

**На правах рукописи**

**Петров Александр Сергеевич**

**МЕТОД, МОДЕЛИ И УСТРОЙСТВО ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ  
В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

**Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Курск - 2013**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» на кафедре «Вычислительная техника» в совместной научно-исследовательской лаборатории Центра информационных технологий в проектировании РАН и Юго-Западного государственного университета «Информационные распознающие телекоммуникационные интеллектуальные системы»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки  
Российской Федерации  
**Титов Виталий Семёнович**

Официальные оппоненты: **Бурмака Александр Александрович**  
доктор технических наук, профессор  
Юго-Западный государственный  
университет, профессор кафедры  
биомедицинской инженерии

**Яковлев Алексей Николаевич**  
кандидат технических наук,  
Научно-исследовательский центр  
(г. Курск) ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Волгоградский государственный  
технический университет, г. Волгоград

Защита диссертации состоится «25» декабря 2013 г. в 12<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.105.02 при Юго-Западном государственном университете по адресу: г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.105.02

Титенко Евгений Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Неотъемлемой частью современных систем контроля и управления являются устройства, позволяющие получать информацию о ходе того или иного процесса, его параметрах и внешних факторах. Эти данные чаще всего получают с помощью датчиков, которые, как правило, включаются в специальные входные цепи систем управления, представляющие собой определенные разновидности электрических цепей. В свою очередь, в большинстве случаев сами датчики представляют собой двухполюсную электрическую цепь с многоэлементной схемой замещения (МДП), параметры которой несут необходимую информацию о состоянии объекта.

Различные аспекты решения проблемы раздельного получения информации о параметрах элементов сложных двухполюсников нашли свое отражение в трудах научных коллективов, возглавляемых В.Ю. Кнеллером, А.А. Кольцовым, К.Л. Куликовским, А.И. Мартяшиным, К.М. Соболевским, Г.И. Передельским, В.М. Шляндиным, Г.А. Штамберггером и др.

На практике широко применяются системы контроля и управления объектами с быстроменяющимися параметрами, такие как системы контроля физических величин при проведении научных исследований, стенды для испытаний радиоэлектронной аппаратуры, механических изделий и другие. Для таких систем необходимо высокое быстродействие датчиков, обеспечивающее работу системы в режиме реального времени. Современная вычислительная техника обладает высокой скоростью обработки поступающей от датчиков информации, так что быстродействие системы контроля и управления в существенной мере определяется скоростью преобразования параметров датчиков в электрические сигналы. Таким образом, актуальной является задача повышения быстродействия преобразователей.

**Целью диссертационной работы** является разработка метода, аппаратных средств и алгоритма параметрической идентификации многоэлементных пассивных RLC-датчиков с числом элементов до шести с требуемым быстродействием в составе системы контроля и управления.

Диссертационная работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ, государственный контракт № 14.В37.21.0598 «Теоретические основы и методы использования распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем для решения дискретных оптимизационных задач», а также хозяйственных договоров № 1.187.12П; 1.15.12Ф «Высокоэффективные методы, алгоритмы и аппаратные средства коррекции ошибок в беспроводных каналах доступа к широкополосным мультимедийным услугам».

**Актуальной научно-технической задачей** является теоретическое обоснование расширения функциональных возможностей аппаратных средств преобразования параметров многоэлементных датчиков, обеспечивающих повышение быстродействия систем контроля и управления и требуемую точность.

Эта задача декомпозирована на следующие частные задачи:

1. Анализ существующих методов, моделей, алгоритмов и аппаратных средств определения параметров пассивных линейных датчиков в устройствах первичной обработки информации в системах контроля и управления общего назначения.

2. Разработка метода прямого преобразования обобщенных параметров многоэлементных двухполюсников, основанного на дифференцировании тестового сигнала и сигнала МДП. Разработка алгоритма преобразования обобщенных параметров многоэлементных датчиков на основе данного метода.

3. Разработка математических моделей прямого преобразования обобщенных параметров пассивных датчиков с применением дифференцирующих каскадов на операционных усилителях и пассивных дифференциаторов на  $RC$ -звеньях.

4. Разработка математических моделей прямого преобразования параметров многоэлементных датчиков с экстремальными характеристиками с применением операции дифференцирования.

5. Построение структурной схемы специализированного устройства идентификации параметров многоэлементных датчиков. Экспериментальное исследование характеристик преобразования.

**Научная новизна результатов работы и основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод прямого преобразования обобщенных параметров датчиков, основанный на многократном дифференцировании тестового сигнала и сигнала МДП, позволяющий сократить временные затраты при создании устройства на основе данного метода.

2. Математические модели прямого преобразования обобщенных параметров пассивных датчиков с применением дифференцирующих каскадов на операционных усилителях и пассивных дифференциаторов на  $RC$ -звеньях, позволяющие упростить и унифицировать аналитические выражения и вычисление искомых параметров.

3. Математические модели прямого преобразования параметров многоэлементных датчиков с применением операции дифференцирования для экстремальных случаев схем замещения, – при наличии короткого замыкания в цепи между полюсами на постоянном токе через индуктивный элемент и обрыва цепи между полюсами из-за емкостного элемента.

4. Структурная схема специализированного устройства идентификации параметров многоэлементных датчиков с применением операций дифференцирования тестового сигнала и сигнала МДП в составе аппаратно-программного комплекса в системе контроля и управления.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись методы теории электрических цепей, операторный метод, методы математического анализа и математического моделирования, теории автоматического управления, теории проектирования устройств ЭВМ.

**Практическая ценность работы.** Предложен метод прямого преобразования обобщенных параметров многоэлементных пассивных датчиков

в установившемся режиме с применением дифференцирования сигналов. Разработаны математические модели и аппаратные средства для реализации устройств параметрической идентификации датчиков в общем случае и для объектов с особыми свойствами схем замещения.

Разработанные метод и математические модели преобразования обобщенных параметров могут быть использованы для создания универсальных аппаратно-программных комплексов в составе систем контроля и управления различными технологическими процессами.

Практическая полезность и научная новизна полученных результатов подтверждены патентом РФ на изобретение № 2422838.

