

ОДЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

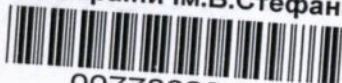
МАЗЕН КАНЕМ БЕТРЕС

УДК 621.372.54

РЕАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУР АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ  
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.13.05 - "ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре "Промышленная электроника"  
Одесского государственного политехнического университета

Научный руководитель:

академик, д. т. н.,  
профессор

Малахов Валерий Павлович

Научный консультант:

к. т. н., доцент

Майко Геннадий Владимирович

Официальные оппоненты:

академик, д. т. н.,  
профессор

Парасочкин Владимир Александрович

к. т. н.

Калинин Александр Иванович

Ведущая организация:

СКБ "Молния" г. Одесса

Защита состоится " 27 " октября 1994 г. в 11 час. 00 мин. в  
аудитория 115У на заседании специализированного совета  
К-068.19.04 по присуждению ученых степеней кандидата технических  
наук Одесского государственного политехнического университета по  
адресу: 270044, г. Одесса, пр. Шевченко 1, ОГПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "23" сентября 1994 г.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим  
направлять по указанному выше адресу.

Ученый секретарь

специализированного совета,

к. т. н.

В. И. КАПИНОС

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В состав любой системы автоматического управления (САУ) входят первичные преобразователи, управляющие устройства и исполнительные механизмы. Эффективность работы САУ существенно зависит от точности обработки полезных сигналов первичных преобразователей, на которые всегда оказывают влияние различные помехи и шумы. Для устранения этого используются частотно-избирательные устройства, которые позволяют выделить полезный сигнал на фоне аддитивных шумов и помех.

В настоящее время в САУ, работающих на низких частотах, наиболее целесообразно применять активные RC-фильтры (ARC-фильтры), имеющие преимущества по сравнению с другими типами фильтров - возможность исполнения в микроселектронном исполнении, малые габариты и вес, высокая помехоустойчивость к внешним электромагнитным полям, простота и технологичность изготовления, легкая настройка и перестройка основных параметров и т. д.

В настоящее время не существует общей методики проектирования ARC-фильтров. Поэтому оптимальная реализация ARC-фильтров остается непростой инженерной задачей и требует от проектировщика больших знаний, опыта, а иногда, и интуиции. Существующие же системы автоматизированного проектирования (САПР) и системы моделирования могут применяться только на заключительном этапе синтеза, когда уже известна конкретная принципиальная схема устройства.

Исходя из вышесказанного, целью работы является разработка методов и средств реализации оптимальных структур ARC-фильтров для повышения метрологических характеристик систем управления.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались различные модели описания линейных электронных схем,

методы теории матриц, методы проектирования баз данных, методы моделирования электронных схем, а так же экспериментальные исследования реализованных фильтров.

Научную новизну работы составляют:

- обобщенные матричные модели активных цепей с операционными усилителями (ОУ),
- способ синтеза структурных схем активных цепей с ОУ на основе разработанных матричных моделей.

Практическую ценность работы составляет:

- методика инженерного проектирования структур АРС-фильтров;
- разработанная структура базы данных (БД) для САПР фильтров и пакет прикладных программ для управления этой БД.

Реализация результатов работы. Результаты работы в виде законченных программ использованы при выполнении госбюджетной работы "Разработка пакета прикладных программ автоматизированного проектирования аналоговых активных фильтров" (номер государственной регистрации 01930027490), а так же используются в учебном процессе в Одесском государственном политехническом университете на кафедре "Промышленная электроника" в курсе "САПР устройств произвлектроники".

Публикации. По результатам исследований, выполненных в процессе работы над диссертацией, опубликовано две печатные работы и одна работа находится в печати.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 1-ой Украинской конференции по автоматическому управлению "Автоматика-94"; на научно-технических семинарах профессорско-преподавательского состава кафедры "Промышленная электроника" Одесского государственного политехнического университета.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 88 наименований, приложения, содержит 133 страниц основного текста, иллюстрируемого рисунками на 85 странице.

Выносимые на защиту положения.

