы схемы, а матрицы вообще, с помощью схемы вычисляете определитель. Я спрашиваю, получите ли Вы тот же самый результат, что по правилу *Лапласа* или некий новый результат. Если тот же, то новизны нет, если новый, то это крупнейшее достижение.

В.В.Филаретов

В диссертации есть формула, которая позволяет избежать применения классического правила нахождения знака. Эта формула использует сравнение i и j , вместо того, чтобы их складывать. Если $i=j$, то перед параметром берется положительный знак, если $i \neq j$, то знак отрицателен. Таким образом, это принципиально другая формула. Она нами апробирована на тестовых матрицах. С точки зрения опубликования результатов в математических журналах, то до этого пока руки не дошли. Но с математиками, в частности, в *Астрономическом институте им. П.К.Штернберга* мы обсуждали этот результат. Они там нашу программу используют, что подтверждено соответствующим актом.

В.И.Диденко (член совета)

Скажите, пожалуйста, вот операционный усилитель и другие схемы часто содержат симметричные схемы, при анализе которых часто применяется теорема деления и ее модификации. Вот Вы как-то ее используете?

В.В.Филаретов

Теорему деления, которую предложил *А.А.Соколов*?

В.И.Диденко (член совета)

Ну, начиная с *Брука*, ее модификаций, наши разработки, в том числе и *Соколова*. *Соколовым* исследовались в основном симметричные схемы. Потом развивались частично несбалансированные схемы.

В.В.Филаретов

Я понимаю. Считаю, что это результаты частные. Мы решаем задачу в общем виде и нам нет необходимости какие-то специальные случаи рассматривать отдельно. Это общая теория, которая позволяет работать со схемами произвольной структуры и элементного состава. Если изучать отдельно тот или иной узкий класс схем, то возникнут непроизводительные затраты.

В.И.Диденко (член совета)

Понятно... А Вы что, коэффициент передачи на постоянном токе рассматривали, на низкой частоте?

В.В.Филаретов

Передаточную ССФ. Ее длина 35 кбайт. Все параметры этой формулы представлены в виде символов и частота в том числе. Эту формулу можно "обкатывать" потом многократно. В ней имеется информация о всех шести минорах данной схемы как трехполосника, способы получения которых изображены на плакате 21.

В.И.Диденко (член совета)

Ну и каждый транзистор Вы задавали какой-то схемой?

В.В.Филаретов

Да, была использована гибридная П-модель. Тест был скачан с сайта *Бена Родански*.

В.И.Диденко (член совета)

Практические параметры операционного усилителя Вас не интересовали, например, коэффициент ослабления синфазного сигнала, то есть Вы чисто академически рассматривали эту схему?

В.В.Филаретов

В чем была там проблема? Когда появляются параметры разного порядка, падает точность вычислений. Дело в том, что в матричном методе выбирается ведущий элемент и выполняется операция деления на него. Поэтому при разбросе параметров, например 10^7 , погрешность численного метода может оказаться недопустимо высокой. Мы же гарантированы по крайней мере, что оптимальные символьные выражения не подведут по этому показателю.

Как еще можно продемонстрировать точность формируемых выражений ССФ? Для схемы на плакате 26 были получены четыре модификации передаточной ССФ в соответствии с заданием резисторов и конденсаторов у- или z-ветвями: у-, z-, уз- и зу-выражение. Что удивительно, погрешности не было замечено даже в 17 десятичном разряде при производстве вычислений с удвоенной точностью. Если же Вы просчитаете эту схему методом узловых напряжений, а затем методом контурных токов, то Вы максимум что получите с точки зрения точности - это шесть верных разрядов, дальше будет мусор.

В.И.Диденко (член совета)

Мы, по правде говоря, считаем эту схему по методу приближенных вычислений и результат получается достаточно точным, но, думаю, это будет отдельным вопросом в дискуссии. Спасибо.

С.К.Шмелев (председатель)

Так, пожалуйста.

В.Н.Малиновский (член совета)

В развитие того, что говорил *Валерий Иванович*... Вы проводили сравнение эффективности расчетов Вашими методами по сравнению с известными методами, которые сегодня применяются на практике? Ведь эти усилители считаются уже не один год и даже десяток лет, пожалуй. Просчитываются, получаем хорошие результаты и мы живем. Вы получаете что-то новое по сравнению с этими результатами. Потом, ведь усилитель это очень многомерное устройство. У него есть, кроме коэффициента передачи, ряд других параметров, напряжение смещения, входные токи и т.д. Вот эти параметры учитываются Вашими методами, или взят только один параметр?

Второй вопрос, по плакату 16. Речь идет об оптимальных ССФ полных уравновешенных схем. В этих схемах нас обычно интересует чувствительность выходного сигнала по какому-то параметру, то есть при изменении какого-либо параметра. Например, чувствительность по напряжению. Вот такие характеристики Вы рассматриваете в своей работе?

В.В.Филаретов

По поводу того, что нового дают наши программы. Общее выражение, оно же всегда полезно. То, что они вручную считаются, эти схемы, и всех это удовлетворяет - это не совсем хорошо. Здесь подводится вычислительная база, получают очень точные выражения. Они могут использоваться в качестве моделей, многократно просчитываться с высокой скоростью. Может быть, сейчас, не имея такой общей модели, Вы какие-то варианты упускаете из рассмотрения. Мы даем Вам инструмент интеллектуальной поддержки проектировщика электро- и радиосцепей. Такой инструмент необходим, как необходимы уже широко используемые математические пакеты и системы: MATHEMATICA, MAPLE, MATLAB, MATCAD. Такие средства должны быть в распоряжении исследователя.

В.Н.Малиновский (член совета)

Так, а по другим параметрам?

В.В.Филаретов

По поводу параметров... Схемотехнические аспекты в работе не рассматривались. Обсуждаемая схема рассматривалась как абстрактная электрическая схема в разрезе ТОЭ, вычислялись только схемные функции.

По второму вопросу. Выражения ССФ для полных уравновешенных схем являются безыбыточными и требуют минимального числа операций извлечения квадратного корня. Здесь решена общая задача перехода от полного многоугольника к звезде, а для нахождения чувствительности следует продифференцировать соответствующее символьное выражение. Причем выражение оптимально и производные будут проще, чем при использовании традиционных формул.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Пожалуйста, еще вопросы.

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Можно я прежде, чем задать вопрос, уточню? На плакате 6, как я понял из доклада, первые два треугольничка означают, играют роль, источника Е. Один треугольничек играет роль закоротки. Берем следующую схемную функцию. Здесь генератор НУИ играет роль источника тока, приемник НУИ играет роль обрыва - вольтметра. Итак, один и тот же элемент играет роль источника Е, источника J, роль закоротки и роль обрыва. Теперь я иду к плакату 5 и решаю пример. Я уже забыл, где у меня источник Е и закоротка, как я могу сказать по этой схеме, что у меня определитель равен единице? Потому что здесь может стоять источник Е, а здесь может быть обрыв! Понятно? Или источник J и здесь закоротка. То есть каков смысл

введения новых обозначений источников? Человек должен помнить каждый раз, какую роль играет НУИ?

В.В.Филаретов

Ему это помнить не требуется. Он записал вот эти схемные выражения и далее подходит формально. Физические свойства источников и приемников учитываются в схеме знаменателя. Как известно, числители всех передаточных функций одинаковы.

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

На странице 65 диссертации Вы пишете о том, что для полных схем удобнее выражать функции цепей через проводимости. Однако для определителя полной схемы с тремя узлами z-выражение оказывается короче. Тогда о какой оптимальности может идти речь?

В.В.Филаретов

Согласен с Вами. Но полная схема с тремя узлами - это особый случай, исключение, которое подтверждает правило.

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ).

Тогда такой еще вопрос. Имеется ли критерий для задания элементов схемы проводимостями или сопротивлениями, то есть правило выбора способа задания?

В.В.Филаретов

Получение определителей простейших схем с НУИ рассмотрено в розданных методических указаниях. При нахождении передаточных ССФ и анализе схем с управляемыми источниками желательно помнить наряду с определителями простейшими z- и u-схемами эти две простейшие схемы с одним НУИ.

По поводу оптимальности задания параметров элементов схемы u- или z-ветвями. Всем известно, что при большем числе узлов, по сравнению с числом контуров, целесообразно задавать элементы сопротивлениями. В случаях когда числа независимых узлов и контуров различаются незначительно появляются возможности для формирования uz-выражений, в том числе и безразмерных. Гибридное задание параметров может оказаться более выгодным, по сравнению с однородным представлением.

Существует многообразие разбиений множества ветвей схемы на u- и z-ветви. Но какое-то разбиение или несколько разбиений оказываются оптимальными. На плакате 13 рассмотрены два способа задания параметров элементов для цепной схемы с четырьмя звеньями. Все продольные элементы мы можем задать либо сопротивлениями, либо проводимостями. Вследствие этого мы получаем разные выражения схемных определителей.

Сложность выбора разбиения в общем случае заключается в том, что структура схемы может быть произвольной. Однако нами предложено довольно общее правило. Оно гласит, что u-параметрами следует задавать элементы схемы, которые имеют минимальный показатель участия. Показателем участия ветви называется количество деревьев, в которые входит данная ветвь. Руководствуясь этим правилом, получено минимальное выражение для обсуждаемой цепной схемы.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Пожалуйста, **Владимир Юрьевич**.

В.Ю.Кнеллер (член совета)

Первое. У Вас в методическом пособии указано, что Ваш подход "открывает новые возможности для структурного синтеза электрических цепей", и ссылаетесь на книгу **Леонида Ивановича Волгина**. Вот что Вы имеете в виду, мне, кажется, что там вообще не используются системные функции? Второй вопрос? Считаете ли Вы, что это целесообразно давать студентам, стоит ли переходить на новый язык? Можете ли Вы подтвердить свои выводы опытом преподавания?

В.В.Филаретов

В упомянутой книге действительно рассматриваются методы структурного синтеза, которые не используют промежуточных математических моделей в виде матриц или графов. Схема поворачивается или инвертируется и т.д. В этом родство этих методов синтеза с разработанным схемным подходом. Цитируемую мною фразу **Леонид Иванович** приводит в своей книге, это его мнение.

Второй вопрос. Зачем вообще эта методичка и стоит ли вообще учить студентов на таком уровне? В нашем **Ульяновском техническом университете** жалуются выпускающие кафедры, в частности, кафедра "**Теоретические основы радиотехники**", на то, что студенты, защищая дипломные проекты, нередко оказываются не в состоянии записать передаточную функцию простейшего делителя. Они начинают соображать... вот тут надо уравнения составить, а если в схеме есть и u -, и z -элементы, то начинают преобразовывать к однородному базису, путаются. Наличие управляемых источников, особенно нерегулярных для узлового базиса, приводит, как правило, в замешательство. В связи с этим возникают нелестные замечания к нашей кафедре, чем же вы там занимаетесь и чему учите студентов.

В процессе таких полезных дискуссий пришло осознание необходимости преподавания этой методики. Следует отметить, что она преподается мной для самой слабой специальности, для машиностроителей. У них самый низкий проходной балл. И в общем-то они усваивают. Причем в качестве типового расчета дается схема примерно такой сложности, как схема, показанная на плакате 15. А на зачете часто даю полную схему с 4 узлами. Если человек не в состоянии получить для нее ССФ, то зачета он не получает. Это "нижняя планка", преодолеть которую необходимо каждому.

В.И.Диденко (член совета)

А делитель напряжения Ваши студенты рассчитать все-таки смогут? Это не так просто, у него есть входное сопротивление, выходное...