**Реализация и внедрение.** Метод прямого преобразования параметров многоэлементных пассивных двухполюсных (RLC-цепей) и созданные на его основе математические модели линейных двухполюсников, а также алгоритм параметрической идентификации двухполюсников внедрены и прошли промышленное апробирование в ОАО «Фармстандарт-Лексредства» в системе контроля за состоянием воздушной среды в производственных помещениях. Результаты диссертационного исследования внедрены в ООО «НПЦ Информационные технологии» в автоматизированном комплексе индивидуальной охраны транспортных средств «Периметр».

Теоретические результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета в рамках дисциплин «Основы теории цепей и сигналов» и «Моделирование».

Внедрение и апробирование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует п. 3. «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью повышения точности и требуемого быстродействия» паспорта специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и получили положительную оценку на международных, всероссийских и региональных конференциях и симпозиумах: «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск, 2010г.); «Интеллектуальные и информационные системы» (г. Тула, 2011г.); «Наука и инновации в сельском хозяйстве» (г. Курск, 2011г.); «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск, 2012г.); «Информационные системы и технологии» (г. Курск, 2012г.), «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск, 2013г.), на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного технического университета с 2008 по 2013г.г.

**Публикации.** Основные результаты выполненных исследований и разработок опубликованы в 10 научных работах, среди них 3 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, 1 патент РФ на изобретение.

**Личный вклад соискателя.** Все выносимые на защиту научные положения получены соискателем лично. В работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, вклад соискателя состоит в следующем: в [1-3,7] разработаны математические модели параметрической идентификации многоэлементных пассивных двухполусных цепей с дифференцированием сигналов, в [4] – модель для определения параметров многоэлементной схемы замещения и устройство для его реализации на основе метода обобщенных параметров, в [5, 6, 8] – алгоритмы идентификации параметров многоэлементных двухполусников, в [10] – модель для определения  $Y$ -параметров МДП и устройство для его реализации на основе метода обобщенных параметров.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 70 наименований, четырех приложений. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 20 рисунков, 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, описаны итоги применения результатов работы, имеющие научную новизну и практическую значимость.

**В первой главе** проведен анализ существующих алгоритмов и аппаратных средств определения параметров пассивных многоэлементных двухполусников. Наибольшее число работ посвящено средствам определения параметров двухполусных электрических цепей с помощью мостов переменного тока. Теоретически высокое быстродействие обеспечивают способы построения идентификаторов параметров электрических цепей, основанные на анализе переходного процесса в схеме замещения при воздействии на нее скачком напряжения строго заданной амплитуды, либо воздействием импульса экспоненциальной формы. Также находят применение мостовые цепи с импульсным питанием, в которых для возбуждения схемы используются импульсы напряжения, имеющие форму степенной функции времени. Параметры элементов находят расчетным путем по итогам уравнивания после окончания переходного процесса в мостовой цепи.

Недостатком известных алгоритмов преобразования параметров МДП следует отметить то, что они не обладают достаточным быстродействием. К тому же они являются узкоспециализированными. Это обуславливает необходимость поиска новых научно-технических решений, обеспечивающих унификацию алгоритмов определения параметров многоэлементных двухполусных цепей.

**Во второй главе** разработан метод, математическая модель и алгоритм прямого преобразования обобщенных параметров пассивных датчиков. Сущность предлагаемого метода прямого преобразования обобщенных параметров датчиков заключается в следующем:

1. Генератор импульсов формирует тестовые импульсы напряжения, имеющие форму кубической параболы

$$u_{10}(t) = \frac{U_m t^3}{t_n^3}, \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитуда;  $t$  – текущее значение времени в интервале от начала импульса до момента отсчета,  $t_n$  – длительность импульса. После окончания переходного процесса в схеме на МДП устанавливается принужденная составляющая реакции, которая состоит из импульсов кубичной, квадратичной, линейной и прямоугольной форм

$$u_{20}(t) = \frac{3!U_m}{t_n^3} \sum_{r=0}^3 \frac{H_r t^{3-r}}{(3-r)!}, \quad (2)$$

где  $H_0, H_1, H_2, H_3$  – обобщенные параметры передаточной функции делителя, операторное изображение которой в общем случае имеет вид

$$H(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots}. \quad (3)$$

Величины  $b_0, b_1, b_2, \dots, a_0, a_1, a_2, \dots$  определяются элементами МДП и образцового двухполюсника. Обобщенные параметры передаточной функции находят с помощью рекуррентной формулы:

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{b_0}{a_0}, & H_1 &= \frac{b_1 - H_0 a_1}{a_0}, & H_2 &= \frac{b_2 - H_0 a_2 - H_1 a_1}{a_0}, \\ H_3 &= \frac{b_3 - H_0 a_3 - H_1 a_2 - H_2 a_1}{a_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для реализации предлагаемого метода преобразования необходимо условие  $a_0 \neq 0$ . С этой целью, если МДП имеет конечное (не нулевое и не бесконечное) сопротивление для постоянного тока, в качестве образцового двухполюсника используют образцовый резистор  $R_0$ .

2. Для определения обобщенных параметров четырехэлементного МДП применяются кубичные тестовые импульсы и трехкратное дифференцирование питающих импульсов  $u_{10}(t)$  и сигнала  $u_{20}(t)$ . Напряжение кубичных импульсов  $u_{10}(t)$  подается на вход первого канала дифференцирования, состоящего из трех последовательно включенных идентичных дифференцирующих каскадов, а напряжение сигнала  $u_{20}(t)$  – на вход второго дифференциатора.

Допустив, что дифференцирующие каскады имеют идеальную передаточную функцию, сигналы на выходах дифференциаторов первого канала можно представить в виде

$$u_{11}(t) = \frac{3\tau U_m t^2}{t_n^3}; \quad u_{12}(t) = \frac{6\tau^2 U_m t}{t_n^3}; \quad u_{13}(t) = \frac{6\tau^3 U_m}{t_n^3},$$

а сигналы второго канала дифференциаторов равны соответственно

$$u_{21}(t) = \frac{3\tau H_0 U_m t^2}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_1 U_m t}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_2 U_m}{t_{\text{и}}^3},$$

$$u_{22}(t) = \frac{6\tau^2 H_0 U_m t}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau^2 H_1 U_m}{t_{\text{и}}^3}, \quad u_{23}(t) = \frac{6\tau^3 H_0 U_m}{t_{\text{и}}^3},$$

где  $\tau$  – постоянная времени дифференциатора.