1. Обобщенные матричные модели линейных цепей с повторителями на основе ОУ.
2. Реализация новых структурных схем частотно-избирательных устройств на основе ОУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы основные задачи работы, обоснованы пути достижения поставленной цели, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопросов проектирования и реализации ARC-фильтров, что необходимо для правильной оценки достижений в области теории и практики их проектирования.

Анализ литературных источников по методам анализа и синтеза частотно-избирательных устройств, показал, что среди множества существующих типов таких цепей в системах управления целесообразно использовать ARC-фильтры, потому что они имеют целый ряд преимуществ по сравнению с другими типами фильтров. При этом основными активными элементами ARC-фильтров являются операционные усилители.

В главе показано, что в настоящее время не существует законченной методики проектирования таких цепей. В подавляющем большинстве случаев синтез ARC-фильтров осуществляется эвристическими или эмпирическими путями, которые практически невозможно

формализовать или автоматизировать. Это особенно относится к синтезу структурных схем ARC-цепей.

В главе показано, что существующие специализированные или универсальные (САПР), а так же системы моделирования невозможно использовать на начальном этапе реализации ARC-фильтров. Их применение возможно лишь на этапах параметрического синтеза и оптимизации, когда уже известна принципиальная схема устройства.

Для решения задачи оптимальной реализации структур ARC-фильтров целесообразно использовать предложенные ранее цепи с полной топологической структурой (в таких схемах существуют все возможные связи между любыми двумя узлами через все виды двухполюсников, образующих элементный базис).

В процессе анализа способов представления структурной схемы установлено, что для этих целей целесообразно использовать матричные модели, разработанные на кафедре промышленной электроники над руководством академика Малахов В.П. При этом оказалось необходимым распространить такие модели на схемы подключения ОУ в качестве повторителей (со сто процентной отрицательной обратной связью).

Все вышесказанное позволило сформулировать в конце первой главы задачи, на которых целесообразно сосредоточить внимание в работе.

Во второй главе рассмотрены матричные модели структурных схем ARC-цепей. При этом было принято, что все ОУ являются идеальными, в частности, имеют бесконечно большой коэффициент усиления. Такое допущение при рассмотрении структурного синтеза вполне оправдано, т.к. речь идет только о свойствах структуры цепи, когда тип и значения параметров пассивных и активных элементов еще не известны. Параметры реальных ОУ и пассивных элементов, необходимые

для анализа и моделирования схем, будут учитываться на последующих этапах синтеза фильтров. Использование же идеальных операционных усилителей (ИОУ) для структурного синтеза схем позволяет существенно упростить соответствующую математическую модель цепи.

Кроме того, как показывает проведенный в первой главе анализ, наиболее широко применяются на практике две модификации такого усилителя: ОУ с несимметричным и ОУ с дифференциальным входом. В обоих случаях ОУ имеет несимметричный выход. Поэтому в дальнейшем рассматривались только такие типы ОУ. Однако, как показано в работе, нетрудно рассмотреть соответствующие матричные модели активных цепей и при подключении других типов ИОУ.

В данной главе рассматриваются последовательные подключения ИОУ (всеми возможными способами и во всех возможных сочетаниях, включая также схемы с повторителями) к узлам пассивного  $p$ -полюсника с полной топологической структурой (это необходимо для рассмотрения таких схем с наиболее общих позиций) и получаемые в результате этого матричные модели активных схем.

Проведенный в главе анализ всех возможных способов подключения выделенных типов ИОУ к  $p$ -полюснику с полной топологической структурой позволяет сделать следующие выводы:

1. При подключении ИОУ в качестве повторителей к некоторой активной схеме возможны три варианта структурных схем:

- новые структурные схемы активных цепей с повторителями;
- эквивалентные структурные схемы активных цепей с повторителями, имеющие такую же матричную модель, что и некоторые другие схемы без повторителей и с меньшим числом активных элементов;
- физически нереализуемые схемы активных цепей с повторителями, имеющие вырожденную (прямоугольную) матрицу повторителей.