В.В.Филаретов

Я даю схемы и посложнее. Хотя, конечно, смотря какой делитель. С простейших делителей начинается изложение предмета, и далее идем от простого к сложному.

С.К.Шмелев (председатель)

Есть еще вопросы?

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Достаточно.

С.К.Шмелев (председатель)

Пожалуйста, **Александр Анатольевич**, только коротко.

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Можете ли Вы по виду схемы сразу же записать слагаемые ее определителя, все деревья?

В.В.Филаретов

Перечисление деревьев - это традиционный подход. В 1999 году была издана "**История электротехники**", там есть раздел, который написан **Владимиром Георгиевичем Мироновым**...

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Нет, это что-то Вы путаете...

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Не надо, не надо **Владимира Георгиевича!**

В.В.Филаретов

Нет, не путаю. Там как раз говорится, что перечисление деревьев не позволяет анализировать сложные схемы, а мы-то деревья не ищем. Этого делать ни в коем случае не следует.

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Почему нельзя?

В.В.Филаретов

Потому, что в этом случае выражение ССФ, например, для схемы операционного усилителя достанет до Луны!

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Но ведь мы можем сделать это для достаточно простой схемы с 3-4 узлами? Например, вот этой полной схемы с 4 узлами.

В.В.Филаретов

Да зачем нам находить эти 16 деревьев, когда можно в 10 раз быстрее и надежнее записать вложенное оптимальное выражение, которое, кстати, приведено на плакате 12!

А.А.Титов (к.т.н., доцент кафедры "Электрофизика" МЭИ)

Но почему нельзя просто найти эти 16 деревьев?

В.В.Филаретов

Деревья находили, грубо говоря, до того, как была выполнена данная работа. Наша заслуга как раз заключается в том, что мы, вслед за *Фойснером*, отказались от этого традиционного подхода. Нецелесообразность перечисления деревьев была выявлена еще *Фойснером*, который критиковал за это *Кирхгофа*. Формуле выделения z-ветви в этом году исполнится 100 лет. *Фойснер* в своей статье объяснял, почему топологический метод *Кирхгофа* не находит применения в практике расчетов и отсутствует в справочниках по физике. *Фойснер* обращал внимание на трудоемкость перечисления большого количества слагаемых, необходимость отбраковки некоторых из них при нахождении числителя и знаменателя. Это и побудило его предложить формулы выделения параметров. Беда наша в том, что мы вовремя на эти формулы не обратили внимание. Начали разрабатывать графовые методы, было опубликовано множество статей, книг, защищено диссертаций.

В этой связи хочу еще раз упомянуть раздел в учебнике *ТОЭ* под редакцией *П.А.Ионкина*, написанный *Владимиром Георгиевичем*. Там как раз все эти формулы приводятся (*показывает на плакат 4*). К сожалению, этот материал практически не нашел отражения в других учебниках по *ТОЭ*. Мне непонятно, почему людям больше нравится перечислять деревья, чем, выделяя элементы, записывать вложенные выражения, сокращая тем самым объем выкладок. Если бы в объеме учебника *ТОЭ* под редакцией *П.А.Ионкина* научная общественность владела методом *Фойснера*, то мне легче было бы объяснить свое обобщение. А так мне приходится объяснять, что такое удаление и что такое стягивание. В этом трудности восприятия моей методики. Иногда студенту легче оказывается объяснить, чем профессору.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Нет больше вопросов? Ну, можно будет выступить действительно во время дискуссии.

В.В.Филаретов

А можно я еще один момент проясню? Я только укажу страницу *П.А.Бутырину* и все. *Павел Анфимович*, по Вашему вопросу посмотрите, пожалуйста, страницу 150 диссертации.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо, Владимир Валентинович. Давайте будем по порядку. Спасибо большое. Я так понял, что вопросов больше нет. Тогда согласно процедуре... В диссертации, которая представлена, есть научный консультант - доктор технических наук, профессор *Шакиров*. Пожалуйста, *Мансур Акмелович*, Вы можете выступить.

М.А.Шакиров (научный консультант, д.т.н., профессор кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного технического университета)

Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета! Надо сказать, что представляемая вам Владимиром Валентиновичем работа была начата чуть ли не пятнадцать лет назад. В своей кандидатской диссертации он, работая по той же тематике над получением передаточных и входных схемных функций в символьном виде, шел другим путем. Диссертация докторская - это диссертация, которая действительно связана с использованием и обобщением вот этих формул (показывает на плакат 4). Два слова о том, что не затронул диссертант, но что очень хорошо отражено вот в этой книжечке, или вернее, диссертации, которую вам раздал Владимир Валентинович.

Вообще тот факт, что он так много поработал и т.д. характеризует его творческое лицо. Все, что он делает, он делает очень внимательно, досконально, доводит дело до конца. Это свидетельствует, так сказать, о его творческой потенции. Тема диссертации, она действительно чрезвычайно актуальна. Ряд международных симпозиумов. Это симпозиумы не очень далекого времени 1988-1998 годы и т.д. и многие из них действительно посвящены решению важных теоретических проблем получения символьных схемных функций в компактном виде.

Хотя Владимир Валентинович и не устает повторять, что класс рассматриваемых им цепей узкий, на самом деле речь идет о схемах с произвольной структурой и любым набором линейных элементов. В действительности речь идет о той базе, которая имеет место для линейных схем. По существу все элементы охвачены. Это, конечно, пассивные элементы, L- и C-элементы, все виды зависимых источников, идеальные операционные усилители, нораторы и нуллаторы. Вот такая проблема стоит. По этому поводу существует целый ряд тестовых задач. Это не придуманные задачи, а задачи, взятые из американских журналов. Вот в этой схеме я помню, по моему, 76 узлов. Это очень сложные электрические схемы. Честно говоря, посмотрев на эту схему, нельзя представить, что можно для нее получить полностью символьное выражение в более или менее обозримой компактной форме. Это представляется, так сказать, довольно-таки трудной задачей.

Итак, как решается эта теоретическая прежде всего проблема. Вот база. Здесь, действительно, есть совершенно замечательная книга *"Теоретические основы электротехники"* под редакцией **П.А.Ионкина**, где эти выражения приводятся (снова показывает на плакат 4). Я должен сказать, и это тоже характеризует портрет нашего уважаемого диссертанта. "Докопался" он до того, кто, будем говорить так, активно ввел в теорию цепей вот эти формулы. Они красиво выглядят, как-то даже необыкновенно. В учебнике **ТОЭ** они называются разложением по ветвям. Автор называет это выделением ветвей, так, как говорит **Фойснер**. Это 1906, по моему, год. Нет, 1902 год? Прошу прощения.

С другой стороны, если посмотреть на эти формулы, то это чисто билинейная теорема, которая у нас встречается. По билинейной теореме совершенно очевидно, что выделяемый параметр может присутствовать только в одной группе слагаемых. Значит, что не будет сокращающихся членов, не будет так называемых дубликаций. Это уже очень большое достоинство. Кроме того, бывает важно выбрать такую форму представления, чтобы она была действительно компактной. Как образно сказал

диссертант, формула может доставать до Луны, а может иметь длину, допустимую для занесения в компьютер.

Работа в общем-то делится на несколько интересных частей. Я кратко об этом скажу. Диссертант об этом очень много говорил, в вопросах это проявлялось. Первая часть - это пассивные схемы, где обрабатывается система введенных им параметров, которые, отвечая на поставленный вопрос, не отвечая, а дублируя автора, представляют собой пару норатора и нуллатора. Вместе это будет нулор или просто идеальный операционный усилитель. А вообще-то говоря, вот эти два элемента можно заменить идеальным операционным усилителем. Это соответственно его вход и выход.

Оказывается, если вы попытаетесь сформировать уравнения электрической у-схемы, где имеются нораторы и нуллаторы, то ее формируют обычно так. Сначала откидывают их и формируют без них. Когда вы учитываете нораторы и нуллаторы, вам необходимо сложить соответствующие строки или соответствующие столбцы. Вот эта операция соответствует получению миноров. Вот поэтому они здесь и появились. Фактически мы перешли на соответствующий минор. В том, что и здесь, и здесь неразличаются E и J скорее проявляется универсализм этого соотношения. Действительно, об этом помнить не надо, здесь все забывается. Просто фактически это норатор и нуллатор. Почему автор ввел НУИ. Да потому что в отличие от норатора и нуллатора ему еще надо увидеть направление. Вот чтобы, так сказать, навсегда не путать людей с этим делом, он ввел вот такие НУИ. Это методологическое понятие.

Самое, одно из самых ценных его достижений, заключается в том, что он распространил вот эту методику для активных схем. Это уже параметр любого управляемого источника. Так как их четыре штуки, плакаты все время как-то размножаются. Таким образом, теоретически автор эту проблему закрывает. Причем получает при этом оптимальные выражения, например по длине.

Дальше другой вопрос стоит. А если схемы очень сложные, то как применить эту методику. Автор говорит, что здесь нужно расчленять схему. К сожалению, при этом появляются дубликации. Вопрос об исключении дубликаций в этом случае, когда схема считается методом диакоптики, это, будем так говорить, проблема следующего пятидесятилетия, может быть. Но тем не менее эта часть у него тоже разработана. Наверное, я занимаю очень много вашего внимания. Позвольте заключить мое выступление тем, что я хочу сказать, что автор, по-видимому, все-таки заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук. Спасибо за ваше внимание.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Слово для оглашения заключений организаций, где выполнялась работа, а также оппонировавшей организации и отзывов, которые пришли в наш совет на автореферат диссертации Владимира Валентиновича предоставляется *Михаилу Константиновичу*. Пожалуйста.

М.К.Чобану (ученый секретарь)

Работа выполнялась в *Санкт-Петербургском государственном техническом университете* на кафедре *"Теоретические основы электротехники"* и в

Ульяновском государственном техническом университете на кафедре "*Электроснабжение*". Ведущая организация - *Научно-исследовательский электромеханический институт НПО "Антей"*.

Итак, выписка из протокола заседания кафедры *ТОЭ Санкт-Петербургского государственного технического университета*. В ней отмечается конкретное личное участие автора в получении результатов, предложенных в диссертации, степень достоверности результатов научных исследований и научная новизна. В разделе "Практическая значимость результатов" отмечено то, что разработана топологическая методика формирования ССФ, которая в отличие от традиционных матричных и графовых методик использует наглядные и наполненные физическим смыслом понятия, что во многом соответствует логике мышления специалиста по электро- и радиотехнике. И второе. Реализованы конкурентоспособные по точности и сложности анализируемых схем компьютерные программы, не имеющие аналогов в России, которые в отличие от известных зарубежных программ предусматривают задание пассивных элементов как проводимостями, так и сопротивлениями, формируют выражения ССФ без взаимно уничтожающихся слагаемых, что обеспечивает экономию интеллектуального труда научных работников и проектировщиков.

Отмечается также полнота изложения материалов диссертации в **35** работах, опубликованных соискателем, и ценность научных работ соискателя. Делается вывод о том, что диссертация является законченной научной квалификационной работой, которая отвечает требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней... и кафедра рекомендует диссертационную работу к защите в нашем совете. Заключение подписано зав. кафедрой *ТОЭ*, доктором технических наук, профессором **В.Н.Борониным**.

