На правах рукописи

Planet

КАНАРЕЙКИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФАЗОВОГО СДВИГА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦАП

Специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет» (БГАУ) на кафедре автоматики и электротехники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Сапельников Валерий Михайлович кафедра электротехники и электрооборудования предприятий ГОУ ВПО «Уфимский государственный неф-

тяной технический университет»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Ясовеев Васих Хаматович

кафедра информационно-измерительной техники ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

доктор технических наук, профессор Баширов Мусса Гумерович кафедра электрооборудования и автоматики промышленных предприятий Салаватский филиал ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Ведущая организация: ГУП Центр метрологических исследований «Урал-Гео»

Защита диссертации состоится «23» сентября 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ) по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К Маркса, 12, в актовом зале 1 корпуса УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета; автореферат размещён на сайте университета http://www.ugatu.ac.ru/science.

Автореферат разослан «___»____2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета д-р техн. наук, доцент

В. С. Фетисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Преобразователи фазового сдвига (фазовращатели и калибраторы фазы) находят широкое применение, как в системах управления, так и в информационно-измерительных системах – высокоточные (эталонные, образцовые) фазовращатели, называемые калибраторами фазы.

На практике калибраторы фазы применяются в составе прецизионных двухфазных генераторов, в полярно-координатных компенсаторах, компенсационных фазометрах, вектормерах, а также для градуировки, аттестации и поверки фазометрической аппаратуры. Фазовращатели применяются в системах управления с фазовой автоподстройкой, с фазовой синхронизацией, трансиверах прямого преобразования, в системе фазового управления силовыми преобразователями и тиристорными усилителями, в станках ЧПУ с фазовым управлением и т.д.

Схемотехника фазовращателей зависит от диапазона частот, для которого они предназначены, пределов изменения угла фазового сдвига (УФС) и точности его установки. В низкочастотном диапазоне и в диапазоне радиочастот (до нескольких МГц) в качестве преобразователей фазового сдвига обычно применяют четырехполюсники, состоящие из сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей. В интегральном исполнении на низкочастотный диапазон преобразователей фазового сдвига с высокой точностью и высокой разрешающей способностью нет, в отличие от высокочастотного и сверхвысокочастотного диапазона. Поэтому проблема создания низкочастотного преобразователя фазового сдвига с высокими метрологическими характеристиками является весьма актуальной. Следует отметить, что долгое время фазовращатели являлись аналоговыми. С середины 60-х годов XX века в связи развитием цифровой и микропроцессорной техники и её внедрением в устройства информационноизмерительной, вычислительной техники стали появляться первые работы по созданию фазовращателей с поразрядным регулированием фазового сдвига и цифровым управлением. С середины 80-х годов развитие получили методы построения преобразователей фазового сдвига, основанные на применении синтезаторов частоты и принципе деления частоты.

Большой вклад в становление и развитие фазометрии внесли известные отечественные и зарубежные ученые: С. А. Кравченко, Е. Д. Колтик, О. П. Галахова, Н. М. Вишенчук, М. К. Чмых, В. М. Сапельников, В. И. Кокорин, Ю.А.Скрипник, С.М.Маевский, В. В. Смеляков, А.А. Ahmed, D.K. Weaver, R.B. Dome, J.H. Park, G.E. Pihl, R.S. Turgel, D.T. Hess, K.K. Clarke, P.Tobola, J. Velecky, G.N. Stenbakken и другие.

Анализ научной литературы показал, что среди разнообразных способов построения широкополосных преобразователей фазового сдвига на низкочастотный диапазон большими достоинствами по своей функциональности, техническим характеристикам и схемотехнической реализации имеют синуснокосинусные фазовращатели на основе функциональных ЦАП, состоящие из

двух основных блоков: блока квадратурных напряжений и блока функционального преобразования.

Цель работы. Цель работы заключается в разработке широкополосного преобразователя фазового сдвига с поразрядным регулированием УФС для систем управления и информационно-измерительных систем, использующих компенсационные методы.

Задачи исследования. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

- анализ существующих способов и методов построения преобразователей фазового сдвига;

- разработка математической модели широкополосного квадратурного устройства для преобразователей фазового сдвига на основе функциональных ЦАП, анализ его метрологических характеристик;

- разработка схемотехнической и математической моделей преобразователя фазового сдвига, построенного на функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией;

-экспериментальное исследование функциональных преобразователей со сплайновой кубической аппроксимацией, определение метрологических характеристик и оценка погрешностей преобразователя фазовых сдвигов.

Методы исследований. В диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. При решении поставленной задачи использовались методы теоретической электротехники, основы информатики, цифровой и вычислительной техники, информационноизмерительной техники, теория цифровой обработки сигналов, специальные разделы высшей математики, методы математического моделирования, моделирование на ПЭВМ с использованием пакетов LabVIEW, Microsoft Office, MathCAD, Micro-Cap, LabVIEW, Free Pascal, KiCad, DipTrace и лабораторной установки NI ELVIS.