Иные структурные схемы активных цепей можно получить:

- Если любые выводы повторителя подключены к узлам, соответствующим пассивной подсхеме (узлам блока D);
- Если выход повторителя подключен к узлу, соответствующему пассивной подсхеме, а вход повторителя подключен к выходу ИОУ с несимметричным входом (блок N);
- Если вход повторителя подключен к любым узлам, соединенным с ИОУ с дифференциальным входом (блок B), а его выход подключен к узлу, соответствующему пассивной подсхеме.
- Если вход повторителя подключен к узлам блока D, а его выход - к узлам блока B. При этом можно использовать только один повторитель или два повторителя, подключаемые к разным входам дифференциальных ОУ. Если же используется несколько повторителей, подключенных таким образом, схема является физически нереализуемой.

Во всех этих случаях столбцы, соответствующие узлам подключения выводов повторителя, будут представлять собой сумму 2-х столбцов и будет иметь поэтому составной номер. Это значит, что матрица проводимости схем с повторителями может иметь составной номер в любых столбцах, а не только в первом столбце блока  $B_1$ , как это было в модели, предложенной ранее. На рис.1 показана обобщенная матричная модель ARC-цепей с ОУ (где:  $K$  и  $t$  - количество повторителей,  $n$  - размерность блока  $B_1$ ).

3. При подключении ИОУ с несимметричным входом и выходом в качестве повторителя к ARC-цепи из матрицы проводимости исключаются строка и столбец с номерами, соответствующими узлу подключения этого ИОУ. При этом размерность матрицы уменьшается на единицу и, если перенумеровать ее строки и столбцы, то по ее виду невозможно определить факт использования повторителя.

$D_{re}$			.....	
	$N_{re}$		.....	
		$B_{1re}$	.....	
.....	.....	.....	.....	.....
			.....	$B_{2re}$

(a)

$+1$		.....	
	$+2$	.....	
.....	.....	.....	.....
		.....	$+(1+K)$

(б)

$-1$		.....	
	$-2$	.....	
.....	.....	.....	.....
		.....	$-(1+K)$

(в)

n	$+(n+K)$	$-(1+t)$	.....	$-1$
	$+(n+K)$	$-(1+t)$	.....	$-1$
	.....	.....	.....	.....
	$+(n+K)$	$-(1+t)$	.....	$-1$

(г)

рис. 1

Другими словами, схема с таким включением ИОУ полностью эквивалентна по своим свойствам некоторой другой схеме (без повторителя), причем с меньшим числом узлов и активных элементов.

Волею того, такими же свойствами будет обладать схемы, в

которых выход одного из ИОУ соединен параллельно входу другого (например, при подключении выхода любого ИОУ ко входу ИОУ с синфазным входом), поэтому все такие схемы в дальнейшем не рассматривались.

4. При подключении повторителя так, что его выход соединен со входом ИОУ с несимметричным входом, матрица проводимости получаемой схемы имеет на единицу меньшую размерность и, при перенумерации узлов, имеет такую же структуру, что и некоторая схема без повторителя. В таких случаях из исходной матрицы (схемы) исключается (занемается) узел, соответствующий выходу повторителя, а сам повторитель, аналогично п.3, просто исключается.

5. В случае подключения нескольких ИОУ любого типа к ARC-цепи так, что выход (вход) одного из ИОУ подключается параллельно выходу (входу) другого (например, непосредственное соединение выходов нескольких ИОУ), то получающиеся прямоугольные матрицы проводимости не соответствуют физически реализуемым схемам. Поэтому в дальнейшем так же не будут рассматриваться схемы с такими способами подключения активных элементов.

Третья глава посвящена вопросу разработки оптимальной структуры БД для хранения информации о схемах ARC-фильтров с ОУ; рассматриваются возможные виды запросов к такой БД и алгоритмы автоматического извлечения информации о структурных и/или принципиальных схемах ARC-фильтров, автоматической генерации новых структурных схем ARC-фильтров с ОУ, соответствующих заданным схемным функциям и автоматической записи их в базу данных проектирования. Пользователь может лишь изменить стратегию проектирования и получить тем самым другой набор схем.

Как показал проведенный анализ, для хранения информации о структурных и принципиальных схемах активных RC-фильтров .

целесообразно использовать реляционные базы данных.