Вторая организация, где выполнялась работа, это кафедра "*Электроснабжение*" *Ульяновского государственного технического университета*. Здесь также отмечается конкретное личное участие автора в получении результатов, степень достоверности результатов. Отмечено также, что практические результаты диссертационной работы могут быть использованы всеми желающими и прозрачны для критики, поскольку свободно распространяются через Интернет-сайт. Отмечены научная новизна результатов диссертации, практическая значимость, полнота изложения материалов диссертации, ценность научных работ и делается вывод о том, что диссертационная работа является самостоятельной, завершённой, в ней разработаны методы, алгоритмы и компьютерные программы, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в теоретической электротехнике. Работа полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям и диссертация рекомендуется к защите в нашем совете. Заключение подписано зав. кафедрой "*Электроснабжение*", профессором **Л.Т.Магазинником**.

Отзыв ведущей организации подписан начальником отдела, кандидатом технических наук **В.А.Острожнским** и начальником сектора, кандидатом технических наук **Ю.В.Тимкиным**, утвержден главным инженером, кандидатом технических наук **В.К.Герасимовым**. В этом отзыве отмечается актуальность темы, значимость результатов диссертации для науки и производства, отмечается практическая значимость эффективной компьютерной программы формирования

ССФ электрических цепей. Разработанная программа в отличие от известных зарубежных программ предусматривает универсальное задание пассивных элементов. Предложено схемное отображение матрицы, позволяющее непосредственно использовать все разработанные в диссертации методы, алгоритмы и программы для аналитического решения систем линейных алгебраических уравнений электрических цепей и уравнений произвольной физической природы. Приводятся рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Понятия неудаляемого управляемого источника (НУИ), определителя и миноров схемы могут быть положены в основу решения задач диагностики и синтеза электрических цепей, потеснив традиционное использование матричных, графовых и теоретико-множественных представлений. Методика формирования схемных функций через схемные определители рекомендуется для широкого применения среди разработчиков аналоговой аппаратуры различного назначения и в составе автоматизированных рабочих мест. Делается вывод о том, что диссертация и автореферат имеют последовательное и цельное изложение. В диссертации на основании выполненных автором научных исследований разработаны эффективные методы, алгоритмы, программы и считается, что диссертация является законченной научной диссертационной работой, которая отвечает требованиям, предъявляемым ВАК. Отзыв рассмотрен на секции НТС.

С.К.Шмелев (председатель)

На автореферат пришло довольно много отзывов. Они все положительные, и с вашего разрешения ученый секретарь сделает акцент только на том, кем были подписаны данные отзывы, и какие в них высказаны замечания. Не возражает совет? Нет. Пожалуйста.

М.К.Чобану (ученый секретарь)

Итак, отзыв пришел из *редакции журнала "Радиоэлектроника"*. Подписан *главным редактором Я.К.Трохименко, заслуженным деятелем науки и техники Украины*, доктором технических наук, профессором. Все отзывы положительные, как уже отмечалось. Замечания. 1. В названии диссертации используется неточное в данном контексте слово "топологический". 2. Словосочетания "определитель схемы" и "минор схемы" являются жаргонными. 3. Не нашел освещения вопрос об операционных погрешностях.

А.М.Иваницкий, зав. кафедрой технической электродинамики и систем радиосвязи *Одесской национальной академии связи им. А.С.Попова*: 1. Следовало подчеркнуть факт отсутствия дубликаций при использовании метода полных деревьев. 2. На с. 22 и 24 автореферата необходимо было указать на отсутствие дубликаций в выражениях ССФ, полученных предложенными методами. 3. Не ясно, доказано ли в общем случае отсутствие дубликаций при наличии в схеме всех типов управляемых источников.

В.И.Анисимов, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор; *И.В.Герасимов*, зав. кафедрой "Системы автоматизированного проектирования" *Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета*, доктор технических наук, профессор; *Г.Д.Дмитревич*, доктор технических наук, профессор. Отзыв без замечаний.

О.Я.Новиков, почетный академик АЭН Российской Федерации, заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор; **В.Ф.Путько**, зав. кафедрой ТОЭ и физики плазмы Самарского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор; **Е.А.Рябихин**, кандидат технических наук, доцент: "Не ясно, распространяются ли предложенные методы на анализ цепей с нелинейными элементами".

Ш.Н.Хусаинов, зав. кафедрой ТОЭ Южно-Уральского государственного университета, доктор технических наук, профессор: "Не отмечено, насколько процесс выделения элементов менее трудоемок процесса перечисления контуров".

Ю.И.Лыпарь, профессор кафедры "Системный анализ и управление" Санкт-Петербургского государственного технического университета, доктор технических наук. Замечания. 1. Не рассмотрена возможность применения предложенной теории для компактного хранения информации в виде схем, вследствие чего сужается область применения этой теории. 2. Недостаточно разработаны вопросы использования предложенных методов для вычисления временных характеристик, что позволило бы применять реализованные соискателем алгоритмы более широко в проектировании электронных схем.

М.Г.Витков, профессор кафедры теории электрических цепей Московского технического университета связи и информатики, доктор технических наук. Отзыв замечаний не содержит.

Г.А.Белов, зав. кафедрой промышленной электроники Чувашского государственного университета, доктор технических наук, профессор; **В.Г.Захаров**, докторант, кандидат технических наук, доцент. Замечания. 1. Неясно, как использовать результаты работы для анализа переходных процессов в электрических цепях. 2. Высокая сложность символьных схемных функций недостижима для известных пакетов программ компьютерной алгебры. 3. Не затронуты вопросы синтеза линейных электрических цепей.

В.И.Воробьев, начальник кафедры теории электрических цепей и сигналов Военного университета связи, кандидат технических наук, доцент; **Б.А.Лапшин**, доктор технических наук, доцент: "В диссертации рассматривается широкий круг вопросов, связанных с анализом электрических цепей, но, к сожалению, в ней не нашлось места для рассмотрения, хотя бы вкратце, вопросов их синтеза".

В.В.Егоров, ведущий научный сотрудник Российского института мощного радиостроения, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Отзыв без замечаний.

Ю.А.Бычков, зав. кафедрой ТОЭ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, доктор технических наук, профессор; **Е.Б.Соловьева**, кандидат технических наук, доцент: "Отсутствуют количественные оценки эффективности предлагаемых методов при решении систем уравнений с плохо обусловленными и разреженными матрицами и вычислительной устойчивости формируемых схемных функций.

В.В.Ефимов, начальник кафедры автономных систем управления Военного инженерно-космического университета им. А.Ф.Можайского, доктор технических наук, старший научный сотрудник; **С.С.Скрябин**, кандидат технических наук, доцент. Замечания. 1. Неоднократно используются термины "оптимизация", "оптимальные", при этом не приводится ни одной оптимизационной постановки задачи и не

указываются методы, с помощью которых достигаются оптимальные значения параметров цепей. 2. В сформулированной цели работы не отражен прагматический аспект и не представлены конкретные количественные и качественные показатели практической ценности предлагаемой методологии по сравнению с существующими подходами.

В.С.Рогоза, профессор *Национального университета Украины "Киевский политехнический институт"*, доктор технических наук. Замечания. 1. Неправомерно утверждение (с. 9) о том, что матрица схемы, ее граф или структурное число препятствуют выявлению физической сущности поведения схемы и затрудняют получение символьной схемной функции. 2. Неясно, ограничился ли автор при доказательстве эффективности предложенных методов только тестовыми структурами или же удалось решить и такие задачи, которые не решаются другими методами.

И.В.Новаш, зав. кафедрой "Электротехника и электроника" *Белорусской государственной политехнической академии*, кандидат технических наук, доцент; **О.И.Александров**, кандидат технических наук, доцент. Замечания. 1. Не просматривается возможность использования большого количества программных средств традиционной ориентации для формирования символьных схемных функций. 2. Недостаточно рассмотрены вопросы синтеза схем на основе схемного подхода. 3. Не приведены перспективы применения схемного подхода при рассмотрении нелинейных цепей и цепей с распределенными параметрами.

Л.Х.Зайнутдинова, зав. кафедрой электротехники *Астраханского государственного технического университета*, член-корреспондент АЭН РФ, доктор педагогических наук, кандидат технических наук; **В.Н.Дмитриев**, кандидат технических наук, доцент: "Развитие предложенной методологии или хотя бы указание на возможность такого развития для других видов цепей, например, для цепей с распределенными параметрами, значительно повысило бы теоретическую и практическую значимость выполненной работы".

А.В.Булычев, зав. кафедрой электроснабжения *Вологодского государственного технического университета*, доктор технических наук, профессор; **В.Ф.Булавин** кандидат технических наук, доцент. Замечания. 1. Каковы перспективы использования предложенных автором методов для анализа нелинейных электрических цепей, а также для цепей с распределенными и переменными параметрами? 2. Каковы количественные показатели, характеризующие точность вычислений по предложенным методам в сравнении с известными матричными и графовыми методами?

И.В.Ерохов, доцент кафедры "Системный анализ и высшая математика" *Запорожского института государственного и муниципального управления*, кандидат технических наук: "Нельзя согласиться с мнением автора, что язык графов является промежуточным".

Р.В.Дмитришин, профессор кафедры "Основы электротехники и информатики" *Жешувского политехнического института (Польша)*, доктор технических наук: "Особенности матричных и графовых методов автор представляет как их недостатки".

В.Ф.Дмитриков, зав. кафедрой "Теория электрических цепей" *Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации*, доктор

технических наук, профессор. Замечания. 1. Не рассмотрено применение ССФ для расчета временных характеристик цепей. 2. Отсутствуют количественные сравнительные характеристики по трудоемкости метода схемных определителей с традиционными методами. 3. Термин "свертка" имеет иное толкование в математике и теории цепей.

В.В.Сотников, зав. кафедрой электромеханики и электроэнергетики *Марийского государственного университета*, кандидат технических наук, доцент: "Нет примера, характеризующего преимущества оптимальных выражений при раскрытии определителей плохообусловленных матриц".

С.К.Шмелев (председатель)

Значит, 20 отзывов. Владимир Валентинович, вам предоставляется слово для ответа на замечания и, если Вы уже отвечали на них в процессе ответов на вопросы после доклада, то можете опустить данные замечания.

В.В.Филаретов

Хорошо. Собственно я учел эти замечания частично в своем докладе. Много замечаний связано с областью применения разработанных методов. Спрашивают, почему я временную область не рассмотрел, почему нелинейные схемы сюда не подключил, почему я синтезом не занимался в диссертации. Потому что нужно было довольно глубоко копнуть... Дело в том, что задача формирования оптимальных выражений ССФ не была даже поставлена в теоретической электротехнике. Вопросы минимизации числа вычитаний для повышения устойчивости символьных выражений также не стояли. Потребовался большой объем работ и, естественно, расширять как-то, вставить новые задачи в цель работы не удалось.

Однако, следует отметить, что для анализа схем с нелинейными элементами возможно применение символьных выражений. У нас такие статьи есть. Этим нужно только заниматься. Построение временных характеристик на основе символьных схемных функций нетрудно осуществить, используя стандартные математические пакеты MATHCAD, MATLAB, MATHEMATICA и другие программные системы. Положительные результаты применения метода схемных определителей для решения базисной задачи диагностики были получены **Кургановым Сергеем Александровичем**.

Большинство замечаний являются, как бы, указателями и стимулируют дальнейшие исследования в данной области. Мы самым внимательным, внимательнейшим, образом к ним отнесемся и учтем в дальнейшей работе.

С.К.Шмелев (председатель)

Все, да? Спасибо. Если нет вопросов непосредственно по ответам на отзывы, то начинаем обсуждение диссертации. Предоставляется слово официальному оппоненту, члену нашего совета **Владимиру Георгиевичу Миронову**, доктору технических наук, профессору. Пожалуйста.