3. Из соотношений сигналов на выходах дифференциаторов обоих каналов получены выражения, позволяющие вычислить обобщенные  $H$ -параметры делителя напряжения:

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}}, \quad H_1 = \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot t, \quad H_2 = \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot \frac{t^2}{2}$$

$$H_3 = \left( \frac{u_{20}}{u_{10}} - 3 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot \frac{t^3}{6}. \quad (5)$$

Как видно, процедура определения обобщенных параметров  $H_0, H_1, H_2, H_3$  имеет универсальный характер и не привязана к конкретной модели пассивного многоэлементного двухполюсника. Кроме того, в выражения (5) для обобщенных параметров не входит значение амплитуды питающих импульсов и, следовательно, устраняются погрешности при вычислениях, обусловленные ее нестабильностью.

На основе предложенного метода разработан алгоритм прямого преобразования обобщенных параметров МДП, основанный на дифференцировании сигналов рисунке 1.

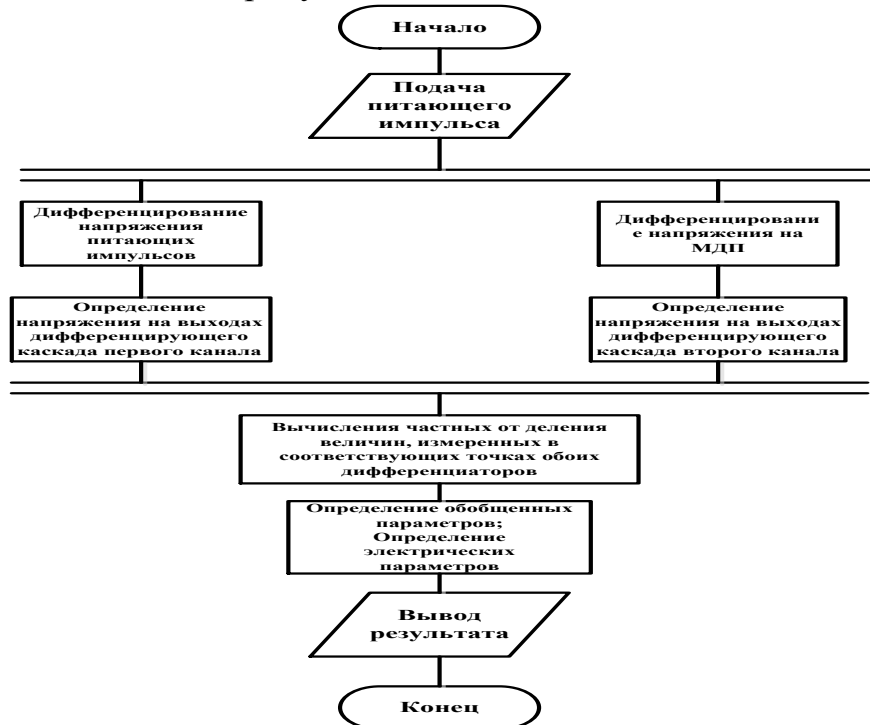


Рис.1. Алгоритм прямого преобразования обобщенных параметров МДП

Требуемое быстродействие достигается за счет параллельных вычислений по двум каналам дифференциаторов.



В третьей главе разработана математическая модель, структурная схема устройства идентификации параметров с применением операции дифференцирования, выполненная на современной элементной базе.

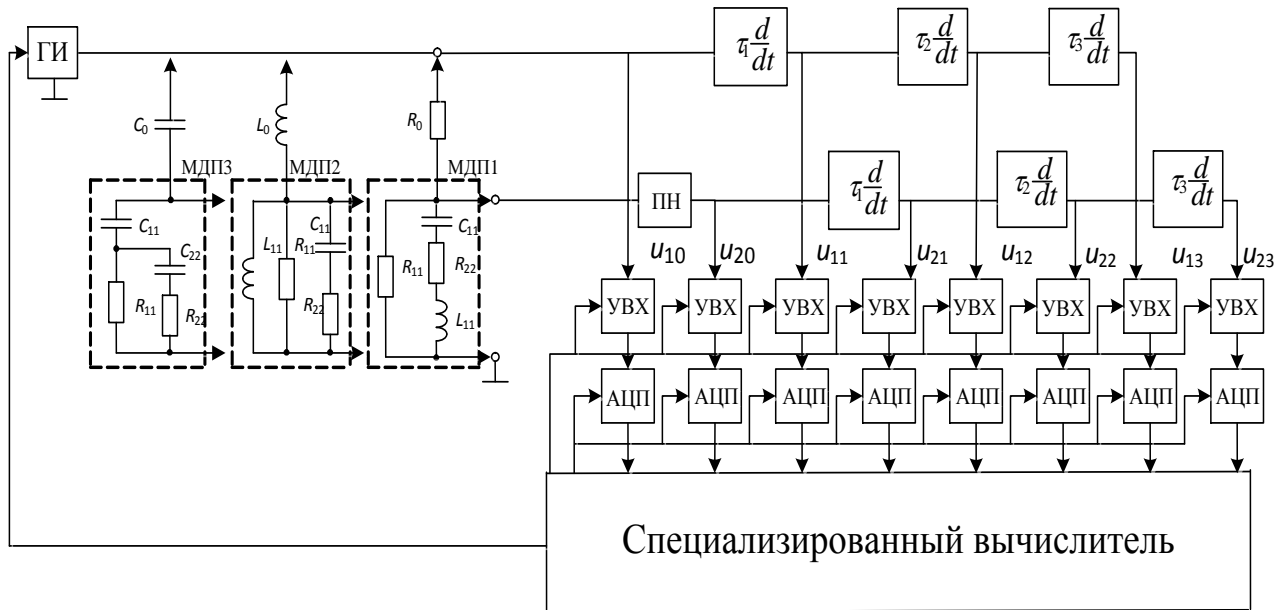


Рис.2. Схема устройства идентификации параметров многоэлементных датчиков, где ГИ – генератор импульсов, ПН – повторитель напряжения, УВХ – устройство выборки и хранения, АЦП – аналого-цифровой преобразователь,  $u_{10}, \dots, u_{23}$  – напряжения на выходах дифференцирующих каскадов; Объектами идентификации являются МДП1 – с конечным сопротивлением, МДП2 с коротким замыканием и МДП3 – с обрывом цепи на постоянном токе

Устройство защищено патентом РФ № 2422838.

