

6
A-25
МИНИСТЕРСТВО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С С С Р

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

В.К.РАЕВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ РЕШАЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор

Н.А.Розенблат

Москва 1966

МИНИСТЕРСТВО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С С С Р

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

В.К.РАЕВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНЫХ РЕШАЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
М.А.Розенблат

Москва 1966

Неуклонный прогресс в комплексной автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности, сопровождается широким внедрением вычислительных средств в практику автоматического управления. Этому в немалой степени способствует все более глубокое развитие математического аппарата для описания самих объектов управления, результатом чего являются математические алгоритмы, обеспечивающие регулирование сложных производственных процессов в областях наиболее выгодных технологических режимов. В этих условиях проектировщикам и создателям средств автоматики необходимо иметь в своем распоряжении широкий ассортимент надежных вычислительных (решающих) элементов и устройств промышленной автоматики, которые в силу своих технических характеристик позволяли бы с наименьшими затратами воплощать в условиях производства^{х)} новые алгоритмы управления, проверенные на лабораторных моделях.

В последние годы широкое распространение для этих целей получила, например, пневматическая агрегатная, унифицированная система элементов УСЭППА. Наряду с большими достоинствами этой системы — простотой, надежностью и экономичностью, системе присущ и ряд серьезных ограничений (невысокое быстродействие, трудность дистанционного управления, необходимость преобразования входных и выходных величин регулирующего прибора и др.), что делает ее трудно применимой при автоматизации систем

^{х)} Под этим понимается самый разнообразный круг условий, в которых на практике приходится работать реальной аппаратуре, например, вибрации и перегрузки, значительные колебания температуры, влажности и питающего напряжения, агрессивные среды, загрязненность и запыленность, радиоактивность и многое другое.

управления, охватывающих большое число объектов, разделенных большими расстояниями и/или требующих значительного объема вычислительных операций, а также во многих других случаях.

Все это в еще большей степени стимулирует усиленное развитие и применение электрических вычислительных и управляющих устройств автоматики. Вместе с тем, их широкое внедрение в значительной степени сдерживается отсутствием унифицированных систем элементов, существование которых позволило бы сильно сократить бесчисленное разнообразие используемых типов, модификаций и схем вычислительных средств, зачастую изготавливаемых предприятиями только для собственного потребления, в единичных количествах и в условиях отсутствия какой-либо специализации.

Принципиально существует возможность построения систем электрических аналоговых вычислительных элементов на основе различного типа усилителей, например, ламповых, транзисторных или магнитных. Последние имеют ряд существенных, потенциальных преимуществ по сравнению с применяемыми в настоящее время электронными и полупроводниковыми решающими элементами. К числу таких преимуществ можно отнести: 1) более высокую надежность и практически неограниченный срок службы, 2) более высокую стабильность нуля при усилении сигналов постоянного тока, 3) отсутствие необходимости в стабилизированных источниках питания постоянного тока, 4) возможность "магнитного" суммирования практически неограниченного числа сигналов без введения гальванической связи между ними, 5) возможность получения любой полярности выходного сигнала независимо от числа промежуточных каскадов, 6) возможность запоминания аналоговых электрических величин, 7) возможность создания интегрирующих устройств без дрейфа выходного напряжения при снятии

входного сигнала, 8) возможность одновременного использования магнитного усилителя в качестве сумматора и пиротно-импульсного модулятора, что облегчает построение универсальных измерительных и делительных устройств и др.

Указанные особенности магнитных элементов, зачастую позволяют существенно сократить общее число решающих элементов, необходимых для реализации заданного алгоритма управления и обеспечить более стабильную работу системы управления или вычислительного устройства, чем при использовании электронных или полупроводниковых решающих элементов.

Первые публикации о магнитных решающих усилителях (МРУ) и специализированных вычислительных устройствах на их основе появились в отечественной и зарубежной печати в начале 50-х годов. Крайняя несовершенство базисных усилителей, выполненных по схемам с раздельной обратной связью и являвшихся по существу усилителями тока, обусловила весьма узкий круг задач решаемых магнитными вычислителями, сводившихся, как правило, к решению линейных алгебраических уравнений с точностью порядка нескольких процентов. В 1957 г. Паттоном были предложены ряд схем магнитных интеграторов на основе более совершенного базисного усилителя, что существенно расширило круг возможных применений МРУ. В дальнейшем в работах советских ученых И.А.Резеблота, И.Б.Негневицкого, С.Б.Негневицкого, И.А. Беляева, Ф.И.Кербникова, Р.А.Липмана, Е.Л.Львова, А.И.Носкялова, Б.Н.Иванчука и др. было уделено значительное внимание усовершенствованию характеристик магнитных решающих (операционных) усилителей и созданию новых, более совершенных схем базисных усилителей. Хорошей иллюстрацией возможностей МРУ явилась опубликованная в 1963г. работа японских специалистов Миура и Хирано по построению управляющего вычислительного устройства,

полностью на магнитных решающих элементах, с характеристиками во многом ^{или}уступавшими соответствующим электронным и транзисторным блокам.

Относительно ограниченное применение магнитных решающих элементов, несмотря на перечисленные достоинства и наличие значительного количества работ, посвященных таким элементам, обусловлено целым рядом причин, важнейшими из которых являются: 1) узкая полоса пропускания магнитного решающего усилителя, ограниченная частотой питающего напряжения, 2) относительная сложность построения и ограниченная точность интегрирующих и дифференцирующих элементов, обусловленные низким входным сопротивлением магнитных усилителей и отсутствием стабильных конденсаторов большой емкости, 3) затруднения, возникающие при построении различных функциональных преобразователей и множительных устройств, вследствие пульсаций выходного напряжения магнитных усилителей, 4) слабое развитие теории магнитных решающих элементов, что затрудняет выбор их оптимальных параметров и определение условий и областей их наиболее целесообразного применения.