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Я очень сильно боюсь, что если буду анализировать эту работу, то увлекусь на несколько часов. Поэтому прошу разрешения не отвлекаться существенно от

напечатанного текста отзыва, поскольку для меня эта тема и близка, и весьма интересна. Можно так сделать?

С.К.Шмелев (председатель)

Пожалуйста, имеете на это право.

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Актуальность темы. Диссертация Владимира Валентиновича Филаретова посвящена разработке методов алгоритмов и программ символьного анализа линейных стационарных электрических и электронных схем на основе методики единого схемного подхода для любых передаточных и входных функций при произвольных типах схемных элементов. Символьный анализ, при котором искомые функции выражаются через буквенные, а не численные, обозначения, развивается уже много лет со времен *Кирхгофа* и *Максвелла*, поскольку имеет ряд преимуществ над численными методами. Здесь не все они перечисляются. Это большая точность вычислений, высокая эффективность многовариантных расчетов частотных характеристик, например, чувствительностей в диапазоне частот, построения уравнений регрессии, оптимизации и распределения допусков, оптимизации выхода годных схем, особенно с помощью метода *Монте-Карло* и т.д.

Несмотря на то, что история символьного анализа весьма длительна, в настоящее время отсутствует единая методология такого анализа, решены только частные задачи или задачи из одной подобласти теории цепей, получаемые функции во многом неоптимальны, в символьных функциях присутствуют дубликации - пары слагаемых, одинаковых по величине, но противоположных по знаку и т.д. Есть недостатки и в программном обеспечении символьных расчетов. Все это затрудняет применение символьного анализа, если он необходим. А необходим он бывает часто. Вопросы хранения в памяти ЭВМ символьных формул, использование внешней памяти для хранения части результатов, а проблемы ввода-вывода данных при этом могут заметно снизить эффективность расчетов, требуют дальнейшего развития.

В связи с изложенным выше тему диссертации, в которой решаются перечисленные задачи, следует считать актуальной, несмотря на то, что снова сейчас практически внедряются суперЭВМ уже, как говорится, по второму заходу.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 179 наименований (отечественных и зарубежных авторов), в том числе 58 публикаций автора, многие из которых напечатаны в центральных журналах. Подчеркну, что **21** статья в журнале *"Электричество"*. Практически все их пришлось рецензировать мне в свое время. Объем диссертации составляет (с приложениями, таблицами и т.д.) 279 страниц.

Основные новые научные результаты. В первой главе рецензируемой работы дан обзор состояния и проблемы схемного метода для определения символьных функций электрических цепей. На основании сравнения различных подходов автор показал, что для создания единой методологии наиболее пригоден схемный метод *Фойснера*, труды которого, к сожалению, мало известны и не только на территории *СССР*, но даже в самой *Германии*. Этот метод обеспечивает универсальность, вычислительную точность и возможность реализации параллельных вычислений. При этом не требуется формирование уравнений цепи, матриц, графов и т.д. Очень важно, что в

этом случае схемные функции записываются не как отношение полиномов в виде сумм произведений параметров цепи, именно такую форму в основном дают известные методы, а в виде свернутых скобочных выражений, где учтены общие сомножители и отсутствуют операции деления. Кроме того, для большинства схем устраняются дубликации, за исключением диакоптики, что упрощает вычисления и повышает их точность, позволяет оптимизировать искомые схемные функции по числу вычислительных операций и точности. Далее автор показал пути развития символьного анализа на основе результатов *Фойснера*.

Вторая глава посвящена ключевому вопросу символьного анализа - формированию оптимальных выражений функций для пассивных схем. Рассмотрена схема упорядочения, получаемая из исходной схемы путем преобразования независимого источника возбуждения в управляемый источник. Введен новый схемный элемент - неудаляемый управляемый источник (НУИ) - вот тут была дискуссия. В результате достигается основная цель - схемный подход к формированию функций цепи в скобочной форме. Предложен алгоритм свертки алгебраических выражений, основанный на первоочередном вынесении за скобки символа с наибольшим показателем участия, то есть с наибольшим числом слагаемых в которые он входит - автор об этом ничего не сказал.

Повышение эффективности формирования формул обеспечивается учетом взаимно однозначного соответствия между преобразованиями алгебраического выражения и изменениями в топологии схемы.

Разработанный алгоритм формирования функций на схемном уровне в отличие от алгоритма свертки обеспечивает выбор не только одиночных символов, но и подвыражений, которые имеют наибольшую трудоемкость по числу операций, в частности, мультиветви и макроветви.

Отдельно рассмотрены полные схемы - между каждой парой узлов имеется ветвь. Дана модификация алгоритмов формирования оптимальных функций для этого случая. Также рассмотрены цепные, лестничные, полные уравновешенные схемы и их функции. Рекомендовано деление на у- и z-ветви, что дает дополнительный выигрыш в числе операций, как показано на плакате 12.

Автор использует понятие ядра и постоянных узлов, которые полезны при анализе многополюсников. Многообразие ядер порождает множество решений задачи преобразования и, в конечном итоге, определения функций. Оптимальные выражения эквивалентных схем получаются по любым независимым параметрам исходной схемы. Сформулированы правила формирования оптимальных выражений для преобразований в звезду. В целом в данной главе разработаны основы универсальной методологии формирования оптимальных выражений функций для схем без взаимной индукции.

Многочисленные примеры убедительно доказывают преимущества схемного подхода над известными по оптимизации функций и вычислительной эффективности.

В третьей главе изложена методика формирования оптимальных функций для активных электрических цепей, то есть цепей с управляемыми источниками и операционными усилителями. Для этого введены эквивалентные упрощения схем с управляемыми источниками, использованы преобразования управляемых источников в квазипассивные двухполюсники и их выделение. Разработан алгоритм разложения определителей электрических и электронных схем в общем случае и исследованы

способы нахождения знака определителя невырожденной схемы, методы стягивания и удаления ветвей, параметров управляемых источников, в том числе висячих и вырожденных, минимизации операций вычитания. Предложены инженерные методики формирования схемных функций, которые используют только минимальный набор базовых понятий и опираются на схемные представления. Обосновано применение правил формирования оптимальных по сложности выражений схемных функций в общем случае.

На многочисленных примерах показаны достоинства алгоритма по сравнению с известными.

Последняя глава работы посвящена определению схемных функций сложных схем путем деления их на более простые (диакоптический подход). При этом деление производится рассечением узлов и получения подсхем. Для подсхем определяются миноры, которые затем должны быть объединены, исходя из условий связи подсхем. Доказано топологическое правило нахождения знака при объединении подсхем; получены формулы бисекции без знаков вычитания, которые достигаются ценой усложнения процедуры нахождения параметров графов подсхем. В методе миноров подсхем число слагаемых минимально и равно числу миноров подсхемы. Правило объединения частных результатов для подсхем согласуется с общей методикой схемного подхода. Анализ по частям иллюстрируется весьма впечатляющими примерами.

Практическая ценность полученных результатов. Разработанный автором единый методологический подход к формированию входных и передаточных функций линейных стационарных электрических и электронных схем с любыми элементами весьма удобен для обучения и позволяет сделать этот подход реальным инструментом символьного анализа, в том числе и сложных схем. Методика анализа позволила создать универсальное программное обеспечение для реализации анализа на ЭВМ. Автор разработал несколько вариантов машинных программ символьного анализа, которые свободно распространяются через Интернет. Это весьма полезная добавка к используемым численным программам, которая может обеспечить наиболее эффективные расчеты. "Ниша" этих программ - разнообразные виды многовариантных анализов, а также (для не самых сложных схем) получение аналитических выражений для чувствительности схем к изменениям параметров, анализа устойчивости и т.д.

Разработанные автором программы внедрены в ряде вузов в учебный процесс и НИР (восемь актов внедрения) и на предприятиях (2 акта). Результаты внедрения подтвердили эффективность программного обеспечения и, следовательно, методики, лежащей в его основе.

Подтверждение корректности и точности полученных результатов. Корректность и точность полученных результатов следует из строгих, логически обоснованных доказательств теоретических положений диссертации и из сравнения результатов расчетов многочисленных тестовых примеров по разработанным программам. Расчетные результаты, полученные автором, совпадают с известными, а затраты вычислительных ресурсов существенно меньше при большей точности.

Замечания по работе. 1. Автор настолько "влюблен" в свой метод, что предлагает изучать в ТОЭ вначале его для простых цепей, а затем уж законы Кирхгофа, которые затемняют его. Это положение крайне неверно, поскольку без знания контурных

токов и узловых потенциалов студент не сможет понять, например, что такое схемная функция многополюсника в базисе токов и напряжений сторон, которые являются по сути контурными токами и разностями потенциалов. Кроме того, нужно уметь считать и другие режимы, например переходные процессы.

2. Говоря об оптимальности схемных функций, автор ограничивается частными случаями. Всегда ли числитель и знаменатель передаточной функции допускают одно оптимальное решение? Могут ли быть квазиоптимальные формулы, по вычислительным затратам близкие к оптимальным?

3. В работе рассматриваются только идеальные операционные усилители и говорится об устойчивости схем, которую можно установить из определителя. Однако идеальная модель ОУ не дает правильной оценки устойчивости; это можно точно сделать только, учитывая нелинейные параметры ОУ - насыщение выходного напряжения и ограниченную скорость его нарастания.

4. Автор неоднократно говорит о ручном анализе довольно сложных схем с помощью не уравнений, а интеллекта. Здесь была уже развита короткая дискуссия в этом духе. Такие мнения возникают часто и у наших преподавателей. С этим никак нельзя согласиться: известно, что интеллектуальное время несравнимо дороже машинного.

5. Раздел "Практическая значимость результатов" написан как продолжение темы об актуальности. Практические достижения не сформулированы, хотя они и есть в достаточном количестве.

6. Автор утверждает, что в методах исследования он использовал элементы теории комбинаторного анализа и математической логики. Однако, какие это элементы и где использовались, понять из текста диссертации нельзя.

7. Отсутствуют пояснения, как хранится символьная информация при использовании персональных компьютеров. Для сложных схем она не может разместиться в ОЗУ и тогда нужны внешние устройства памяти. При этом обмен данными с внешними устройствами может существенно снизить всю эффективность расчетов.

8. Аналогичное замечание справедливо и для методов диакоптики. Организации хранения информации автор не уделяет должного внимания.

Заключение о работе. Работа выполнена на весьма высоком теоретическом и практическом уровнях. Ее можно рассматривать как новый крупный вклад в актуальную проблему топологического анализа электрических цепей. Значение этого вклада состоит в разработке нового символьного метода анализа электрических цепей на базе схемного подхода, когда полиномы передаточных функций выражаются вложенными по Фойснеру, то есть с вынесенными за скобки общими множителями. Для ряда применений разработанное методическое и программное обеспечение имеет существенные преимущества по сравнению с известными.

Диссертационная работа Филаретова Владимира Валентиновича, безусловно, заслуживает высокой оценки и удовлетворяет всем требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор работы заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук. Спасибо за внимание.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо, ***Владимир Георгиевич***. Есть вопросы к ***Владимиру Георгиевичу?***

В.И.Пищиков (член совета)

Владимир Георгиевич, Вы согласны с этим названием "Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода"? Я акцентирую внимание на слове "топологический". Где тут топология?