Дифференцирующие каскады с передаточной функцией  $K(p) = p\tau$  можно построить только на активных элементах. Однако, дифференциаторы на операционных усилителях (ОУ) без частотной коррекции работают неустойчиво – возбуждаются, генерируя паразитные колебания. На рисунке 3 а, б изображены схемы инвертирующего дифференциатора на операционном усилителе с частотной коррекцией ОУ в области высоких частот. Оба дифференциатора имеют одинаковые частотные свойства. В одном из них включен корректирующий резистор  $R_{кор} \ll R$ , а в другом – корректирующий конденсатор с емкостью  $C_{кор} \ll C$ . Обозначим  $R_{кор} = mR$ ,  $C_{кор} = mC$ . Множитель  $m \ll 1$ . В обоих случаях передаточная функция одного каскада дифференциатора имеет вид

$$K_1(p) = \frac{pRC}{1 + pmRC} = \frac{p\tau}{1 + pm\tau}, \quad (6)$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени;  $p$  – оператор Лапласа.

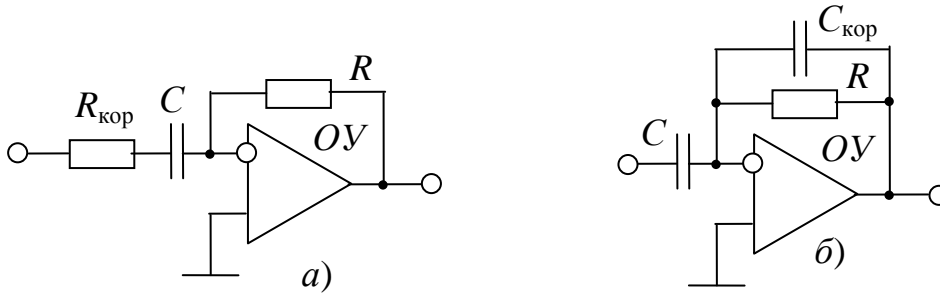


Рис. 3. Дифференциаторы с частотной коррекцией операционного усилителя

Передаточные функции двух и трех последовательно включенных дифференциаторов перемножаются

$$K_2(p) = \frac{(p\tau)^2}{(1 + pm\tau)^2} = \frac{p^2\tau^2}{1 + 2pm\tau + p^2m^2\tau^2}, \quad (7)$$

$$K_3(p) = \frac{(p\tau)^3}{(1 + pm\tau)^3} = \frac{p^3\tau^3}{1 + 3pm\tau + 3p^2m^2\tau^2 + p^3m^3\tau^3}. \quad (8)$$

Сигналы на выходах каждого из трех каскадов первого дифференциатора с передаточными функциями (6) – (8) после окончания переходного процесса имеют вид

$$u_{11}(t) = \frac{3\tau U_m(t^2 - 2m\tau t + 2m^2\tau^2)}{t_{\text{и}}^3}; \quad u_{12}(t) = \frac{6\tau^2 U_m(t - 2m\tau)}{t_{\text{и}}^3}; \quad u_{13}(t) = \frac{6\tau^3 U_m}{t_{\text{и}}^3}.$$

Аналогично определены сигналы на выходах каждого из трех каскадов второго дифференциатора:

$$u_{21}(t) = \frac{3\tau H_0 U_m(t^2 - 2m\tau t + 2m^2\tau^2)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_1 U_m(t - m\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_2 U_m}{t_{\text{и}}^3};$$

$$u_{22}(t) = \frac{6\tau^2 H_0 U_m(t - 2m\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau^2 H_1 U_m}{t_{\text{и}}^3}; \quad u_{23}(t) = \frac{6\tau^3 H_0 U_m}{t_{\text{и}}^3}.$$

МПК в момент времени  $t$  осуществляет отсчет всех указанных величин и вычисляет отношение напряжений на выходах третьих, вторых и первых дифференцирующих каскадов обоих каналов, а также напряжений питающего импульса и на двухполюснике

$$\frac{u_{23}}{u_{13}} = H_0; \quad \frac{u_{22}}{u_{12}} = H_0 + \frac{H_1}{t - 2m\tau}; \quad \frac{u_{21}}{u_{11}} = H_0 + \frac{2H_1(t - m\tau) + 2H_2}{t^2 - 2m\tau t + 2m^2\tau^2};$$

$$\frac{u_{20}}{u_{10}} = H_0 + \frac{3H_1}{t} + \frac{6H_2}{t^2} + \frac{6H_3}{t^3},$$

после чего определяет обобщенные параметры делителя с включенным в него двухполюсником:

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}}; \quad H_1 = \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot (t - 2m\tau);$$

$$\begin{aligned}
H_2 &= \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left( \frac{t^2}{2} - m\tau t + m^2 \tau^2 \right) + \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m\tau t; \\
H_3 &= \left( \frac{u_2}{u_1} - 3 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot \frac{t^3}{6} + \\
&+ \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (m\tau t^2 - m^2 \tau^2 t) + \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m^2 \tau^2 t. \quad (9)
\end{aligned}$$

Предложена математическая модель преобразования параметров МДП с применением в дифференциаторах более простых и стабильных RC звеньев, причем без развязки между каскадами. Схема дифференцирующих RC звеньев представлена на рисунке 4.