Положительное решение всех или отдельных из перечисленных выше вопросов значительно раздвинуло бы границы рационального применения магнитных решающих элементов, и в ряде случаев позволило бы получить существенный экономический выигрыш даже от замены существующих типов электронных или транзисторных управляющих и специализированных вычислительных устройств полностью магнитными.

В этой связи в ИАТ(ТК) с участием диссертанта было начато исследование рациональных путей создания унифицированной системы магнитных аналоговых элементов для промышленной автоматики. В такой системе целесообразно предусмотреть ограниченное число

наиболее употребительных в автоматических системах функциональных блоков, таких как сумматор, сумматор-интегратор, умножитель, аналоговое запоминающее устройство, дифференцирующее устройство, функциональные преобразователи, магнитное бесконтактное реле и др., позволяющих реализовать самые разнообразные алгоритмы управления и набирать практически любые схемы промышленных регуляторов и специализированных вычислительных устройств. В основу системы наряду с определенными требованиями к надежности, точности, быстродействию и т.д. должны быть положены требования и рекомендации соответствующих ГОСТов, а также требования к элементам средней части электрической аналоговой ветви Универсальной Международной системы автоматического контроля, регулирования и управления (УРС), утвержденные секцией приборостроения и автоматики постоянной комиссии СЭВ по машиностроению. В соответствии с этими требованиями, в частности, рекомендуемые пределы изменения входных и выходных напряжений МРУ составляют 10-0-10в, что с одной стороны, позволяет частично снизить габариты, вес и стоимость усилителя с одновременным повышением его надежности и стабильности за счет уменьшения обратного напряжения на диодах в рабочих цепях, а с другой стороны, согласуется с входными и выходными параметрами унифицированных промышленных серий магнитных и транзисторных логических элементов, позволяя создавать смешанные, аналого-дискретные системы управления.

Задача создания системы, магнитных элементов охватывает значительный круг вопросов, которые невозможно решить в пределах одной диссертации. Целью настоящей работы является попытка восполнить пробел в области теории, методов расчета и построения магнитных вычислительных (решающих) элементов системы,

при этом особое внимание уделяется анализу погрешностей, возникающих в таких элементах к методам их уменьшения.

В связи с этим в работе были оставлены следующие основные задачи:

1) исследование и выбор базисного магнитного усилителя, являющегося основным элементом или модулем всех функциональных блоков системы магнитных элементов,

2) разработка теории погрешностей магнитных реагирующих элементов, включая вывод обобщенных передаточных функций различных типов магнитных реагирующих усилителей, подробный анализ основных первичных погрешностей в различных режимах их работы, а также разработка рекомендаций для построения оптимальных, с точки зрения статистических динамических и метрологических характеристик магнитных реагирующих элементов.

3. Исследование статических и динамических характеристик основных типов реагирующих элементов рассматриваемой системы: сумматора (масштабного усилителя), сумматора-интегратора, интегратора с памятью, умножителя и генераторов функций, образующих вместе с логическими элементами основу любого аналогового управляющего и специализированного вычислительного устройства.

4. Выявление путей дальнейшего улучшения характеристик магнитных реагирующих элементов и усовершенствования их принципиальных схем, с иллюстрацией возможностей этих элементов на реальных практических примерах.

В первой главе, посвященной выбору базисного магнитного усилителя, придется сравнительный анализ и основные пути усовершенствования нескольких основных схем базисных усилителей. Отмечается, что принципиально, в качестве последних могут быть рассмотрены двухтактные магнитные усилители

трех типов: а) усилитель с общей обратной связью, б) усилитель с выпрямлением четных гармоник и в) усилитель с самонасыщением. Несмотря на более высокую стабильность первых двух типов усилителей, преимущества усилителей третьего типа при построении МРУ являются решающими и заключаются, в частности, в меньшем внутреннем сопротивлении, а также возможности наилучшим образом совместить благоприятные частотные характеристики "быстродействующего" усилителя и высокий коэффициент усиления усилителя с самонасыщением в однокаскадном, реверсивном магнитном усилителе с суммированием выходных напряжений на балластных сопротивлениях.

В качестве основного критерия усилительных свойств базисного, магнитного усилителя используется передаточное сопротивление R_n (иногда его называют переходным или взаимным), равное установившемуся приращению выходного напряжения усилителя к приращению входного тока. Выбор этого критерия отвечает физике работы магнитного усилителя и обусловлен, главным образом, удобством его использования при анализе и расчете различных МРУ, состоящим в том, что в отличие, например, от коэффициентов усиления по току, и напряжению, передаточное сопротивление не зависит от сопротивлений нагрузки и входных цепей. Получена простая формула, связывающая величину R_n с конструктивными параметрами базисного усилителя:

$$R_n = \frac{4f W_y W_p S}{\ell} \mu \mu_0,$$

где f - частота источника питания, W_y и W_p - числа витков управляющей и рабочей обмотки, ℓ и S , соответственно, средняя длина и сечение сердечника, μ_0 - магнитная постоянная, μ - значение магнитной проницаемости на линейном участке характеристики размагничивания сердечника усилителя.

С целью окончательного выбора схемы базисного усилителя всесторонними экспериментальными исследованиями подверглись три основные схемы усилителей с самонасыщением, а именно: мостовая схема, схема с удвоением напряжения на конденсаторах и схема со средней точкой. Указанные схемы были собраны на одних и тех же сердечниках типа ОЛ (45x32x5) из материала марки 79НМУ с толщиной ленты 0,05 мм, обладали одинаковыми конструктивными параметрами и испытывались в идентичных условиях, при частоте источника питания 400 гц. В результате установлено, что требованиям, предъявляемым к базисному магнитному усилителю, наилучшим образом удовлетворяет схема со средней точкой. По сравнению с двумя остальными схемами она оказывается более стабильной и отличается меньшим числом составных компонентов. В разомкнутом состоянии максимальная величина R_n для схемы на сердечниках из материала 79НМУ составила около 10^6 ом. Рекомендуются следующие пути улучшения характеристик базисного усилителя: 1) применение дополнительной положительной обратной связи по напряжению на отдельную обмотку, что позволит довести передаточное сопротивление до величины порядка 10^8 ом, 2) введение в положительную обратную связь нелинейной цепочки из сопротивления и диода для устранения влияния неидентичности сердечников и симметрирования характеристики вход-выход усилителя относительно начала координат, 3) применение "компаундирования" для улучшения нагрузочной способности усилителя, 4) использование "автоматического" смещения в усилителе, заключающегося в том, что сигнал смещения подается не от отдельного источника, а снимается с сопротивления включенного в общей цепи двух одностактных усилителей; в результате достигается упрощение схемы базисного усилителя и в несколько раз повышается его стабильность; 5) включение парал-