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Вопрос о названии довольно сложный. Во-первых, не очень хорошо звучит "схемный подход". Неясно, что это такое. Топологический анализ присутствует тут неявно. Если бы схемы отображались графами, то тогда топологический подход. Поскольку они графами не отображаются, то аналогия какая-то напрашивается топологического подхода. Я называю его "символьным".

С.К.Шмелев (председатель)

"Символьный" присутствует в термине "символьная схемная функция". Владимир Валентинович, Вы можете ответить на те замечания, которые сделал официальный оппонент.

В.В.Филаретов

По поводу названия "топологический"... Много споров было, действительно. Но тем не менее схема является топологическим объектом, схема является топологическим объектом, а мы выполняем преобразования этой схемы, связанные с удалением и стягиванием ее элементов. Поэтому тут топология присутствует.

Теперь в отношении замечаний. По поводу первого замечания. Все же законы **Ома** и **Кирхгофа** следует излагать до метода схемных определителей, что собственно в методичке у меня и сделано, а вот методы узловых напряжений и контурных токов... Их можно излагать потом, если останется время.

Второе замечание. Говоря об оптимальности выражений схемных функций, имелось ввиду не математическое оптимальное решение, а скорее, техническое. Конечно же получаются квазиоптимальные и близкие к оптимальным выражения. Поэтому я согласен с этим замечанием.

По третьему замечанию. Мы судим об устойчивости схемы по знаку топологического определителя, что невозможно сделать по знаку определителя матрицы контурных сопротивлений и узловых проводимостей, как указано в монографии **"Хейнлейн и Холмс. Активные фильтры для интегральных схем"**.

Четвертое замечание. С ним согласен... Действительно, но тут спорный вопрос. Чему же тогда учить студента? Он не сможет рассчитывать схемы, если мы будем давать ему такие стандартные программы. Все равно таблицу умножения и какие-то правила формирования схемных функций он должен знать.

С пятым замечанием согласен. Шестое замечание. В работе использованы, действительно использованы, элементы комбинаторного анализа и математической логики. Вторая глава, она вся построена на комбинаторике. Вот эта таблица - показатели оптимальных формул (*указывает на плакат 14*). Они были сначала предсказаны, а только потом технически получены на компьютере **Дмитрием Владимировичем Шеиным**, который являлся автором первой версии программы

формирования оптимальных схемных функций. Потом я эту программу обобщил для анализа схем с управляемыми источниками.

Элементы математической логики присутствуют сплошь в четвертой главе, поскольку для кодирования параметров подсхем используются двоичные векторы и соответственно двоичные операции над этими векторами: сложение, умножение и дополнение.

Насчет организации хранения информации. По мере получения формулы она записывается на жесткий диск, что не было возможно при традиционной реализации алгоритма свертки по *Бройеру*. Там требуется вначале выражение развернуть, а потом свернуть. Поэтому анализ схем ранее был ограничен схемами с 10 узлами. Все, я закончил.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Продолжаем. Слово предоставляется официальному оппоненту - доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой автоматике и электротехники ***Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета Бондаренко Анатолию Васильевичу.***

А.В.Бондаренко (официальный оппонент)

Работа Владимира Валентиновича, вообще говоря, не такая простая, как кажется на первый взгляд. Действительно, на первый взгляд что это такое... Линейная цепь, очень узкий класс цепей, отвечающих требованиям такой линейности. Подсчитать системную функцию. Определить ее в общем виде. Как будто на первый взгляд все просто. Но когда начинаешь разбираться в принципах построения таких систем, вычисления этих функций, затрат, требованиях к оптимизации, чувствительности, допускам и так далее, возникают серьезные проблемы. Эти проблемы были предметом обсуждения между нами в течение примерно года. Кое-что здесь исправлено, изрядно исправлено. Кое-что все-таки Владимир Валентинович оставил, посчитал как автор, что он имеет право на такое понимание.

Актуальность проблемы. Диссертационная работа Филаретова Владимира Валентиновича посвящена решению ряда ключевых научно-исследовательских, инженерно-технических и методологических проблем в области теоретической и прикладной электротехники и электроники, связанных с разработкой новых, развитием известных и практической реализацией оригинальных способов формирования символьных схемных функций (ССФ) линейных электрических цепей. При этом особое внимание уделяется как развитию собственно методологии символьно-топологического анализа стационарных систем на основе схемного подхода, так и сопутствующим требованиям при формировании ССФ, оптимальных по вычислительным затратам и устойчивости.

Существующие в настоящее время методы и принципы формирования системных характеристик (даже для простейшего - линейного и стационарного варианта моделей) еще не в полной мере отвечают постоянно возрастающим требованиям, предъявляемым к разветвленным электро- и радиотехническим цепям, ориентированным, как правило, на интегральную технологию, по допустимой сложности их описания, точности и достоверности получаемых результатов,

возможности применения ЭВМ с ограниченными ресурсами при реализации поставленных задач технического, технологического, эксплуатационного и экономического аспектов их проектирования. Продолжает существовать постоянная необходимость в дальнейших теоретико-прикладных поисках практических алгоритмов анализа, диагностики и синтеза сложных аналоговых селективных структур с использованием ЭВМ средней мощности.

Теоретическая электротехника и ее важнейшая составная часть - теория электрических (радиотехнических) цепей и систем существенно определяют современный прогресс в прикладных технических направлениях. В последнее десятилетие все более весомыми и значимыми становятся символьные методы анализа, диагностики и проектирования линейных цепей и систем, позволяющие не только наглядно представить функционирование цепи, оценить функции чувствительности к параметрам элементов схемы, произвести параметрическую оптимизацию, но и определить пути структурного синтеза, обеспечить необходимую точность моделирования вариантов решения.

В свете сказанного предложенные в диссертации теоретические положения и рекомендации, а также разработанные на их основе алгоритмы анализа и проектирования аналоговых линейных стационарных цепей и систем при их символьном представлении заслуживают одобрения. Отсюда следует, что актуальность темы диссертационной работы Филаретова, обусловленная потребностями науки, техники и методологии обучения специалистов в создании работоспособных методик анализа и проектирования линейных активных схем при широком использовании средств и возможностей современной вычислительной техники, - не вызывает сомнения, а научное направление, избранное автором работы, является перспективным.

Новизна исследований и полученных результатов. Среди основных научных результатов, полученных автором диссертации следует считать разработку новых и развитие ряда существующих теоретических принципов топологического анализа ССФ линейных цепей на основе схемного подхода. Автором разработаны топологические приемы выделения параметров, включающие использование неудаляемых управляемых источников (НУИ) и методов стягивания и устранения ветвей схемы, что позволило повысить устойчивость к вычислениям и приблизиться к минимуму числа операций вычитания, связанному с основными погрешностями вычислений с помощью ССФ.

Несомненной заслугой диссертанта является разработка вариантов диакоптики схемы на две подсхемы и т.д. с их последующим объединением, причем сомножители диакоптических выражений не содержат дубликаций. На основе сформулированных принципов отбора элементов и подсхем удалось избежать преобразования полученного развернутого выражения ССФ с его последующей сверткой, что значительно сократило время анализа сложных структур.

Широко используя единый схемный подход к выводу ССФ, автор получил близкие к оптимальным выражения для структур частного вида: лестничных, цепных и полных многоугольников с идеальными операционными усилителями и источниками тока, управляемыми напряжением. Результаты анализа тестовых схем выгодно отличаются от их известных публикаций.

Важным научным результатом является разработка топологических методов формирования ССФ для полных уравновешенных конфигураций без использования промежуточных математических моделей. Получаемые ССФ в случае многоконтурных подсхем с независимыми параметрами ветвей (ядер) содержат минимальное число иррациональных операций.

Использование плодотворных теоретических концепций и подходов к анализу цепей позволило успешно решить ряд важных практических задач: получение схемного отображения матрицы с преимуществами при раскрытии определителей плохообусловленных матриц высоких порядков; создание пакета программ ***SYMBOL*** для формирования ССФ и решения систем линейных алгебраических уравнений в аналитическом виде; рассмотрение интересных конкретных примеров и задач. Результаты работы можно распространить на линеаризованные модели и цепи со слабыми нелинейностями для предварительных оценок.

Выводы по отдельным разделам диссертации в целом достаточно убедительны и представляют несомненный интерес при анализе, оптимизации и проектировании сложных линейных цепных структур.

Тем не менее, по содержанию и материалам работы необходимо сделать ряд замечаний и рекомендаций.

1. Автор излишне строго противопоставляет схемный подход к широко используемым альтернативным представлениям структур: графовым, матричным и теоретико-множественным. С одной стороны, основной объем диссертации занимают цепи с двухполюсными элементами, что полностью изоморфно соответствующему графу. Поэтому то, что здесь о топологии говорилось - это, в общем, граф нарисован, поскольку он простейший граф использует с двухполюсными элементами. С другой стороны, автор сам часто апеллирует к матричному представлению, а то и прямо использует его для обоснования его подхода, особенно в последних разделах. То есть без матрицы он обойтись не может. С одной стороны, матрица - это промежуточный этап, а на самом деле автор очень широко их использует. В той градации, которая представлена в таблице 1.1, а там так: матрица - символьная схемная функция, графовый подход - символьная схемная функция, автор упирает, что все время нужно переходить к схеме. Я считаю, что в таблицу необходимо ввести еще один пункт: граф - ССФ (без необходимости использования схемы), так как процесс проектирования структур, что намного сложнее их анализа, и начинается именно с построения простейших топологических вариантов. Схемный является лишь вторичным, обусловленным конкретным базисом. Так что имеет смысл говорить лишь о дальнейших исследованиях и модернизации известных идей и принципов теории электрических цепей. Я считаю, что основные идеи были заложены ***Максвеллом***. Вот эти уравнения, ***Фойснеровские*** уравнения были очень хорошо использованы, не будем скрывать, ***Яромиром Брауном***, который действительно ввел норатор и нуллятор, только ориентированные. Консультант диссертанта упустил это из виду. Но ориентированные норатор и нуллятор как раз дают правило знака. Все там в порядке, то есть показано направление. Поэтому понятие "неудаляемый управляемый источник" можно заменить просто парой норатор и нуллятор. В принципе то же самое будет. Другое дело, что автор работает на уровне схемы, а Браун использовал матричный подход, но тем не менее он не отказывался от схемы.

2. Автор необоснованно упустил из виду, что основное большинство схем является многополюсными структурами, необязательно сводимыми к набору двухполюсников с управляемыми источниками, хотя даже и последние могут быть многоуправляемыми. А предварительное преобразование исходных моделей к используемым в диссертации связано с дополнительными выкладками, в матричном методе это делается очень просто. В то же время матричное представление и отображение схем обобщенным сигнальным графом вполне естественны. За рамками рассмотрения остались линейные параметрические цепи и линейные цепи с распределенными параметрами и др. Многие отзывы, я смотрю, переключаются с этим замечанием.

Мне хотелось бы отметить одну вещь, которую я не внес в отзыв, но в процессе дискуссии она возникла. Что здесь изображено? Некая символьная схемная функция. Переменная здесь *Лапласа* или оператор дифференцирования? Я хотел этот вопрос задать. По-моему, я задавал его, когда мы беседовали в Владимиром Валентиновичем. Вы ответите на этот вопрос. Ежели это оператор *Хевисайда*, то это не то, если это просто преобразование *Лапласа*, то это самый простейший случай. Никто не доказывает сходимости несобственных интегралов. Поэтому оператор *Хевисайда* более мощный. Надо было бы к нему и обратиться.