В работе рассмотрена концептуальная модель хранения и использования информации о структурных и/или принципиальных схемах. Для этого, после сведений воедино списка атрибутов, использование которых предполагается в БД ARC-фильтров, было построено универсальное отношение, описывающее предметную область.

Для устранения проблем аномалий обновления, вставки и удаления, характерных для СУБД, построенных на основе единственного универсального отношения, была произведена декомпозиция этого отношения в нормальную форму Бойса-Кодда (НФБК). Для этого были определены все функциональные зависимости (ФЗ), существующие между атрибутами универсального отношения. После этого были в несколько этапов (после проверок, находятся ли новые отношения в НФБК) удалены все избыточные ФЗ с целью получения минимального покрытия исходного их набора. Кроме того, в работе проведена модификация полученного набора отношений для обеспечения простоты реализации СУБД исходя из конкретной предметной области.

На основании проведенного оптимального разбиения было разработана структура общей базы данных (в виде четырех связанных баз данных), предназначенной для хранения информации о реализуемых схемах ARC-фильтров.

Разработанная СУБД отличается от известных интерактивных систем баз данных тем, что пользователь не имеет непосредственного доступа к структуре данных. Выбор схем из базы данных происходит автоматически согласно заданной стратегии.

Автоматический доступ к БД осуществляется с помощью специальной программы, которая формирует запрос к базе и получает набор схем согласно этому запросу, а также способна сохранять и/или изменять полученные структуры под другим именем.

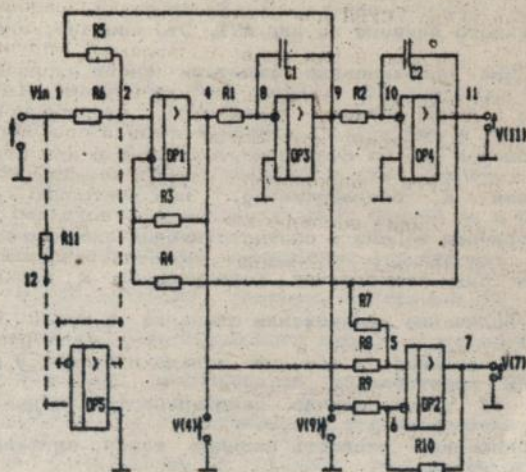
При проектировании СУБД для системы проектирования активных RC-фильтров было выделено 6 запросов, позволяющих получить структурные схемы ARC-цепей с заданными параметрами (размерность матрицы пропускности схемы, количество, тип и способы включения ИОУ, которые, по сути, определяют стратегию проектирования), получать предыдущие или последующие схемы согласно выбранной стратегии проектирования, сохранять рассматриваемые схемы и изменять их имена.

Следует отметить, что в ответ на некоторые запросы пользователя могут автоматически выполняться специальные программы для генерации новых схем, не имеющих на данный момент в базе данных, и для автоматического включения полученных схем в БД. Таким образом, разработанная СУБД позволяют практически полностью автоматизировать процесс структурного проектирования ARC-фильтров.

В четвертой главе проведен анализ изменения свойств схемы при подключении к ней повторителей напряжения на ОУ. Это необходимо для подтверждения правильного выбора стратегий и приоритетов при генерации различных схем с повторителями, сделанных в третьей главе на основании теоретических исследований.

Для исследований была выбрана схема 2-го порядка (рис. 2. а), матричная модель которой содержала все виды блоков (D, N и B) (рис. 2. б). По заданной АЧХ рассчитаны схемные функции и параметры пассивных элементов. Были проведены моделирование исходной схемы и схем с подключенными повторителями в среде программы моделирования, а так же экспериментальные исследования макета фильтра.