лельно балластными сопротивлениями конденсаторов "умеренной" емкости (4 + 10 мкф), что существенно (в два и более раз) расширяет полосу пропускания усилителя, 6) применение в рабочих цепях высококачественных кремниевых диодов с малыми обратными токами позволяет, при одновременном увеличении коэффициента усиления усилителя, повысить его стабильность, 7) использование в качестве магнитного материала для сердечника усилителя пермалловых сплавов с максимальным отношением магнитной проницаемости к индукции насыщения.

Выполненный в соответствии с перечисленными рекомендациями типовой базисный магнитный усилитель обладает при питании частотой 400 гц и рабочей индукции в сердечниках из сплава 79НМУ порядка 0,6 тесла, следующими характеристиками: передаточное сопротивление $R_n = 10^8$ ом, приведенный ко входу дрейф нуля $i_{др} = 0,5 \cdot 10^{-8}$ а, температурный дрейф нуля при нагреве до +60°C менее $0,8 \cdot 10^{-6}$ а. Уход нуля при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ составил $0,2 \cdot 10^{-6}$ а.

Во второй главе рассматриваются некоторые общие вопросы теории магнитных решающих усилителей. Принципиально существует возможность построения МРУ на основе магнитных усилителей тока и напряжения, отличающихся выходными сопротивлениями (в первом случае бесконечно большое, во втором — бесконечно малое). Показана целесообразность выполнения МРУ на базе идеального усилителя напряжения с бесконечно малым входным и выходным сопротивлением. Преимущества использования такого усилителя заключается в легкости его реализации на основе рассмотренного в первой главе магнитного усилителя с самонасыщением, а также в том, что погрешность коэффициента передачи МРУ в данном случае практически не зависит от сопротивления нагрузки, обычно меняющегося в широких пределах. Под-

черкивается, что в магнитных усилителях, в отличие от ламповых схем, потребление тока на входе (в обмотке управления) принципиально необходимо, т.е. носителем информации в них является не напряжение, а ток. В связи с последним обстоятельством показывается ошибочность формальной аналогии МРУ с электронным решающим усилителем при бесконечном увеличении сопротивления входной обмотки. Сопротивление входной обмотки МРУ при прочих равных условиях рекомендуется выбирать возможно малым.

Теоретическому исследованию подверглись две наиболее распространенные схемы МРУ: а) схема с двумя входными обмотками, с суммированием на сопротивлениях, и б) схема с суммированием входных сигналов на отдельных обмотках. В первой схеме отрицательная обратная связь заведена на одну из входных обмоток, в связи с чем по одним входам (обозначены индексом "А") имеет место электрическая обратная связь, в то время как по другим (входы "Б") — магнитная обратная связь. Во второй схеме используют, как правило, магнитную обратную связь. Предпочтительной для применения в системе магнитных аналоговых элементов является схема с двумя входными обмотками, позволяющая достигнуть более высоких коэффициентов усиления и за счет этого снизить основную погрешность. Многообмоточный вариант может быть рекомендован при необходимости осуществить гальваническую "развязку" входных сигналов. Общим достоинством двух указанных схем, является возможность в однокаскадном усилителе по усмотрению либо инвертировать, либо повторять на выходе знак входного напряжения, что в ряде случаев дает возможность существенно сократить, по сравнению с ламповыми и транзисторными схемами; число решающих блоков, необходимых для решения

Результатом исследования явились обобщенные уравнения обоих типов усилителей, из которых, в частности, следует, что безотносительно к характеру элементов входных цепей и цепи обратной связи (представлены в операторной форме) МРУ представляет собой инерционное звено первого порядка, постоянная времени которого определяется индуктивностью входной обмотки и суммарным коэффициентом передачи по каждому из входов. При этом введено понятие "конструктивной" постоянной времени, равной отношению индуктивности входной обмотки к передаточному сопротивлению усилителя. Указанная постоянная времени при заданном коэффициенте передачи в основном обуславливает верхний предел частот, пропускаемых усилителем, и приближенно может быть определена по формуле

Общие уравнения МРУ явились основой для подробного анализа статической и динамической погрешности последнего в различных режимах работы, с учетом вероятностного характера распределения факторов, обуславливающих случайную составляющую общей погрешности. В результате в наиболее общем виде получены выражения для погрешности МРУ, позволяющие сделать следующие основные выводы:

I. Суммарная ошибка МРУ складывается из ряда первичных погрешностей, обусловленных: конечной величиной передаточного сопротивления базисного усилителя (основная погрешность), наличием конечного омического и индуктивного сопротивления входных обмоток МРУ, неточной установкой параметров входных цепей и цепи обратной связи (включая и возможные утечки при включении в эти цепи конденсаторов), ошибками во входных напряжениях, а также наличием дрейфа выходного напряжения и неточной установкой "нуля" усилителя.

В отличие от ламповых схем, основная статическая погреш-

ность МРУ (обусловленная конечным R_n) не зависит от числа входов МРУ и коэффициентов передачи по каждому из них. В то же время, в случае магнитной обратной связи в МРУ, наличие конечного омического сопротивления входной обмотки может привести к возникновению дополнительной погрешности, зависящей от суммарного коэффициента передачи.