3. В диссертации нет достаточной четкости в границах и областях перекрытия фундаментальных понятий пассивности, обратимости, линейности и стационарности. Например, предполагается вывод об обратимости пассивных структур. Откровением было для нашего диссертанта, что пассивные структуры не являются иногда обратимыми. То же относится к линейности и параметрическим свойствам цепи. Цепи линейные могут содержать нелинейные элементы, что должно было быть указано! Тем более, что автор говорит о методической стороне вопроса, то есть преподавании студентам. По-видимому, такие уточнения не совсем точно переключаются с нашим *ГОСТом*, который определяет пассивную цепь всегда обратимой. На самом деле это не так. Любое гираторное устройство идеальное, многополюсный гиратор, сразу дает необратимость пассивной цепи. Термин "напряжение" используется вместо понятия "падения напряжения", общепринятая ориентация выходного тока четырехполюсника взята обратной; дифференциальный оператор p следовало бы поместить за параметром элемента, а не перед ним - при анализе параметрических цепей это существенно и др. Мне кажется, что перечисленное очень важно с методической стороны, ведь неоднократно автор указывает, что надо преподавать это студентам. Ясно, что надо, только надо с оговорками это делать.

По ходу дела разрешите мне, я опять не вносил это в отзыв, но тут возник вопрос. *П.А.Бутырин*, действительно, поставил такую вилку: либо это будет доказано математически, либо - это тавтология, значит, надо отбросить, как известные вещи. Доказательства математического такого строгого здесь нет. Все ограничивается таким "больше-меньше", количественным таким, качественной даже стороной. Количество здесь не присутствует, как правило. Кроме известной формулы, в которое входит число узлов. Поэтому мне казалось тут, что работа нуждается в подчеркивании математической стороны. Вот если что-то доказал человек, тогда это все - незачем объяснять. А вот иллюстрировать примерами - это очень хорошо, но пример ничего не доказывает, как правило. Можно другие примеры привести, где

какой-то способ, невыгодный с точки зрения автора, дает лучший результат. Это можно придумать, или ему надо будет опровергать все примеры непрерывно, что тоже возможно. Поэтому то, что вывешено - это хорошо, но это не доказательство.

4. Некоторые утверждения автора работы нуждаются в разъяснениях, а с другими вообще трудно согласиться. Так, на странице 20 утверждается об обилии рецептурных приемов синтеза по сравнению со способами получения системных функций. Всегда история начиналась с того, что если уж кто-то вам сделал цепь, а вы ее анализируете. А как ее сделали... Поэтому всегда синтезировать цепь намного сложнее, чем просто проанализировать. На странице 25 голословно утверждается о некоем замешательстве студентов при наличии определенных типов управляемых источников для метода узловых напряжений. Я считаю, что это несерьезное замечание, потому что оно легко разрешается при ознакомлении с современными курсами ТОЭ. Если вы возьмете старый учебник ТОЭ, там, конечно, ИНУН может отсутствовать, а в современных курсах это везде подчеркивается, как анализировать узловым методом цепи с управляемыми источниками напряжения. Слово "наглядность" для реальных больших структур вряд ли отражает первоначальный смысл - многополюсник и многомерные структуры более наглядны при иных описаниях потому что, когда схема представляет собой набор многополюсников там ясно - вот подсхема, вот подсхема, вот подсхема - их надо объединять. А если я все изображу в виде вот детальных вещей, то наглядность теряется. Берете простой пример, транзисторов, скажем 30, со всеми цепями питания. Невозможно прямо так анализировать, а если поблочно сделать, то уже совершенно другая наглядность будет. Одно там, другое и связи между ними.

5. Квазипассивные преобразования ИТУН и ИНУТ на рис. 3.1 и 3.2 есть по существу давно известные следствия теоремы замещения ветви и могут быть без потери ясности изложения опущены.

6. В работе имеются ряд неточностей, описок, ошибок и других огрехов оформительского характера. В оглавлении (с. 3) сразу же вводится сокращение "ПУ", не включенное в список сокращений, как это имеет место для других, даже более распространенных, понятий. Неясна дата первой публикации *Кирхгофа* (1845 или 1847 годы?).

Владимир Валентинович, а если схема не управляема и не наблюдаема или не полностью управляема и наблюдаема, что будет с символьной функцией. Она "ущучит" этот, так сказать, факт или нет.

В.В.Филаретов

"Ущучит".

А.В.Бондаренко (официальный оппонент)

А каким образом? Вы же его потеряете! Символьная системная функция не позволяет это сделать, поскольку она всегда не содержит полной информации, как метод переменных состояния, скажем.

В.В.Филаретов

Это уже проявится, когда Вы подставите численные значения. А общее выражение будет совершенно точным.

А.В.Бондаренко (официальный оппонент)

Так... Теперь разрешите мне продолжить дальше.

В целом по полученным в диссертационной работе Владимира Валентиновича Филаретова научным и практическим результатам можно отметить, что

- научная новизна и ценность работы заключается в дальнейшем развитии методики анализа и проектирования линейных цепей с управляемыми источниками в символьном виде;

- практическая ценность диссертации отражена в разработке конкретных рекомендаций, алгоритмов и программ символьного анализа сложных линейных структур с активными элементами.

Достоверность основных полученных результатов не вызывает сомнений. Все выводы по работе обоснованы аппаратом современной теории цепей и систем, теории графов и матриц, проиллюстрированы, я не говорю, что доказаны, а проиллюстрированы, практическими примерами, решение которых выгодно отличаются от их аналогов в известных публикациях. Исторический экскурс, персоналии и методология основных приемов особенно полезны в дидактическом аспекте. Это нужно действительно отметить, что он поднял... Фойснер там, ситуация с этими формулами - это я считаю положительным для диссертации и это можно отметить. Материал изложен доступным для специалистов электро- и радиотехнических специальностей языком.

Апробация и новизна материала отражены в публикации достаточного числа научных работ, а также выступлениями на многочисленных научных конференциях, симпозиумах и семинарах.

Диссертация соответствует специальности 05.09.05 "Теоретическая электротехника".

Общее заключение. Диссертация Филаретова Владимира Валентиновича посвящена решению крупной научно-технической проблемы, имеющей важное исследовательски-прикладное значение по дальнейшему развитию топологических методов анализа линейных цепей в символьном виде на основе схемного подхода. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, содержащую достоверные результаты, обладающую научной новизной и определенной практической значимостью в области анализа и проектирования линейных электро- и радиотехнических цепей. Результаты работы Филаретова доведены до практической реализации в промышленности и внедрены в учебный процесс.

Замечания, высказанные мной по материалу диссертации, существенно не умаляют ее научную и практическую ценность. Здесь просто шла речь о постановке определенных рамок. Эти рамки четко не были поставлены.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа Филаретова по своей научной ценности, оригинальности и значимости практических результатов в целом соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Филаретов Владимир Валентинович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо, **Анатолий Васильевич**. Пожалуйста, Владимир Валентинович. Ответьте на вопросы.

В.В.Филаретов

С первым замечанием я могу согласиться. Вопрос спорный... Также со вторым, третьим и четвертым. Насчет пятого замечания. Это преобразование, оно не доказывается в работе, а просто приводится, чтобы не ограничиваться ссылкой. Это действительно теорема замещения. Но, как здесь показано стрелкой, до сих пор оно применялось для задач формирования ССФ в обратном направлении. Вот **Лин, профессор Лин**, он, наоборот, пассивные у-ветви превращал в управляемые источники. И, таким образом, он размножал активные элементы, а их желательно иметь поменьше. Напротив, в нашей работе мы уменьшаем количество управляемых источников, используя квазипассивное преобразование.

Шестое замечание. По поводу сокращения "ПУ". В тот вариант диссертации, который роздан, это сокращение уже вставлено. Спасибо за то, что Вы указали на него. Неясна дата первой публикации **Кирхгофа**: 1845 или 1847 год? И 1845, и 1847! В 1845 году **Кирхгоф** опубликовал, вывел свои законы непрерывности токов и равновесия напряжений, а в 1847 году он только привел эти законы без доказательства и описал свою топологическую методику. Причем получилось так, что свою первую работу он опубликовал 1845 году, будучи студентом, и она оказалась непризнанной научной общественностью. В связи с этим, когда некоторые стали читать его работу 1847 года, увидели, что там нет доказательств. В частности, **профессор Б.И.Блажкевич** из **Львова**, он в своей статье указал... удивил, так прямо и указал, что **Кирхгоф** привел законы без доказательства. Нет, он их доказал в 1845 году, будучи студентом.

Собственно... я ответил на все замечания... Вот по поводу оптимальности еще. Здесь вообще-то оптимальность доказана для полных схем. Значительный объем второй главы был использован для доказательства оптимальности формируемых выражений определителей полных схем. В частности, выражения полных схем по количеству операций недоступны для формирования известными системами компьютерной алгебры. В полученном нами оптимальном выражении определителя полной схемы с пятью узлами 29 операций умножения и 50 операций сложения. Наиболее продвинутой в этом отношении система МАТНЕМАТИСА дает для определителя полной схемы с пятью узлами 77 операций умножения и 110 операций сложения. Это показал **Роман Васильевич Дмитришин** в своей статье. Я ответил. Спасибо.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту **Волгину Леониду Ивановичу**, доктору технических наук, профессору кафедры измерительно-вычислительных комплексов, заведующему научно-исследовательской лабораторией наукоемкого инжиниринга **Ульяновского государственного технического университета**. Пожалуйста.

Л.И.Волгин (официальный оппонент)

Короче говоря, за всю историю существования теории электрических цепей и теоретической электротехники написаны тысячи монографий, за тысячу да, и сотни тысяч статей. Все стремятся к чему - построить аксиоматическую теорию электрических цепей. Не удастся никак... Удалось в какой-то степени **В.И.Шестакову**. Он родился в 1907 году, умер в 1987 году и создал логическую теорию электрических двухполюсников при параллельно-последовательном соединении. Чисто логическая теория. Логика **В.И.Шестакова** охватывает булеву алгебру, когда сопротивления вырождаются в ключи - разрывы и замыкания. Очень заманчиво пойти по этому логическому пути разработки теории электрических цепей.

Логические методы очень легко распространяются на другие объекты. Тем более, что электрические цепи - это всеобъемлющие цепи, потому что объекты любой природы могут быть смоделированы на аналоговых или цифровых элементах электрических цепей. Вот здесь я вижу... здесь сказали, что завершена теория электрических цепей, но, на мой взгляд, наоборот, открывается новое направление. Например, просматривается аналогия разложения **Фойснера**, разложения какого-то аналитического выражения, по элементам, входящим в это выражение переменным. Аналогичное рассуждение, аналогичное разложение использовал **Шеннон**. Раскладывается булева функция, выносятся один параметр, в этом месте ставится единица и т.д. Это более наглядное представление логической функции. Здесь полная аналогия.

Мы живем в континуальном мире. В континуальном мире все сложнее. Более просто - это пассивные электрические цепи. Здесь все хорошо работает. Наглядно и без натуги большой. Вся сложность в том, чтобы найти ясные четкие процедуры уже при работе с зависимыми источниками. Естественно в этом основная ценность, а сложность здесь на порядок выше, этой работы. С другой стороны, я вижу, что здесь есть, где поработать уже над направлением построения аксиоматической, то есть логической, теории электрических цепей. Я еще к этому не приступал.

Насчет термина "топологический". В электрической схеме замещения заложена вся информация об этой схеме. Другая информация - это сопутствующая информация, смотря с какой точки зрения и поэтому имеется много подходов к анализу электрических цепей. Вводятся различные виды "экзотических" элементов. Они, конечно, интригуют. Но все-таки в основном доминируют матричные методы. Собственно матричный метод здесь тоже присутствует. Все функции цепи имеют билинейную форму. Этот метод, процедура разложения схемных функций по элементам, - подспорье при анализе схем. Вот такое общее.