На основании анализа результатов экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:



(a)

	1+12	2+3	4	5+6	7	9	11
1	$Y_6$	$-Y_6$	0	0	0	0	0
2	$-Y_6 - Y_{11}$	$Y_6 + Y_{11}$	0	0	0	$-Y_6$	0
3	0	$Y_2 + Y_4$	$-Y_2$	0	0	0	$-Y_4$
5	0	0	$-Y_6$	$Y_7 + Y_8$	0	0	$-Y_7$
6	0	0	0	$Y_7 + Y_{10}$	$-Y_{10}$	$-Y_7$	0
9	0	0	$-Y_6$	0	0	$-Y_6$	0
10	0	0	0	0	0	$-Y_2$	$-Y_4$

(b)

1. Подключение повторителей к узлам разных блоков схемы не оказывает никакого влияния на вид АЧХ. Это связано, скорее всего, с тем, что сами операционные усилители имеют входное сопротивление порядка единиц мегаом, кроме того, входное сопротивление цепи увеличивается еще за счет присутствующей в ней отрицательной обратной связи и, следовательно, незначительно влияет на изменение матричной модели и соответствующих схемных функций.

2. Только при подключении повторителей к узлам блока В наблюдается увеличение напряжения смещения и шумов, приведенных ко входу. Это связано, с тем, что только в блоках В входы ОУ не заземлены и в таком случае неидеальности входной цепи ОУ (напряжение смещения, разность входных токов, синфазное входное сопротивление и синфазный коэффициент усиления и т.д.) сказываются в максимальной степени.

3. Подключение повторителя к узлам блока D (показано на рис.2 пунктирной линией) позволяет намного увеличить входное сопротивление цепи, что является немаловажным фактором при проектировании различных активных схем.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. По результатам анализа литературных источников установлено, что для повышения метрологических характеристик САУ необходима разработка методов и средств оптимальной структурной реализации частотно-избирательных устройств.

2. Для представления и описания структур активных фильтров целесообразно использовать матричные модели. В работе предложена матричная модель активной цепи с элементной базой R, C, ОУ, учитывающая все возможные способы их подключения к ОУ, в том числе как повторителей.

3. На основании разработанной матричной модели, получены

ЛНВ М. Фольварская  
АН України

структурные схемы активных цепей с повторителями напряжения на ОУ.

4. Разработана структура баз данных для хранения информации о различных схемах активных фильтров, алгоритмы и программы автоматической генерации новых структурных схем, соответствующих заданным схемным функциям и автоматической записи их в базу данных.

5. Для приоритетного выбора конкретных структурных схем таких цепей при проектировании частотно-избирательных усилителей предложена стратегия автоматического выбора подходящих схем.

6. Экспериментальное исследование моделируемых АРС-фильтров, результаты которого по качественным и количественным показателям имеют хорошее согласование с данными теоретического анализа, подтверждают адекватность реальных физических процессов в спроектированных устройствах.

#### ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Малахов В.П., Майко Г.В., Ветрес Мазен Канен. Автоматический синтез структур активных фильтров // Тез. докл. первой Украинской конф. по автоматическому управлению (Автоматика-94). - К., 1994. - С 287.

2. Структурный синтез АРС-фильтров с повторителями / В.П. Малахов, Г.В. Майко, Мазен Канен Ветрес и др. - Деп. в ГНТБ Укр. 18.08.93, N1771-Уж93.

#### Аннотация

Мазен Канен Ветрес Реализация структур активных фильтров для систем управления.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, Одесский гос. политехн. ун-т, Одесса, 1994.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, Одесский гос. политехн. ун-т, Одесса, 1994.

Диссертация содержит теоретические исследования в области реализации структур частотно-избирательных устройств для систем управления, а также результаты экспериментальных исследований. Разработана обобщенная матричная модель активных RC-цепей с повторителями. Получены новые структурные схемы активных цепей с повторителями напряжения на ОУ. Разработана структура базы данных для хранения информации о структурных схемах активных фильтров, алгоритмы и программы автоматической генерации новых структурных схем.

Mazin Kanem Betres. Elaboration of active filter structure for control systems.

Dissertation for the candidate of science (technical) degree in speciality 05.13.05 "Elements and devices of computer's equipment and control systems", Odessa state politechnic university, Odessa, 1994.

Dissertation work is dedicated to the theoretical research in field of active filter structure elaboration and experimental. The general matrix model of the active circuits with repeaters were obtained. The structure of data base for active circuits was design, and the algorithms and programs of automatical new circuits synthesis were made.

Ключевые слова: частотно-избирательный прибор, системы автоматического управления, база данных, повторитель, матрица.