3. Динамическая погрешность МРУ, обусловленная наличием индуктивности входных обмоток, существенно зависит от коэффициентов передач по каждому из входов. При этом наличие замкнутых входов "Б" у двухобмоточного МРУ влияет только на динамическую составляющую общей погрешности при передаче сигналов по входам "А" (с электрической обратной связью), в то время как наличие замкнутых входов "А" сказывается как на динамической, так и на статической погрешности передачи сигналов по входам "Б" (с магнитной обратной связью).

4. Форма основной погрешности МРУ инвариантна к характеру обратной связи (магнитная или электрическая) и к способу суммирования (на сопротивлениях или на отдельных обмотках) и имеет в операторной форме следующий вид:

$$\gamma(p) = \frac{Z_{oc}(p)}{R_n(p)} + pT_k \left[1 + \sum_{m=1}^n K_{Am}(p) + \sum_{k=1}^l K_{Bk}(p) \right],$$

где $p = d/dt$, $Z_{oc}(p)$ - сопротивление цепи обратной связи, $T_k = \frac{W_y}{2W_p f}$ - конструктивная постоянная времени, а $\sum_{m=1}^n K_{Am}(p)$

и $\sum_{k=1}^l K_{Bk}(p)$ суммарные коэффициенты передачи, соответственно, по входам "А" и "Б".

5. Низкое выходное сопротивление $Z_{вых}(p)$, определяемое из простой формулы $Z_{вых}(p) = Z_{вн}(p) \gamma(p)$ ($Z_{вн}(p)$ - внутреннее сопротивление разомкнутого усилителя), обеспечивает высокую нагрузочную способность МРУ.

6. Погрешность от дрейфа нулевого уровня МРУ зависит от типа базисного усилителя и сопротивления цепи обратной связи и не зависит при постоянной величине последнего от числа суммируемых сигналов и суммарного коэффициента передачи МРУ. Получена простая формула приведения дрейфа выходного напряжения

$$U_{др}(p) \text{ ко входу МРУ } U'_{др}(p) = \gamma(p) U_{др}(p)$$

где $U'_{др}(p)$ - приведенное напряжение дрейфа МРУ.

В третьей главе рассматриваются основные методы суммирования на магнитных усилителях, анализируются возникающие при этом статические и динамические погрешности, указывается на возможные способы их минимизации, рассматривается влияние фильтра на работу суммирующего магнитного усилителя, а также приводятся результаты экспериментального исследования макетов магнитных сумматоров, входящих в систему магнитных аналоговых элементов.

Суммирование электрических сигналов на магнитном усилителе в конечном счете сводится к суммированию токов. Электрические сигналы, подлежащие суммированию, могут быть заданы либо в виде токов, либо в виде напряжений. Суммирование токов в магнитном усилителе можно легко осуществить на отдельных обмотках, однако сами случаи задания входных сигналов в виде токов встречаются на практике относительно редко. Суммирование напряжений, с предварительным преобразованием входных величин в токи на сопротивлениях можно осуществить тремя способами: 1) суммирование на отдельных для каждого сигнала обмотках, 2) суммирование на общей обмотке с использованием магнитной отрицательной обратной связи, 3) суммирование на общей обмотке с использованием электрической отрицательной обратной связи. Показано, что каждый способ имеет свою область целесообразного применения. К принципиальным недостаткам первых

двух способов суммирования относится сравнительно высокое входное сопротивление базисного усилителя, равное омическому сопротивлению R_o входной обмотки. Для третьего способа наоборот характерно весьма низкое входное сопротивление $R_{вх}$
$$R_{вх} = \frac{R_{oc} R_o}{R_{oc} + R_o + R_n} \approx \gamma_{cm} R_o$$
, где R_{oc} - сопротивление цепи обратной связи, а γ_{cm} - статическая составляющая основной погрешности.

Теоретическое и экспериментальное исследование погрешностей суммирования позволило, в частности, установить, что: а) основная статическая погрешность магнитного сумматора практически не зависит от числа суммируемых входов и коэффициентов передач по каждому из них. Типичными величинами основной погрешности МРУ в режиме сумматора при использовании в усилителе сердечников из сплава 79НМУ являются $0,1 \pm 0,2\%$ от номинального значения выходного напряжения в диапазоне изменения коэффициента передач, от 0,01 до 100. Погрешности, обусловленные изменением питающего напряжения на $\pm 10\%$ номинального, и изменением температуры от нормальной до $+70^\circ\text{C}$ без применения дополнительных мер по их стабилизации, составляют соответственно 0,5 и 0,3%. б) У суммирующих усилителей при наличии магнитной обратной связи может появиться дополнительная погрешность обусловленная конечным сопротивлением входных обмоток. Показана возможность устранения указанной погрешности посредством шунтирования одной из входных обмоток сопротивлением R_m рассчитанным по простой формуле

$$R_m = \frac{R_{oc}}{\sum_{k=1}^n K_{BK} - \sum_{m=1}^n K_{AM}^{-1}}$$

где $\sum_{m=1}^n K_{AM}$ и $\sum_{k=1}^n K_{BK}$ - суммарные коэффициенты передачи, соответственно по входам "А" и "Б", в) МРУ в режиме сумматора пред-

ставляет собой одноемкостное инерционное звено, в общем случае с запаздыванием, равным полупериоду частоты возбуждения. Динамические характеристики сумматора зависят в первую очередь от конструктивной постоянной времени базисного усилителя T_k и от суммарного коэффициента передачи. При отсутствии фильтра на выходе, полоса пропускания МРУ, определяемая по логарифмическим характеристикам при суммарном коэффициенте передачи равном единице, составляет на частоте 400 гц несколько десятков герц (около 30), что хорошо согласуется с экспериментальными данными (25 гц). Показано, что наличие фильтра на выходе МРУ при надлежащем выборе постоянной времени фильтра улучшает динамические характеристики усилителя, позволяя при коэффициенте передачи, равном единице, увеличить полосу пропускания МРУ на уровне 3 дб до величины порядка 150 гц.