Дальше. В моем подходе, тут говорилось, делали замечания. тоже мощный метод. Имеется исходная схема или как блок-схема - граф или как электрическая схема в обычном виде. К ней применяется ряд эквивалентных или инвариантных топологических преобразований. Необходимо знать полный класс этих преобразований, чтобы из одной схемы получить полный класс схем в элементном базисе исходной схемы. Набирается большое количество схем и никаких формул - все процедуры топологические. Это еще один способ топологического синтеза электрических цепей. Исходной является не заданная функция, ее надо синтезировать, а известная функция, то есть известная схема или схема замещения.

Если на одном операционном усилителе, то получается 12 схем в элементном базисе исходной схемы. Это так между прочим. (Зачитывает отзыв.)

Актуальность работы. При проектировании электрических цепей (пассивных и активных) первым этапом является выбор или разработка соответствующей поставленной задаче электрической схемы.

При оптимальном проектировании ставится задача выявления полного класса электрических схем, каждая из которых воспроизводит заданную схемную функцию при условии идеальности схемных элементов (обычно - это функция преобразования в частотной или временной областях).

В реальных условиях (при неидеальности схемных элементов) схемные функции задающего множества схем на уровне величин первого и более высших порядков малости будут отличаться и встает задача сравнительного анализа и выбора по заданному критерию качества (например, статическая точность) наилучшего схемного варианта.

Практически указанная задача оптимального проектирования (выбора на задающем множестве электрических схем) не может быть выполнена без наличия компьютерных программ для вывода символических схемных функций (ССФ) или, иными словами, без наличия автоматизированных процедур построения математических моделей объекта проектирования по заданным топологическим моделям (электрическим схемам) большой размерности.

В представленной диссертации разработано новое научное направление в области построения процедурно безызбыточных моделей электрических цепей (ЭЦ) (пассивных и активных), в которых заданные схемные функции вычисляются непосредственно по эквивалентной схеме замещения ЭЦ, минуя промежуточные модели (матричные, графовые и др.).

Проблема достижения (обеспечения) максимальной производительности и точности при ручном и компьютерном вычислениях всегда была доминирующей и до появления настоящей работы являлась скорее искусством, чем научным формализмом.

Указанное подтверждает актуальность поставленной и решенной в работе тематики.

Научная новизна и практическая значимость исследований. Разработано новое научное направление в области построения процедурно безызбыточных моделей электрических цепей, в котором заданные схемные функции вычисляются непосредственно по эквивалентной схеме замещения электрической цепи, минуя промежуточные аналитические модели (матричные, графовые, теоретико-множественные и др.).

С использованием в теории цепей новых понятий неудаляемого управляемого источника (НУИ) и схемного минора разработан топологический метод выделения параметров управляемых источников, не требующий трудоемкого перечисления контуров и цепей контуров передачи, и доказано, что выделением параметров пассивных элементов и управляемых источников можно свести разложение определителя к нахождению определителей элементарных активных схем, содержащих только НУИ.

Топологический метод стягивания и удаления ветвей Фойснера обобщен на активные ЭЦ, в котором знак параметра управляемого источника учитывается не в

ориентации соответствующего НУИ, а непосредственно перед выделяемым параметром, что позволяет минимизировать число операций вычитания в выражениях для ССФ.

Разработана методология, которая позволяет избежать избыточных вычислений при разложении схемных определителей и уменьшить сложность выражений для ССФ. Сформулированы упорядоченные правила выбора элементов и подсхем, выделение которых обеспечивает получение выражений ССФ, оптимальных по вычислительной сложности и количеству операций вычитания.

Разработаны диакоптические методы схемных миноров, основанные на рекурсивном делении схемы и иерархическом объединении подсхем, свободные от ограничений на состав учитываемых линейных элементов и числа внешних узлов подсхем и др.

Практическая значимость заключается в возможности формирования заданных символических схемных функций электрических цепей (пассивных и активных), базируясь непосредственно на исходной схеме замещения ЭЦ, с сохранением физического смысла шагов процедуры формирования ССФ.

Фактически разработанная соискателем компьютерная программа является интеллектуальным справочником, позволяющим при введении списка элементов и узлов их подключения вывести на монитор или распечатку аналитические выражения заданной пользователем электрической схемы исследуемого объекта.

Учитывая, что к электрическим моделям приводятся объекты исследования различной физической природы, область применения разработанной компьютерной программы неограниченно расширяется, заменяя универсальные АВМ.

Замечания по диссертации.

1. На странице 196 диссертации автор указывает "Удаление строк и столбцов в матрице наглядно отображается подсоединением нораторов и нуллаторов к соответствующим узлам схемы. Это позволяет выполнить бисекцию на схемном уровне и свести раскрытие миноров матриц к разложению определителей нораторно-нуллаторных схем.". В связи с этим встает вопрос, применим ли рассмотренный на страницах 169-173 диссертации (страницах 25-26 автореферата) рекурсивный алгоритм проверки на вырожденность и эквивалентные упрощения для схем, содержащих другие "экзотические" активные схемные элементы (инверторы, конверторы, гираторы и др.).

2. Рассмотрение задачи схемных отображений матриц (обратная задача построения схемы по заданной матрице), на наш взгляд, не относится к рассматриваемой в диссертационной работе тематике.

3. На страницах 124, 128 и др. диссертации приравнивание параметра управляемого источника к нулю названо "удалением" управляемого источника, а в автореферате (страницы 7, 23) эта же топологическая операция названа "нейтрализацией"

Общий вывод. Тематика диссертационной работы соответствует специальности 05.09.05 "Теоретическая электротехника".

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, открывает новое направление в теории электрических цепей, то есть раскрыт новый подход к формированию процедур построения символьных схемных функций электрических цепей, который позволяет избежать избыточности вычислений

промежуточных алгебраических и графовых моделей, и в области интеллектуальных компьютерных программ для расчета аналоговых электрических цепей и построения математических моделей электронных средств, а ее автор - Филаретов Владимир Валентинович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Все.

С.К.Шмелев (председатель)

Владимир Валентинович, Вы хотите ответить?

В.В.Филаретов

Да. Что можно сказать по первому замечанию? Был выбран универсальный базис элементов: RLC-элементы, все типы управляемых источников, идеальные операционные усилители. Используя элементы этого базиса, можно построить все другие элементы - гираторы, конверторы и другие, как сказал *Леонид Иванович*, "экзотические" элементы. Возможны непосредственные правила, которые будут сформулированы для того или иного класса схем, например, для схем, содержащих взаимные индуктивности, без перехода к управляемым источникам. Это было сделано в работах *Хуана*. Но эти правила довольно трудоемки и мы посчитали необходимым ограничиться традиционными универсальными элементами, которые и были использованы в диссертации.

Второе замечание по поводу схемного отображения матрицы. Эта задача встала уже в конце исследования. Это побочный результат, который не потребовал больших усилий. Просто было предложено отображать произвольную матрицу схемой с источниками тока, управляемыми напряжением. Пример показан на плакате 27. Заманчиво было расширить сферу применения разработанной методологии.

По третьему замечанию. Действительно, удаление и нейтрализация - это синонимы. Нейтрализация и удаление - это приравнение параметра управляемого источника к нулю, то есть источник напряжения стягивается, источник тока удаляется, приемник тока стягивается, приемник напряжения удаляется. С другой стороны, удаление используется и в формулах (2) и (3), поэтому здесь определенная накладка терминов. Более строго, по нашему мнению, использовать термин "нейтрализация".

С.К.Шмелев (председатель)

Все? Спасибо. Выступления официальных оппонентов завершены, теперь можем приступить к свободной дискуссии, в которой могут принять участие как члены совета, так и коллеги, которые присутствуют здесь. Пожалуйста, выступающие должны сказать свое имя.

Р.В.Дмитришин (д.т.н., профессор кафедры основ электротехники и информатики Жешувского политехнического института)

Я представляю *Жешувский политехнический институт в Польше*. Моя фамилия несколько раз здесь повторялась. Я думаю, что несколько предложений мне будет позволительно сказать. С Владимиром Валентиновичем мы знакомы более 15 лет. В то время символично-топологические методы не были уже популярными. Я с

удивлением заметил, что есть еще один чудак, который посвятил свою активную деятельность этой области. Я счастлив, что у Владимира Валентиновича хватило энергии и упорства довести до финала эту работу. И сегодня мы присутствуем на защите такой интересной диссертации. В связи с этим я считаю полезным и историю вспомнить сегодня. Примерно 25 лет назад по указанию сверху топологические методы, символьные методы, были объявлены бесперспективными, ненаучными и т.д. Вдруг исчезли, были закрыты школы профессоров **Б.И.Блажкевича**, **Н.Г.Максимовича** во Львове, прекратили существование школы топологического анализа профессора **В.И.Анисимова** в Ленинграде, профессоров **Я.К.Трохименко** и **Ю.М.Калниболотского** в Киеве. Действительно, тяжелое время было... Но интуиция подсказывала, что там все-таки есть рациональное зерно.

И сегодня Владимир Валентинович показал, что работа в этом направлении во всяком случае не есть убыточная. Кроме того, я хочу подчеркнуть, что основная работа проводилась в свободное от работы время, за личный счет. Я этому свидетель. Скажем, 90% работы проведено по личной инициативе. Инициативная работа.

Теперь я хотел бы просто уточнить для интереса. Владимир Валентинович, про мой метод сказал, что в нем требуется миллион параметров подграфа вместо 40 тысяч схемных миноров. Миллион выражений - это цена, которую нужно платить, чтобы здесь не было минусов. Если согласиться, что будут вычитания, тогда потребуется 40 тысяч. Если мы хотим исключить эти вычитания, то будет миллион и никто меньше не получит. Что-то за что-то нужно платить.

В конце я хотел бы сказать, что вот если бы Владимир Валентинович имел возможность выступить на международной конференции по символьным методам... Я уже в двух принимал участие. В Португалии, Лиссабоне и Германии, Кайзерслаутерне. Это было бы ведущее сопротивление. Многие ученые бьются над проблемами генерирования. Это же прикладные задачи. Это же не теория. Стенерировать короткую формулу, формулу с минимальным количеством арифметических выражений, которые быстрее считаются. Это было бы для России очень представительно. Я считаю, что все, кто может, должны помочь ему в этом. Вот будет осенью в Бухаресте следующая конференция. Вот бы ему выехать и доложить по основным результатам.

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Наш совет приглашайте, полностью приедем.

Р.В.Дмитришин

Я отдал приглашение на конференцию Владимиру Валентиновичу. Там 10 копий. Значит, если бы я был членом ученого совета, то без колебаний проголосовал бы за присуждение ученой степени доктора технических наук Владимиру Валентиновичу Филаретову. Спасибо.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо за Ваше мнение. Пожалуйста, кто еще хочет выступить?