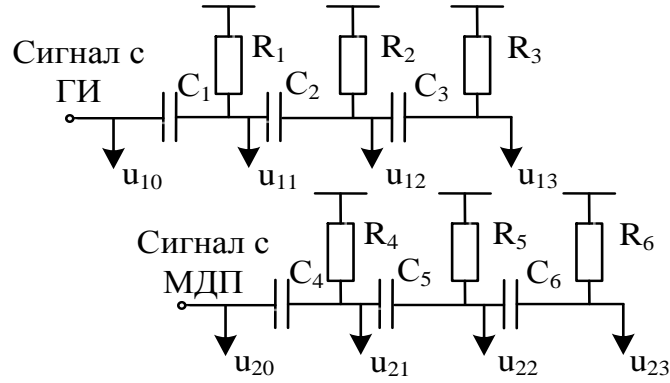


Рис.4. Схема дифференцирующих RC звеньев

Для упрощения аналитических выражений математической модели целесообразно установить значения постоянных времени каждого каскада одинаковыми  $R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3 = \tau$ , но использовать разные значения емкости и сопротивления в каждом каскаде. Например, приняв во втором звене  $R_2 C_2 = RC = \tau$ , в первом звене нужно уменьшить сопротивление и во столько же раз увеличить емкость, а в третьем звене, наоборот, увеличить сопротивление и во столько же раз уменьшить емкость:

$$C_1 = \frac{C}{m}; \quad R_1 = mR; \quad C_3 = mC; \quad R_3 = \frac{R}{m},$$

где  $m < 1$ .

В этом случае передаточные функции по выходу первого, второго и третьего каскада и их обобщенные параметры примут вид

$$K_{\text{IRC}}(p) = \frac{p\tau + p^2(2+m)\tau^2 + p^3\tau^3}{1 + p(3+2m)\tau + p^2(3+2m+m^2)\tau^2 + p^3\tau^3}; \quad (10)$$

$$K_{10} = 0; \quad K_{11} = \tau; \quad K_{12} = -(1+m)\tau^2; \quad K_{13} = (1+3m+m^2)\tau^3; \quad (11)$$

$$K_{2\text{RC}}(p) = \frac{p^2\tau^2 + p^3\tau^3}{1 + p(3+2m)\tau + p^2(3+2m+m^2)\tau^2 + p^3\tau^3}; \quad (12)$$

$$K_{20} = 0; \quad K_{21} = 0; \quad K_{22} = \tau^2; \quad K_{23} = -2(1+m)\tau^3; \quad (13)$$

$$K_{3RC}(p) = \frac{p^3 \tau^3}{1 + p(3+2m)\tau + p^2(3+2m+m^2)\tau^2 + p^3 \tau^3}; \quad (14)$$

$$K_{30} = 0; \quad K_{31} = 0; \quad K_{32} = 0; \quad K_{33} = \tau^3. \quad (15)$$

В установившемся режиме после окончания переходного процесса сигналы на выходах каждого из трех каскадов первого дифференциатора с учетом формы питающего импульса и передаточных функций (10), (12), (14) имеют вид

$$u_{11}(t) = \frac{3\tau U_m (t^2 - 2(1+m)\tau t + 2(1+m)^2 \tau^2)}{t_{\text{и}}^3}, \quad (16)$$

$$u_{12}(t) = \frac{6\tau^2 U_m (t - 2(1+m)\tau)}{t_{\text{и}}^3}, \quad (17)$$

$$u_{13}(t) = \frac{6\tau^3 U_m}{t_{\text{и}}^3}. \quad (18)$$

Аналогично определены сигналы на выходах каждого из трех каскадов второго дифференциатора

$$u_{21}(t) = \frac{3\tau H_0 U_m (t^2 - 2(1+m)\tau t + 2(1+m)^2 \tau^2)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_1 U_m (t - (1+m)\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau H_2 U_m}{t_{\text{и}}^3}; \quad (19)$$

$$u_{22}(t) = \frac{6\tau^2 H_0 U_m (t - 2(1+m)\tau)}{t_{\text{и}}^3} + \frac{6\tau^2 H_1 U_m}{t_{\text{и}}^3}; \quad (20)$$

$$u_{23}(t) = \frac{6\tau^3 H_0 U_m}{t_{\text{и}}^3}. \quad (21)$$

Отношения выходных напряжений третьих дифференцирующих каскадов (21) и (18), вторых дифференцирующих каскадов (20) и (17), первых дифференцирующих каскадов (19) и (16), а также напряжений на МДП и питающего импульса в момент времени  $t$  равны

$$\frac{u_{23}}{u_{13}} = H_0; \quad \frac{u_{22}}{u_{12}} = H_0 + \frac{H_1}{t - 2(1+m)\tau}; \quad \frac{u_{21}}{u_{11}} = H_0 + \frac{2H_1(t - (1+m)\tau) + 2H_2}{t^2 - 2(1+m)\tau t + 2(1+m)^2 \tau^2 + 2m\tau^2};$$

$$\frac{u_{20}}{u_{10}} = H_0 + \frac{3H_1}{t} + \frac{6H_2}{t^2} + \frac{6H_3}{t^3}.$$

Из полученных уравнений специализированный вычислитель (СВ) определяет значения  $H$ -параметров делителя:

$$H_0 = \frac{u_{23}}{u_{13}}; \quad H_1 = \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot (t - 2(1+m)\tau);$$

$$H_2 = \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - 2\frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left( \frac{t^2}{2} - (1+m)\tau t + (1+m)^2 \tau^2 \right) + \left( \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) (1+m)\tau t;$$

$$H_3 = \left( \frac{u_{20}}{u_{10}} - 3\frac{u_{21}}{u_{11}} + 3\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \cdot \frac{t^3}{6} - \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m\tau^2 t +$$

$$+ \left( \frac{u_{21}}{u_{11}} - 2\frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left( (1+m)\tau t^2 - (1+m)^2 \tau^2 t \right).$$

Таким образом простая и стабильная схема на  $RC$  цепях позволяет реализовать метод определения  $H$ -параметров с дифференцированием сигналов.

**В четвертой главе** разработаны математические модели преобразования обобщенных параметров МДП с экстремальными характеристиками:

- 1) двухполусников с нулевым сопротивлением (с коротким замыканием) между полюсами на постоянном токе,
- 2) двухполусников с бесконечным сопротивлением (разрывом цепи между полюсами) на постоянном токе.