В четвертой главе дается классификация основных методов построения магнитных интеграторов с учетом использования последних в системе магнитных аналоговых элементов. Наряду с подробным анализом магнитных интегрирующих усилителей по классическим схемам, выполненным на основе более совершенного базисного усилителя, рассматриваются новые пути построения интеграторов на основе чисто "магнитных" методов интегрирования, позволяющих отказаться от применения конденсаторов в цепи обратной связи.

Интегрирующие устройства, использующие магнитные элементы в соответствии с принятой классификацией, делятся на две группы. К первой группе отнесены интеграторы, в которых функцию накопителя и запоминающего устройства выполняет электрический конденсатор, в то время как магнитный элемент обычно играет роль усилителя или преобразователя. К этой группе относится, например, МРУ с емкостью в цепи обратной связи.

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

Вторая группа объединяет в себе интегрирующие устройства, в которых в качестве накопителя и элемента памяти фигурирует магнитный сердечник, а роль усилительного элемента выполняет магнитный, электронный или любой другой усилитель, в зависимости от особенностей конкретной схемы. Примером интеграторов этой группы служат рассмотренные в этой главе интеграторы с индуктивной обратной связью и интеграторы на основе магнитных аналоговых запоминающих устройств.

Достоинством интеграторов первой группы в частности МРУ является возможность их получения из однокаскадного базисного усилителя включением конденсатора в цепь обратной связи. При этом можно сочетать функции суммирования нескольких входных сигналов с последующим интегрированием полученной суммы. В то же время теоретически показана желательность с точки зрения повышения точности интегрирования и постоянной времени иметь в цепи обратной связи конденсаторы относительно большой емкости. К сожалению, последние, как правило, обладают малыми сопротивлениями утечки $R_{ут}$. Последнее обстоятельство приводит к тому, что передаточное сопротивление R_n базисного усилителя нецелесообразно выбирать выше величины равной приблизительно $19R_{ут}$. Из полученного уравнения МРУ в режиме сумматора-интегратора следует, что последний является инерционным звеном второго порядка, основная постоянная времени которого $T_1 = C \frac{R_{ут} R_n}{R_{ут} + R_n}$, в то время как постоянная времени, обуславливающая "колебательность" системы $T_2 = \sqrt{T_1 T_k}$, где T_k - конструктивная постоянная времени. Указанные постоянные времени определяют верхнюю и нижнюю границу интегрируемых частот. Динамический диапазон интегрируемых частот D можно приближенно оценивать по формуле $D = \sqrt{\frac{T_1}{T_k}}$.

Теоретически, для испытанных рабочих макетов МРУ, указанный диапазон составил величину порядка 10^3 . Намечены некоторые пути улучшения основных характеристик магнитных интеграторов с емкостной обратной связью. Один из таких путей может заключаться в построении магнитных интеграторов по схеме "модулятор-демодулятор" с выбором в качестве первого каскада магнитного модулятора с выходом на удвоенной частоте, характеризующегося низким уровнем собственных "шумов".

Предложен ряд схем интеграторов с индуктивной обратной связью, позволяющих в однокаскадных усилителях получить постоянные времени до нескольких тысяч секунд. Интегратор представляет МРУ, в котором тем или иным способом (рассмотрены три способа) одна из управляющих обмоток зашунтирована небольшим сопротивлением. Анализ передаточной функции такого интегратора показывает, что он представляет собой одноемкостное (в отличие от интегратора с конденсатором в цепи обратной связи) инерционное звено, что обуславливает существенно более высокий верхний предел интегрируемых частот. Отмечается, что само шунтирование входных обмоток усилителя достаточно малым сопротивлением повышает стабильность нуля и характеристик усилителя за счет устранения влияния утечек четных гармоник. Показано, в связи с этим, что закорачивание входных обмоток МРУ с одновременным размыканием цепи отрицательной обратной связи может быть использовано для построения аналоговых запоминающих устройств для хранения информации в течение времени до нескольких минут.

Проведено подробное исследование весьма перспективных интегрирующих устройств, сочетающих электромагнитную обратную связь с магнитной аналоговой памятью, впервые предложенных М.А.Розенблатом и О.Г.Касаткиным в 1963г. Эти интеграторы по-

зволяют при отсутствии входного сигнала полностью устранить дрейф выходного напряжения и при необходимости сколь угодно долго хранить значение интеграла после снятия входного сигнала. Показано, что без учета инерционности усилителя, подобные устройства являются одноемкостными инерционными звеньями с исключительно высокими постоянными времени (порядка сотен тысяч секунд на частоте 400 гц). Совместно с М.А.Боярченковым, Ф.И.Кербниковым и М.А.Розенблатом, диссертантом предложены две новые схемы интеграторов, позволяющие функции интегрирования и запоминания совместить с функцией суммирования нескольких входных сигналов. Рабочий макет одной из модификаций интегратора с так называемой магнитной обратной связью характеризовался следующими параметрами: допустимое время интегрирования с точностью не хуже 1% составляет приблизительно 500 сек, приведенный ко входу дрейф выходного напряжения 50 мкв, пороговое напряжение около 100 мкв, постоянная времени устройства 1,2 · 10⁵ сек. Сердечник трансфлюксора выполнен из сплава 50 НП. Просто решена проблема индикации "заполнения" интегратора: при достижении потоком в управляющем плече трансфлюксора значений насыщения $\pm \Phi_s$, напряжение обратной связи падает до нуля и ток на выходе усилителя резко возрастает до величины, ограниченной лишь омическим сопротивлением обмотки. Этот ток используется для сигнализации о "заполнении" интегратора и/или для отключения соответствующих цепей.