П.А.Бутырин (член совета)

Я хорошо знаком с работой, поскольку я рецензировал ряд статей диссертанта и он делал доклад на нашей кафедре. В целом считаю, что эта работа заслуживает того, что бы быть признанной докторской и я, по крайней мере, буду голосовать "за". Но я хотел бы в адрес диссертации, в адрес диссертанта, в качестве пожелания на будущее высказать... Все-таки вот экстремизм, присущий ему, каким-то образом сбавить. Экстремизм присутствует как по форме, когда в адрес нашего совета он делает замечания о неполной компетентности, потому что вот мы не читали некоторые учебники. В адрес первого оппонента все-таки некорректность в ответе. Это первое. В этой связи я хотел бы обратить внимание диссертанта на то, что его научному консультанту пришлось вместо него фактически рассказывать содержание диссертации. Видимо наше недопонимание, которое он почувствовал, было связано не с нашим незнанием классики, а с формой сообщения. Так же я заметил, что и первый оппонент прочитал весь отзыв, что обычно не принято, видимо, тоже с целью подробнее разъяснить сущность диссертации.

Второе. Экстремизм присутствует и в диссертации. Там названия параграфов такие, что "Матрицы и графы посредники в символьном анализе". Здесь можно обратить внимание на следующее. Автор вводит выражение, скажем, "схемный определитель". При нахождении схемных функций такими выражениями он "играет". Уже в замечаниях, если я не ошибаюсь, ***Я.К.Трохименко***, было сказано, что это жаргон. Я когда-то делал аналогичные замечания при рецензировании его статей. Как я понимаю, автор не прислушивается к этому. Я спрашиваю научного консультанта, что такое схемный определитель - это определитель матрицы или нечто новое? Научный консультант отвечает: "Не знаю".

Я, поскольку полемизировал с автором в качестве рецензента, знаю, что они могут отличаться знаками, то есть, грубо говоря, ничем. Это то же самое. Значит - это определитель матрицы. О каком тогда альтернативном подходе можно говорить? Речь идет о другом языке. Один язык матричный, другой язык - вот этот схемный. Они равносильны. Более того - это дело вкуса. Одни любят работать с матрицами, другие любят работать со схемами. И то, и то имеет право на существование. Здесь не доказано, что матричный метод хуже, чем схемный. Все-таки, докладывая докторскую диссертацию, нужно к положениям ее относиться гораздо более критично. Вот что я хотел сказать.

А так, я считаю, что работа вполне докторская, и более того, я думаю, что есть необходимость в России иметь специалиста - знатока вот всей этой последовательности методов, всего развития теории цепей в этом направлении. То, что такой специалист появится будет очень хорошо.

С.К.Шмелев (председатель)

Он уже появился такой специалист. Вы имеете ввиду, что этот специалист будет доктором технических наук по специальности "Теоретическая электротехника". Пожалуйста, кто еще хочет выступить.

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Достаточно.

С.К.Шмелев (председатель)

Мне тоже кажется, что все уже поняли содержание, значение и можно приступить к дальнейшей процедуре. После завершения дискуссии предоставляем заключительное слово соискателю. Владимир Валентинович, если Вы хотите...

В.В.Филаретов

Да, я хочу. По поводу схемного определителя... Все же это понятие новое, поскольку оно отличается от матричного тем, что нет взаимно уничтожающихся слагаемых. В принципе. Оно не только знаками отличается, то есть оно может быть меньше на сотни процентов выражения для матричного определителя.

По поводу замечаний в некорректности... Я с этим согласен, я прислушаюсь к мнению **Павла Анфимовича**, что здесь нужно выражения помягче употреблять и вообще. Вообще в целом я хочу поблагодарить своего научного руководителя, консультанта **Мансура Акмеловича Шакирова**, который мне привил схемное мышление. Поблагодарить хочу председателя ученого совета и членов уважаемых ученого совета, официальных оппонентов, которые затратили большие усилия на изучение диссертации, и также всех тех, кто делал замечания, я их учту в дальнейшей работе. В общем-то без замечаний моя работа не стала бы такой, как она есть. К замечаниям я всегда внимательно прислушиваюсь и принимаю к сведению.

С.К.Шмелев (председатель)

Спасибо. Для проведения тайного голосования предлагается избрать счетную комиссию, по Положению не менее трех человек. Есть предложение: профессор **В.Н.Малиновский**, профессор **Г.Г.Гусев**, доцент **М.К.Чобану**. Имеются другие предложения. Нет. Прошу членов совета голосовать. Кто за это предложение? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Единогласно. Прошу комиссию приступить к проведению тайного голосования. (*Тайное голосование*).

Счетная комиссия завершила свою работу и слово предоставляется председателю счетной комиссии, профессору **В.Н.Малиновскому**. Пожалуйста.

В.Н.Малиновский (член совета, председатель счетной комиссии)

Разрешите объявить протокол № 11 заседания счетной комиссии в составе: профессор **В.Н.Малиновский**, профессор **Г.Г.Гусев**, доцент **М.К.Чобану** для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации В.В.Филаретова на соискание ученой степени доктора технических наук.

Присутствовало на заседании совета 16 членов диссертационного совета. Состав нашего совета 18 человек, кворум есть. Присутствует 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации.

Роздано бюллетеней 16. Осталось нерозданных бюллетеней 2. Оказалось в урне бюллетеней 16. В результате голосования по вопросу о возбуждении ходатайства о присуждении ученой степени доктора технических наук Филаретову Владимиру Валентиновичу. За - 16, против - *нет*, недействительных бюллетеней - *нет*. Подписи председателя и членов комиссии.

С.К.Шмелев (председатель)

Кто за то, чтобы утвердить протокол счетной комиссии? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Единогласно. Мы поздравляем соискателя. Владимир Валентинович, желаем Вам дальнейших творческих успехов и надеемся на плодотворное сотрудничество.

Проводим обсуждение проекта заключения совета. Пожалуйста, есть замечания.

П.А.Бутырин (член совета)

Убрать "схемный определитель"!

В.Г.Миронов (член совета, официальный оппонент)

Сократить на одну страницу.

С.К.Шмелев (председатель)

Есть еще замечания, уточнения, редакция? Нет. Предлагаю принять заключение нашего совета. Кто за принятие, прошу голосовать. Кто против? Кто воздержался? Принято единогласно. Открытым голосованием единогласно диссертационный совет Д 212.157.13 принимает следующее заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета Д 212.157.13 о диссертационной работе ФИЛАРЕТОВА Владимира Валентиновича "Топологический анализ электрических цепей на основе схемного подхода", представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.05 "Теоретическая электротехника"

Заслушав и обсудив диссертационную работу Филаретова В.В., совет считает, что тема данной работы, посвященная разработке методов и алгоритмов формирования символьных схемных функций (ССФ) электрических цепей, является **актуальной**.

1. Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем.

1.1. Предложены схемные выражения ССФ, предусматривающие разложение определителей двух схем: 1) схемы числителя ССФ; 2) схемы знаменателя ССФ;

1.2. Получены формулы выделения параметров управляемых источников всех четырех типов, позволяющие распространить понятие определителя схемы, введенное **Фойснером** (1902 г.), на активные электрические схемы и избежать появления в выражениях ССФ взаимно уничтожающихся слагаемых.

1.3. Установлена взаимосвязь между схемными преобразованиями и оптимальной сверткой соответствующих алгебраических выражений; обоснованы правила формирования оптимальных по вычислительной сложности выражений ССФ, минуя трудоемкий процесс свертки.

1.4. Выведены оптимальные по сложности выражения ССФ для лестничных, цепных, полных и полных уравновешенных схем.

1.5. Предложены комплекс эквивалентных схемных упрощений и алгоритмы формирования выражений определителей, оптимальных по вычислительной

сложности и количеству операций вычитания, для схем с управляемыми источниками, что увеличило точность вычислений ССФ.

1.6. Разработаны методы символьного анализа сложных электрических цепей делением их на части, основанные: 1) на рекурсивном делении исходной схемы на две части до получения простейших схем; 2) на объединении подсхем до получения ССФ исходной схемы; при этом допускается использование всех типов линейных элементов и преодолены существующие ограничения на количество внешних узлов в подсхемах.

1.7. Предложено схемное отображение матрицы, позволяющее непосредственно использовать все разработанные в диссертации методы, алгоритмы и компьютерные программы для аналитического решения линейных алгебраических уравнений систем любой физической природы.

2. Оценка достоверности и новизна научных результатов

2.1. Достоверность научных результатов подтверждается:

- корректным применением законов теории электрических цепей; строгими доказательствами с использованием матричных и графовых методов;
- полным совпадением найденных предложенными методами схемных функций электрических цепей и решений систем уравнений с правильными результатами, приведенными в научной литературе;
- реализацией предложенных алгоритмов формирования символьных схемных функций и аналитического решения систем линейных алгебраических уравнений в пакете программ *SYMBOL* и сравнением по точности и вычислительной устойчивости с известными компьютерными программами.

2.2. Научная новизна результатов исследований:

- введены понятия неудаляемого управляемого источника (НУИ), определителя и минора схемы, что позволило обобщить метод схемных определителей для нахождения передаточных ССФ, анализа схем с управляемыми источниками и сложных электрических цепей по частям;
- впервые поставлена и решена задача формирования выражений ССФ, оптимальных по сложности и количеству операций вычитания, что позволяет повысить эффективность и точность вычислений на основе ССФ;
- получено общее решение классической задачи преобразования полной уравновешенной схемы (многоугольника) в эквивалентную звезду; формулы преобразования лишены избыточности и требуют минимального количества иррациональных операций;
- разработаны топологические методы безызбыточного разложения определителей схем, имеющих произвольную структуру и содержащих проводимости, сопротивления, идеальные операционные усилители и управляемые источники всех четырех типов;
- предложен комплекс эквивалентных схемных упрощений, в основе которого лежит преобразование в НУИ и нейтрализация элементов, а также вырождение схем, позволяющий сократить объем выкладок;
- введена внешняя характеристика подсхемы в виде множества ее миноров, которые получаются как определители схем, образованных подсоединением к этой подсхеме соответствующей комбинации НУИ, что исключает появление взаимно уничтожающихся слагаемых в сомножителях диакоптических формул.

3. Значимость результатов работы для теории и практики

Научная значимость диссертации обусловлена разработкой аппарата схемных определителей, альтернативного используемому преимущественно в настоящее время матричному аппарату и способного обеспечить дальнейшее развитие теории электрических цепей на схемной основе.

Практическая значимость диссертации заключается в реализации соискателем компьютерных программ, которые *не имеют аналогов в России* и в отличие от известных зарубежных программ предусматривают произвольное задание пассивных элементов, формируют выражения ССФ сложных активных электрических цепей без взаимно уничтожающихся слагаемых.

Экономия интеллектуального труда преподавателей, научных работников и проектировщиков электро- и радиочепей подтверждается использованием результатов *в ряде проектных организаций и вузов*.

4. Рекомендации по использованию результатов работы

Теоретические результаты диссертации рекомендуются для использования в учебных курсах *"Теоретические основы электротехники"* и *"Основы теории цепей"*. Практические результаты работы следует использовать при проектировании электро- и радиочепей в составе систем автоматизированного проектирования и компьютерной алгебры для повышения эффективности многовариантного анализа и увеличения точности расчетов.

Совет считает, что диссертация Филаретова В.В. является законченной научной квалификационной работой, которая отвечает требованиям п. 13 "Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней и присвоения научным работникам ученых званий", а именно: в ней на основании выполненных автором научных исследований разработаны **эффективные методы и алгоритмы символьно-топологического анализа электрических цепей**, которые в совокупности можно квалифицировать как **новое крупное достижение в развитии теоретической электротехники**.

С.К.Шмелев (председатель)

На этом заседание нашего совета закрывается. Спасибо за участие в работе. Всего вам хорошего.

Председатель диссертационного
совета Д 212.157.13
д.т.н., профессор

С.К.Шмелев

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.157.13
к.т.н., доцент

М.К.Чобану