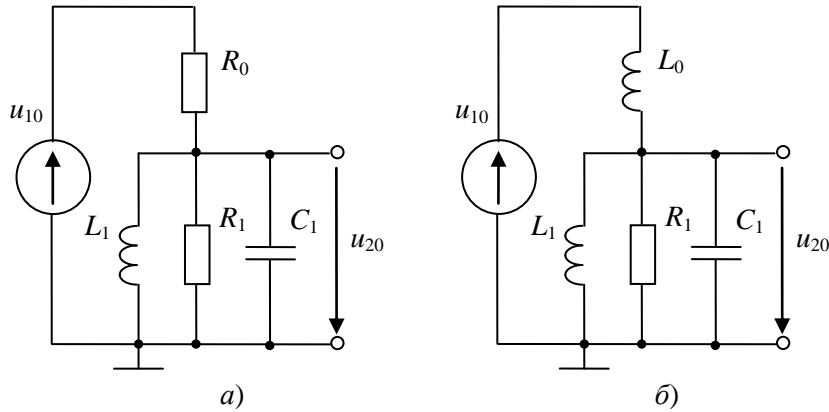


Рис. 5. Схемы замещения двухполусника с индуктивным элементом между полюсами

На рис. 5 а, б представлен двухполусник  $L_1$ - $R_1$ - $C_1$ , в котором индуктивный элемент создает короткое замыкание между полюсами. На рисунке 5 а в качестве образцового элемента используется резистор, а на рисунке 5 б – катушка индуктивности. К достоинствам первой схемы относятся более низкая стоимость образцового элемента, доступность, возможность выбора необходимого номинала сопротивления. К тому же эта схема применима и для двухполусников с конечным сопротивлением.

Выражение для передаточной функции имеет вид

$$H(p) = \frac{pR_1L_1}{R_1R_0 + p(R_1 + R_0)L_1 + p^2R_1R_0L_1C_1}.$$

$H$ -параметры передаточной функции схемы замещения равны

$$H_0 = 0; \quad H_1 = \frac{L_1}{R_0}; \quad H_2 = -\frac{(R_1 + R_0)L_1^2}{R_1R_0^2}; \quad H_3 = \frac{R_1L_1^2}{R_0} \left[ \frac{(R_1 + R_0)^2 L_1}{R_1^2 R_0^2} - C_1 \right],$$

из чего следует, что параметр с нулевым индексом  $H_0$  тождественно равен нулю и не содержит информации ни об одном элементе двухполюсника. Поэтому для определения трех электрических параметров двухполюсника требуется добавить, по крайней мере, еще один, четвертый, обобщенный параметр (в данном примере  $H_3$ ) и использовать питающие импульсы кубической формы ( $n = 3$ ) и трехкаскадные дифференциаторы. Результаты определения сигналов  $u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}$  в первом канале и сигналов  $u_{20}, u_{21}, u_{22}, u_{23}$  во втором позволяют вычислить  $H$ -параметры по формуле (5).

При использовании в качестве образцового индуктивного элемента  $L_0$  (рисунок 5 б) передаточная функция примет вид

$$H(p) = \frac{R_1L_1}{R_1(L_1 + L_0) + pL_1L_0 + p^2R_1L_1L_0C_1}.$$

При этом  $H$ -параметры функции

$$H_0 = \frac{L_1}{L_1 + L_0}; \quad H_1 = -\frac{L_1^2L_0}{R_1(L_1 + L_0)^2}; \quad H_2 = \frac{L_1^2L_0}{(L_1 + L_0)^2} \left( \frac{L_1L_0}{R_1^2(L_1 + L_0)} - C_1 \right).$$

В этом случае для идентификации трехэлементного двухполюсника требуется три обобщенных параметра и достаточно использовать питающие импульсы квадратичной формы ( $n = 2$ ) и двухкаскадные дифференциаторы. Результаты определения сигналов  $u_{10}, u_{11}, u_{12}$  в первом канале и сигналов  $u_{20}, u_{21}, u_{22}$  во втором позволяют вычислить  $H$ -параметры в соответствии с (5):

$$H_0 = \frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)}; \quad H_1 = \left( \frac{u_{21}(t)}{u_{11}(t)} - \frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)} \right) \cdot t; \quad H_2 = \left( \frac{u_{20}(t)}{u_{10}(t)} - 2 \frac{u_{21}(t)}{u_{11}(t)} + \frac{u_{22}(t)}{u_{12}(t)} \right) \cdot \frac{t^2}{2}.$$

Для определения трех параметров достаточно тестового импульса кубической формы и трехкаскадных дифференциаторов ( $n = 3$ ).

Двухполюсники, имеющие бесконечное сопротивление на постоянном токе из-за присутствия в цепи между полюсами емкостного элемента, показаны на рисунке 6 а, б.

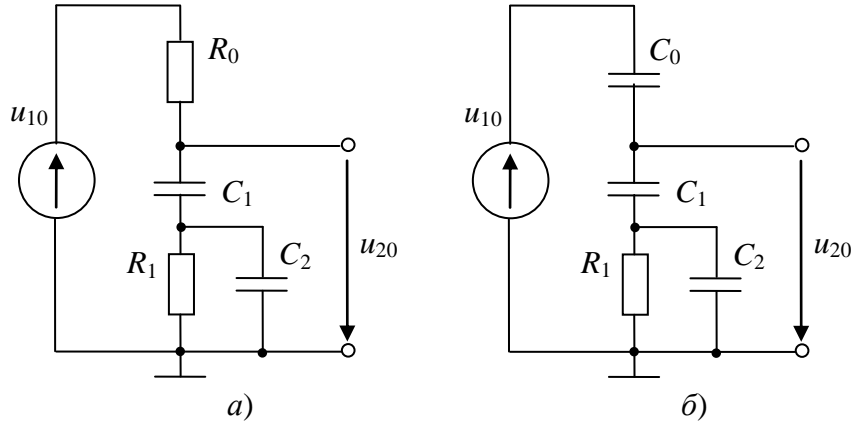


Рис. 6. Схемы замещения двухполюсника с емкостным элементом между полюсами

В схеме с образцовым резистором рисунке 6 а, передаточная функция делителя напряжения  $R_0 - Z(p)$  имеет вид

$$H(p) = \frac{1 + pR_1(C_1 + C_2)}{1 + p[R_0C_1 + R_1(C_1 + C_2)] + p^2R_1R_0C_1C_2}.$$

Параметр с нулевым индексом  $H_0$  тождественно равен единице, т. е. не содержит информации об элементах двухполюсника. Следовательно, требуется увеличить показатель степени тестового импульса и количество дифференциаторов. В рассматриваемом примере для идентификации трех параметров ( $C_1, R_1, C_2$ ) необходимо использовать питающие импульсы кубической формы и трехкаскадный дифференциатор.