Пятая глава посвящена вопросам построения функциональных преобразователей для совместной работы с магнитными релаксационными усилителями. В кратком обзоре множительных устройств отмечаются наиболее перспективные пути построения умножителей и генераторов функций на магнитных элементах. В частности, указывается на перспективность использования для

этой цели гальвано-магнитных эффектов (магниторезисторов), позволяющих получить полосу пропускания по каждому из входов умножителя до 1 мгц.

Анализ существующих принципов построения множительных устройств на магнитных элементах позволил рекомендовать для использования в системе магнитных аналоговых элементов схему четырехквadrантного умножения, предложенную Миура и Хирано и реализующую математическую зависимость вида $xy = \frac{1}{2} [(x+y)^2 - x^2 - y^2]$ что позволяет использовать лишь один, однокаскадный, базисный магнитный усилитель. Наряду с исследованием этой схемы, диссертантом предложен и испытан четырехквadrантный умножитель, реализующий аналогичную зависимость и предназначенный для перемножения двух напряжений невысокого уровня (≤ 10 в) в двухпроводной системе. Обе схемы имеют одинаковую точность не хуже 2% и полосу пропускания по обоим входам порядка 10 гц.

Рассматриваются вопросы построения функциональных преобразователей на магнитных элементах. Выявлены специфические особенности работы последних в цепях с МРУ, заключающиеся в низком уровне входных сигналов (обычно до 10в) и в наличии пульсаций напряжения во входных сигналах. Последнее обстоятельство приводит к необходимости включения фильтров либо на выходе соответствующих МРУ, либо на входе функционального преобразователя для уменьшения пульсаций, обуславливающих дополнительную погрешность преобразования. На примере типичного генератора функций, реализующего степенные функции, показано, что указанная погрешность в зависимости от уровня пульсаций и "крутизны" характеристики преобразователя может достигать 100% и более. Приводится общее выражение и несколько простых расчетных формул, позволяющих оценить погрешность преобразования в зависимости от формы кривой входного напряжения. Вместе

с тем показывается, что наличие определенного, небольшого уровня пульсаций при выполнении функциональных преобразований методом кусочно-линейной аппроксимации, может привести к уменьшению методической погрешности аппроксимации. Такой "желательный" уровень (коэффициент) пульсаций q во входных напряжениях приблизительно определяется соотношением $q = 1,1\sqrt{\delta}$ где δ - заданная точность преобразования. Как показывает анализ, кусочно-линейную аппроксимацию функций целесообразно выполнять методом внешних касательных, дающим в условиях пульсаций меньшую дополнительную погрешность.

В диссертации имеются три приложения, иллюстрирующие выполнение на МРУ конкретных схем промышленной автоматики и вычислительной техники.

В приложении I рассмотрен релейный ПИ-регулятор на магнитных элементах, предназначенный для регулирования тепловых процессов. Одним из основных требований к регулятору явилось требование высокой надежности при работе в тяжелых производственных условиях в течение длительного времени (до 5000 часов) без ремонта и обслуживания. Командное устройство регулятора включает в себя магнитный сумматор, магнитное реле и магнитный интегратор, последний выполняет функцию инерционного звена с постоянной времени до 100 сек. Приведенные результаты испытаний регулятора подтверждают его высокую надежность, проявляющуюся, в частности, в способности работать при значительных колебаниях температуры (до 60°C) и напряжения (от 50 до 125% номинального).

В приложении 2 приводится схема и результаты испытаний макета вычислительного устройства на МРУ. Устройство предназначено для управления электрическим режимом дуговой ферросплавной печи и вырабатывает, в соответствии с заданным

законом, командный сигнал для управления выходными устройствами. Магнитный аналоговый вычислитель состоит из сумматора, интегратора и функционального преобразователя (квадратора). Суммарная погрешность выполнения операций не превышает 1,5%.

В приложении 3 рассматривается методика набора решения типовой вычислительной задачи (уравнения Матве) на МРУ. Приводятся расчеты коэффициентов передачи отдельных блоков. Отмечается, что применение МРУ позволяет по сравнению с аналогичной схемой на ламповых УПТ сократить число функциональных блоков с 7 до 5.

В решении вопросов рассмотренных в работе диссертант участвовал в составе коллектива лаборатории магнитных и полупроводниковых элементов и устройств автоматики ИАТ(ТК), в связи с чем в работе естественно и неизбежно использован целый ряд результатов, полученных диссертантом совместно с коллегами по лаборатории. В частности, теоретический анализ погрешности различных типов МРУ выполнен диссертантом совместно с д.т.н., проф. М.А.Розенблатом. Часть экспериментального материала, иллюстрирующего этот раздел, предоставлен автору к.т.н. Ф.И.Кербниковым. Последний также любезно предоставил ряд результатов, изложенных в гл. I настоящей работы и в Приложении 2. Отдельные практические вопросы, связанные с построением новых схем интеграторов на основе магнитного аналогового запоминающего устройства, разработаны диссертантом совместно с д.т.н., проф. М.А.Розенблатом, к.т.н. Боярченко-вым, к.т.н. Кербниковым, с привлечением некоторых схемных решений, полученных ранее к.т.н. О.Г.Касаткиным. Материал Приложения I является результатом более равной работы, выполненной диссертантом совместно с М.А.Розенблатом, М.А.Боярченко-вым, Ф.И.Кербниковым и Е.Д. Дариним.

Полученные в работе основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Рассмотрены методы построения магнитных решающих усилителей (МРУ). Показано, что МРУ целесообразно выполнять на основе усилителя напряжения, в идеальном случае характеризующегося бесконечно малым входным и выходным сопротивлениями. Указанной идеализации наилучшим образом отвечает однокаскадный, реверсивный магнитный усилитель с самоэснением, с суммированием выходных напряжения на балластных сопротивлениях, рекомендованный в качестве базисного усилителя для устройств, входящих в систему магнитных аналоговых элементов. В качестве схемы базисного усилителя целесообразно использовать схему магнитного усилителя со средней точкой, отличающуюся стабильностью характеристик и малым числом составных компонентов. Отмечается, что для обеспечения максимальных величин передаточного сопротивления при заданном линейном диапазоне характеристики "вход-выход" усилителя, в последнем должна быть предусмотрена нелинейная (в общем случае) положительная обратная связь. В базисном усилителе рекомендуется использовать так называемое "автоматическое" смещение, позволяющее помимо упрощения схемы, существенно (в два и более раз) уменьшить дрейф выходного напряжения усилителя. В качестве магнитного материала для сердечников усилителя целесообразно использовать материалы с максимальным отношением магнитной проницаемости к индукции насыщения (типа железо-никель-молибденового пермаллоя 79НМУ).

2. На основе анализа различных типов МРУ и экспериментального исследования показано, что наилучшим образом требованиям применения в системе магнитных аналоговых элементов отвечает МРУ с суммированием на сопротивлениях, с двумя встречно-включенными входными обмотками. Последнее обстоятельство позволяет:

а) достигнуть высоких коэффициентов усиления и за счет этого снизить основную погрешность, б) получить в однокаскадном усилителе возможность при желании инвертировать или повторить знак отдельных входных напряжений или их алгебраической суммы, в) существенно сократить по сравнению с ламповыми и транзисторными усилителями число решающих блоков при построении заданной функциональной схемы. Перечисленные преимущества схемы иллюстрированы практическими примерами, рассмотренными в приложениях. Для случая необходимости гальванической развязки входных сигналов в системе магнитных элементов целесообразно предусмотреть многообмоточный МРУ с отдельными для каждого входного сигнала обмотки. В основу выбора входных и выходных параметров МРУ положены требования соответствующих ГОСТов, а также требования, предъявляемые к электрической аналоговой ветви Универсальной Международной Системы автоматического контроля, регулирования и управления (УРС), утвержденные секцией приборостроения и автоматики постоянной комиссии СЭВ по машиностроению.

3. Получены обобщенные выражения для передаточных функций двух типов МРУ с двумя входными обмотками и с обмотками отдельными для каждого входного сигнала, позволяющие с учетом практически оправданных ограничений провести анализ статических и динамических характеристик МРУ в различных режимах работы последнего. Показано, что магнитный сумматор, с учетом принятых допущений, является инерционным звеном первого порядка, постоянная времени которого определяется индуктивностью входной обмотки и суммарным коэффициентом передачи по каждому из входов. Магнитный сумматор-интегратор на основе МРУ представляет собой в общем случае звено второго порядка, основная по-

стояния времени которого определяется главным образом величиной передаточного сопротивления МРУ, емкостью и утечкой конденсатора в цепи обратной связи, в то время как постоянная времени, обуславливающая "колебательность" системы, определяется как величиной индуктивности входной цепи, так и параметрами конденсатора в цепи обратной связи. Получены формулы для определения входного выходного сопротивления МРУ, определяющих возможность сочетания его с другими элементами и устройствами. Показано, в частности, что в общем случае условия передачи сигналов по различным входам МРУ неодинаковы и зависят от характера отрицательной обратной связи (электрическая или магнитная).

4. Проведен подробный анализ погрешности, в результате которого получены в наиболее общем виде выражения для статической и динамической погрешностей МРУ в различных режимах работы последнего, с учетом вероятностного характера распределения факторов, обуславливающих случайную составляющую общей погрешности. Показано, что суммарная ошибка МРУ состоит из ряда первичных погрешностей, обусловленных конечной величиной передаточного сопротивления базисного усилителя, наличием конечного омического и индуктивного сопротивлений входных обмоток МРУ, неточной установкой параметров входных цепей и цепи обратной связи (включая и утечки при включении в этих цепях конденсаторов), ошибками во входных напряжениях, а также наличием дрейфа выходного напряжения и неточной установкой "нуля" усилителя. Полученные общие выражения для погрешностей позволяют сделать вывод о том, что в отличие от ламповых схем, основная статическая погрешность МРУ не зависит от суммарного коэффициента передачи по каждому из входов. В то же время наличие конечного омического сопротивления вход-

ной обмотки в случае магнитной обратной связи в МРУ может привести к возникновению дополнительной погрешности, зависящей от суммарного коэффициента передачи по входам, подключенным к данной входной обмотке МРУ. Показана зависимость динамической погрешности МРУ, обусловленной наличием индуктивности входных обмоток, от коэффициентов передач по каждому из входов. Полученные в диссертации выражения основной погрешности для различных типов МРУ позволяют сделать вывод об инвариантности формы основной погрешности МРУ по отношению к характеру обратной связи и виду суммирования. Получены формулы приведения дрейфа выходного напряжения МРУ ко входу, при этом показано, что погрешность от дрейфа нулевого уровня МРУ в основном определяется типом базисного усилителя и сопротивлением цепи обратной связи, и не зависит, при постоянной величине последнего, от числа суммируемых сигналов и коэффициентов передач по отдельным входам. В работе, наряду с общими выражениями для погрешности МРУ приведены упрощенные формулы, позволяющие быстро и наглядно оценить погрешность МРУ в различных режимах работы, обусловленную основными факторами, информация о которых обычно имеется в распоряжении исследователя.

5. Сравнительная оценка различных типов магнитных суммирующих усилителей, а также анализ статических и динамических характеристик последних позволили установить, что а) в системе магнитных аналоговых элементов целесообразно предусмотреть два типа суммирующих усилителей: 1) с двумя одинаковыми входными обмотками, соединенными общей "землей", и 2) с раздельными, гальванически не связанными обмотками. Первый тип сумматора целесообразно рассматривать как основной, в то время как второй удобно использовать преимущественно для построения функциональных преобразователей в тех случаях, когда требует-

ся гальваническая "развязка" входов, б) основная статическая погрешность магнитного сумматора практически не зависит от числа входов и коэффициентов передач по каждому из них, в) у суммирующих усилителей может появиться дополнительная погрешность, обусловленная конечным сопротивлением входных обмоток. В работе показана возможность устранения указанной погрешности посредством шунтирования одного из входов соответствующим сопротивлением. Динамические характеристики сумматора в первую очередь зависят от конструктивной постоянной времени и суммарного коэффициента передачи по всем входам. Показано, что надлежащим выбором величины фильтра на выходе усилителя можно существенно (в несколько раз) расширить полосу пропускаемых им частот на уровне ± 3 дБ.