В случае применения образцового емкостного элемента (конденсатора  $C_0$  на рисунке 6 б), передаточная функция примет вид

$$H(p) = \frac{C_0 + pR_1(C_1 + C_2)C_0}{C_1 + C_0 + pR_1[(C_1 + C_2) + C_1C_2]}. \quad (26)$$

Для определения трех параметров

$$H_0 = \frac{C_0}{C_1 + C_0}; \quad H_1 = -\frac{R_1C_1C_0^2}{(C_1 + C_0)^2}; \quad H_2 = \frac{R_1^2C_1C_0^2}{(C_1 + C_0)^2} \left( \frac{C_1C_0}{C_1 + C_0} + C_2 \right)$$

достаточно тестового импульса квадратичной формы и двухкаскадных дифференциаторов ( $n = 2$ ).

Следовательно, для сокращения аппаратных затрат целесообразно при идентификации параметров МДП с индуктивным элементом между полюсами использовать образцовую катушку индуктивности, а при идентификации МДП с емкостным элементом между полюсами – образцовый конденсатор. При использовании образцового резистора необходимо предусмотреть повышение показателя степени тестового сигнала и включение дополнительных каскадов в оба дифференциатора.

Отметим, что равенство нулю или единице  $H$ -параметра с нулевым индексом может использоваться в качестве признака типа идентифицируемого МДП.

Таким образом, для определения обобщенных параметров многоэлементных двухполюсников следует учитывать зависимость требуемого показателя степени тестового сигнала и количества каскадов в дифференциаторах от особенностей схемы замещения объекта идентификации и типа образцового элемента.

В пятой главе рассмотрены результаты практической реализации предложенного метода преобразования параметров датчиков, факторы, влияющие на точность определения обобщенных и электрических параметров элементов датчика, и предельные возможности аппаратных средств параметрической идентификации многоэлементных датчиков. На основе проведенных исследований разработана схема контроля физических величин объекта управления. Структурная схема приведена на рисунке 7, где  $f$  – параметры воздействия,  $x$  – определяемые параметры,  $y$  – управляемые параметры, Д – датчик, МК – микроконтроллер, ИМ – исполнительный механизм.

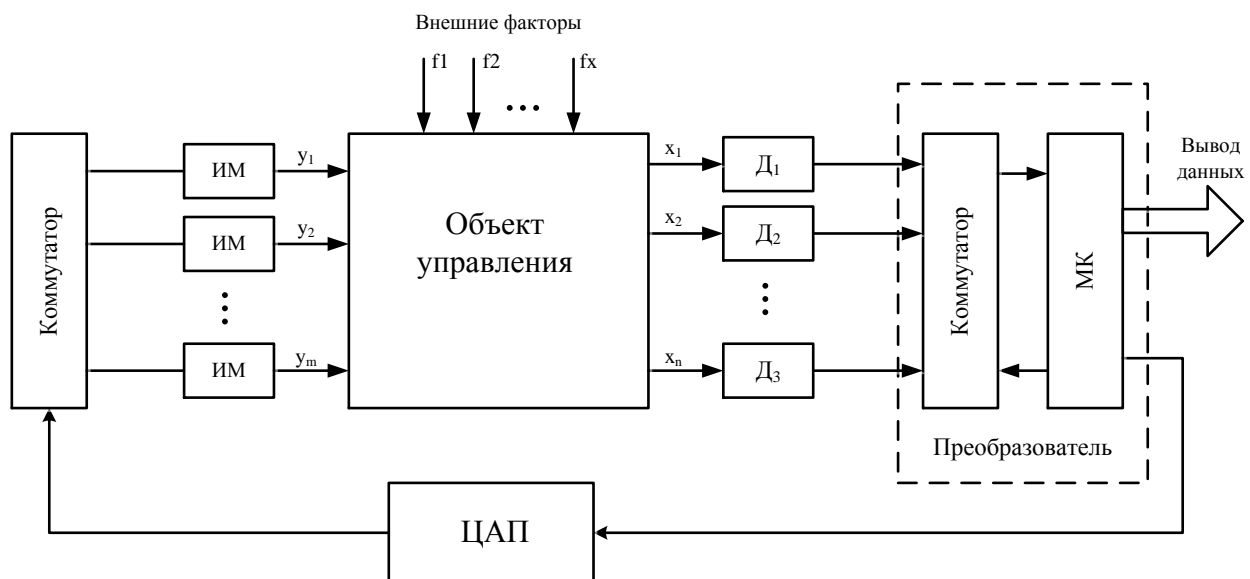


Рис. 7. Структурная схема системы контроля и управления

Преобразование параметров шестиэлементного датчика, схема которого приведена на рисунке 8, осуществлялось в течение одного питающего датчик импульса. Форма импульса имеет вид функции пятой степени, длительность определяется временем переходного процесса и для выбранного датчика составляет 200 мкс.



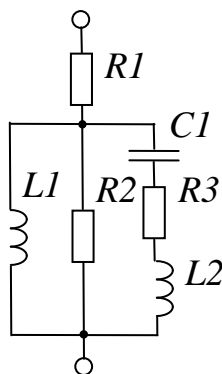


Рис. 8. Схема замещения шестиэлементного RLC-датчика

Показано, что точность определения обобщенных параметров обусловлена двумя факторами. Из таблицы 2 видно, что амплитуда сигнала на двухполюснике с каждым очередным параметром уменьшается в 10...15 раз. Составляющая старшей степени имеет амплитуду 5...10 В, а шестая составляющая – 1...10 мкВ, т.е. находится на пределе чувствительности реальных устройств выборки и аналого-цифрового преобразования. Это свойство присуще любому методу идентификации параметров МДП. Второй фактор обусловлен снижением чувствительности преобразователя к изменению электрических параметров элементов, что особенно заметно для пятого и, в особенности для шестого обобщенного параметра.

Последний фактор определяет предельные возможности расширения числа определяемых параметров RLC-датчиков.

Таблица 2

## Результаты экспериментальных исследований

Электрические параметры	$R_1$ 2 кОм	$L_1$ 5 мГн	$R_2$ 3 кОм	$C_1$ 4 нФ	$R_3$ 5 кОм	$L_2$ 10 мГн
Н-параметры	$H_0$ 0,5	$H_1$ , мкс 0,625	$H_2$ , мкс <sup>2</sup> -1,823	$H_3$ , мкс <sup>3</sup> -7,183	$H_4$ , мкс <sup>4</sup> 307,409	$H_5$ , мкс <sup>5</sup> -5,982*10 <sup>-3</sup>
Амплитуда импульса	5В	0,125В	5,8мВ	280мкВ	94мкВ	7мкВ
Потеря чувствительности (раз)	$\frac{\delta R_1}{\delta H_0}$	$\frac{\delta L_1}{\delta H_1}$	$\frac{\delta R_2}{\delta H_2}$	$\frac{\delta C_1}{\delta H_3}$	$\frac{\delta R_3}{\delta H_4}$	$\frac{\delta L_2}{\delta H_5}$
	2	1,04	1,2	1,25	1,28	12,5

Результаты экспериментальных исследований характеристик устройства идентификации параметров датчиков приведены в таблице 3.

Таблица 3

## Результаты экспериментальных исследований быстродействия

Устройства идентификации параметров датчика	Вид схемы замещения	Быстродействие	Кол-во определяемых параметров датчиков
Мостовые цепи с уравниванием	RLC	7 мин.	$\leq 5$
Преобразователи на переходном процессе	RL, RC	40 мкс.	$\leq 4$
Устройство прямого преобразования по совокупности отсчетов	RL, RC	2 мин.	$\leq 6$
Преобразователь с дифференцированием сигналов	RLC	200 мкс.	$\leq 6$

Как видно из таблицы 3, устройства прямого преобразования с дифференциаторами обеспечивают самое высокое быстродействие, широкий класс определяемых датчиков, возможность работы систем управления в режиме реального времени.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи: расширению функциональных возможностей аппаратных средств преобразования параметров датчиков, обеспечивающих повышение быстродействия систем контроля и управления и требуемую точность.

В ходе решения данной задачи получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод прямого преобразования обобщенных параметров датчиков, основанный на многократном дифференцировании тестового сигнала и сигнала МДП, позволяющий сократить время преобразования до 200 мкс.

2. Разработаны математические модели прямого преобразования обобщенных параметров пассивных датчиков с применением дифференцирующих каскадов на операционных усилителях и пассивных дифференциаторов на  $RC$ -звеньях, которые позволили упростить и унифицировать аналитические выражения и вычисления искомых параметров объекта идентификации.

3. Разработаны математические модели прямого преобразования параметров многоэлементных датчиков с применением операции дифференцирования для экстремальных случаев схемы замещения, – при наличии короткого замыкания в цепи между полюсами на постоянном токе через индуктивный элемент и обрыва цепи между полюсами из-за емкостного элемента, что позволило учитывать зависимость требуемого показателя степени тестового сигнала и количества каскадов в дифференциаторах от особенностей схемы замещения объекта измерения и типа образцового элемента.

4. На основе созданного метода разработана структурная схема специализированного устройства идентификации параметров многоэлементных датчиков с применением операций дифференцирования тестового сигнала и сигнала МДП в составе аппаратно-программного комплекса в системе контроля и управления, обеспечивающего высокое быстродействие при требуемой точности измерения. Проведены экспериментальные исследования быстродействия преобразования параметров.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. **Петров, А. С.** Измерительный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с дифференцированием сигналов [Текст] / В. И. Иванов, В. С. Титов, **А. С. Петров** // Измерительная техника. – 2012. – № 9. – С. 51–54.

2. **Петров, А. С.** Измерительный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с дифференцированием сигналов на  $RC$ -звеньях [Текст] / В. И. Иванов, В. С. Титов, **А. С. Петров** // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – №2. – С. 73–78.

3. **Petrov, A.S.** Conversion of the parameters of multicomponent twoterminal

networks with signal differentiation [Текст] / V. I. Ivanov, V. S. Titov, **A. S. Petrov** // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 55. – N 9. – P. 1071-1076.

## Патенты

4. **Пат. 2422838** Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> G01R17/10. Способ и устройство измерения параметров многоэлементных двухполюсников [Текст] / В.И. Иванов, В.С. Титов, **А.С. Петров**; заявитель и патентообладатель Курск. гос. техн. ун-т. – №2010107720/28; заявл. 02.03.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18. – 14 с.

## Другие научные публикации

5. **Петров, А.С.** Применение преобразователя «напряжение - ток» в измерителе параметров многоэлементных двухполюсников / **А.С. Петров**, Д.А. Голубов, В.И. Иванов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации : сборник материалов IX международной конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2010. - С. 102-104.

6. **Петров, А.С.** Алгоритмы идентификации многоэлементных двухполюсников на основе обобщенных параметров / **А.С. Петров**, Д.А. Голубов, А.Л. Ключев, // Интеллектуальные и информационные системы: сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. – Тула: ТГУ, 2011. - С. 45-47.

7. **Петров, А.С.** Измерительный преобразователь резистивно-емкостных датчиков / **А.С. Петров**, В.В. Губанов, А.В.Балашов // Наука и инновации в сельском хозяйстве: сборник материалов научно-практической конференции. – Курск: КГСХА, 2011. - С. 177-181.

8. **Петров, А.С.** Способ измерения параметров многоэлементной пассивной двухполюсной цепи / **А.С. Петров**, Д.А. Голубов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов X международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - С. 88-90.

9. **Петров, А.С.** Преобразователи параметров RLC-двухполюсников с дифференцированием сигналов / **А.С. Петров** // Информационные системы и технологии: сборник материалов I региональной научно-технической конференции. – Курск. ЮЗГУ, 2012. – С. 79-81.

10. **Петров, А.С.** Применение обобщенных Y-параметров для измерения RLC-двухполюсников / **А.С. Петров**, В.И. Иванов, А.В. Балашов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов X международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - С. 81-83.

Подписано в печать 22.11.2013. Формат 60×84 1/16.

Печатных листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_.

Юго-Западный государственный университет  
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.