6. Проведена классификация методов интегрирования электрических сигналов на магнитных элементах. Отмечены достоинства и выявлены ограничения, присущие магнитным интеграторам, использующих в качестве накопителя электрический конденсатор. Показано, что магнитный сумматор-интегратор, являясь инерционным звеном второго порядка, имеет ограниченный сверху и снизу диапазон интегрируемых частот, получены необходимые расчетные соотношения для нахождения предельных интегрируемых частот. В связи с необходимостью использования в МРУ конденсаторов относительно большой емкости, показана нецелесообразность выбора передаточного сопротивления базисного усилителя выше определенной величины, зависящей от сопротивления утечки конденсатора. Получены формулы для погрешности МРУ с режимом интегратора, из которых в частности следует, что погрешность интегрирования состоит из трех составляющих, обусловленных конечной величиной передаточного сопротивления, дрейфом выходного напряжения и постоянной времени утечки конденсатора.

Показано, что с увеличением емкости конденсатора первые две составляющих общей погрешности уменьшаются, в то время как третья остается практически постоянной.

7. Предложен метод получения больших постоянных времени в МРУ без введения емкостной обратной связи, заключающийся в шунтировании двух встречно-включенных относительно входного сигнала обмоток управления небольшим сопротивлением. Показано, что такой интегратор представляет собой одноемкостное (в отличие от интегратора с емкостной обратной связью) инерционное звено, что позволяет существенно расширить верхний предел интегрируемых частот. Предлагаемый принцип может быть положен в основу построения аналоговых запоминающих устройств для хранения информации в течение времени до нескольких минут.

8. Проведено подробное исследование интеграторов, сочетающих электромагнитную обратную связь с магнитной аналоговой памятью. Показано, что подобные устройства без учета инерционности усилителя являются одноемкостными инерционными звеньями с исключительно высокими постоянными времени (до сотен тысяч секунд на частоте 400 Гц). Диссертантом совместно с М.А.Боярченковым, Ф.И.Кербниковым и М.А.Розенблатом предложены и проанализированы две новые схемы таких интеграторов, позволяющие добавить к функции интегрирования и запоминания функцию суммирования нескольких входных сигналов. Разработанные интеграторы имеют самостоятельное значение и переданы ряду организаций для практического внедрения в новых разработках.

9. Анализ существующих принципов построения множительных устройств на магнитных элементах позволил рекомендовать для использования в системе магнитных аналоговых элементов четырехквadrантное множительное устройство с функциональным преобра-

зованием входных сигналов, реализующее функцию умножения по закону, отличному от обычно применяемого в ламповых умножителях, что позволяет использовать для этой цели лишь один однокаскадный базисный усилитель. Наряду с известной схемой, предложенной Миура и Хирао, диссертантом предложена схема, реализующая аналогичный закон для умножения в четырех квадрантах двух напряжений в двухпроводной схеме с гальванической развязкой входе и выхода.

10. Выявлены специфические особенности работы функциональных преобразователей и множительных устройств в цепях с МРУ, заключающиеся в низком уровне входных сигналов (обычно до 10В) и в наличии пульсаций напряжения во входных сигналах. Последнее обстоятельство приводит к необходимости включения фильтров либо на выходе соответствующих МРУ, либо на входе функционального преобразователя для уменьшения пульсаций, обуславливающих дополнительную погрешность преобразования. Показано, что указанная погрешность в зависимости от типа функционального преобразователя и уровня пульсаций может достигать 100% и более. Вместе с тем показано, что наличие определенного, небольшого уровня пульсаций при выполнении функциональных преобразователей по методу кусочно-линейной аппроксимации, может привести к уменьшению методической погрешности аппроксимации. Получены расчетные соотношения для определения погрешности типового генератора функций в зависимости от формы волны входного напряжения. Для выполнения кусочно-линейной аппроксимации различных функций рекомендуется метод внешних эталонных, дающий в условиях пульсаций меньшую методическую погрешность.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. В.К.Раев, М.А.Розенблат. Анализ погрешности однокаскадного магнитного решающего усилителя. Автоматика и телемеханика, № 7, 1966.
2. М.А.Боярченко, Ф.И.Кербяков, В.К.Раев. Опыт построения комплекса магнитных аналоговых решающих элементов. Сб. Магнитные элементы промышленной автоматики, т.1, Изд-во "Наука", 1966.
3. М.А.Розенблат, М.А.Боярченко, Ф.И.Кербяков, J.D.Larin, В.К.Раев. The Bases of Designing a System of Magnetic Elements for Information Processing in Analog Form. Proc. Conf. on Automation Control (IFAC), 1966.
4. М.А.Розенблат, М.А.Боярченко, О.Г.Касаткина, Ф.И.Кербяков, В.К.Раев. Integrators Using Magnetic Analog Storage, "Magnetics" (Sp. Issue), Aug. 1966
5. В.К.Раев. Множительные устройства для совместного применения с операционными магнитными усилителями. Сб. "Техническая кибернетика", Изд-во "Наука", 1956.
6. В.К.Раев. Усилитель с управляемым коэффициентом усиления, Сб. "Теория и применение автоматических систем." Изд-во "Наука", 1964.
7. В.К.Раев. О влиянии пульсаций выходного напряжения магнитных усилителей на работу нелинейных функциональных преобразователей, Сб. "Магнитные элементы промышленной автоматики" т.1, Изд-во "Наука", 1966.
8. М.А.Боярченко, Ф.И.Кербяков, В.К.Раев, М.А.Розенблат. Импульсные регуляторы на бесконтактных магнитных элементах. Изд-во "Энергия", 1966.