На защиту выносятся:

1. Использование оригинальной схемы преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией позволяет повысить точность воспроизведения фазовых сдвигов.

2. Результаты исследований широкополосного квадратурного устройства.

3. Схемотехническая и математическая модели преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией.

4. Экспериментальные и теоретические исследования метрологических характеристик преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Впервые разработана схема широкополосного преобразователя фазовых сдвигов, состоящая из широкополосного квадратурного устройства, функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией и сумматора (патент №2408136).

2. Впервые разработана математическая и схемотехническая модели цифроуправляемого преобразователя фазовых сдвигов.

3. Экспериментально исследованы метрологические характеристики преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП со сплайновой кубической аппроксимацией.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждена их сходимостью и повторяемостью при теоретических и экспериментальных исследованиях, и математическом моделировании.

Практическое значение и внедрение результатов работы. Проведено экспериментальное исследование широкополосного преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией, определены методические и инструментальные погрешности.

Разработан экспериментальный стенд, позволяющий с помощью настольной станции NI ELVIS и программного обеспечения LabVIEW определять характеристики фазовращателя на фиксированных частотах.

Результаты исследований и разработки фазовращателя применяются в учебном процессе БашГУ, на предприятии ООО «Металлпрофиль».

Апробация работы. Содержание и основные результаты работы докладывались и обсуждались на: международной научно-техническая конференции «Инновации и перспективы сервиса» (Уфа, Уфимск. гос. академия экономики и сервиса, 18 декабря 2007 г.); международной научной конференции «Инновации в интеграционных процессах образования, науки, производства» (г. Мелеуз, филиал ФГОУ ВПО «Московский государственный университет технологий и управления», 17-18 апреля 2008 г.); всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XVIII Международной специализированной выставки «АгроКомплекс – 2008» (Уфа, БГАУ, 2008г.); международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (г. Пенза, ПГУ, 2008 г.); всероссийской конференций с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (10-12 ноября 2008 г. ИПУ РАН г. Москва); II всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование (Уфа, УГНТУ, 2009); всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XIX Международной специализированной выставки «Агро-Комплекс - 2009» (Уфа, БГАУ, 2009г.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ.

Структура и объём диссертации. Общий объём диссертационной работы составляет 174 страницы машинописного текста, состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, четырёх глав материала, содержит 88 иллюстраций, 17 таблиц и 8 приложений. Список литературы содержит 175 единиц наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, выносимые на защиту, указана научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор и классификация преобразователей фазового сдвига, и их применение. Преобразователи фазового сдвига по схемной общности делятся на две группы схем (многополюсники с одним входом – частотозависимые фазовращатели, состоящие из неоднородных элементов; многополюсники с несколькими входами – широкополосные фазовращатели, состоящие из однородных элементов). Рассмотрены и приведены основные параметры, характеристики, достоинства и недостатки всех групп фазовращателей. Фазовращатели, представляющие собой многополюсники с несколькими входами, имеют больше достоинств по своей функциональности. В этой группе фазовращателей особый схемотехнический класс представляют синусно-косинусные фазовращатели.

Принцип работы синусно-косинусных фазовращателей может быть описан соотношением [3]:

$$U_{Bbix} = U\cos\varphi + jU\sin\varphi = Ue^{j\varphi}.$$
 (1)

Это уравнение описывается структурной схемой, представленной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема синусно-косинусного фазовращателя:

КУ – квадратурное устройство, квадратурный фазовый модулятор (QPSK) [10];

Эталонный $sin\phi$ и $cos\phi$ – устройства, обеспечивающие высокоточное воспроизведение зависимостей $sin\phi$ и $cos\phi$ (функциональные ЦАП [6]);

ФП – синусно-косинусные функциональные преобразователи;

 $\sum -$ сумматор.

Источники погрешностей синусно-косинусного преобразователя фазовых сдвигов: методические погрешности реализации зависимостей $cos \varphi$ и $sin \varphi$, инструментальные погрешности реализации расчетных значений элементов схемы, погрешность воспроизведения 90 °-го УФС и равенств модулей питающих напряжений и др. Рассмотрены основные известные способы построения КУ, методы реализации функциональных ЦАП и их погрешности. Во второй главе рассмотрены принципы построения широкополосных квадратурных устройств на низкочастотный диапазон на основе фазоразностных *RC*-цепей. В ходе анализа была выбрана схема квадратурного устройства (рисунок 2, а), разработана методика и алгоритмы расчета, проектирование и проведено экспериментальное исследование [9]. Для расчетов составлена схема замещения квадратурного устройства, представленная на рисунок 2, б.



Рисунок 2 – Схема широкополосного квадратурного устройства

Разработана математическая модель квадратурного устройства, учитыващая допуски на изготовление пассивных элементов $R = R_{hom} \pm \Delta R$ и $C = C_{hom} \pm \Delta C$.

Расчетные формулы элементов устройства:

$$C_{0} = \frac{1}{2\pi f_{0}R_{0}}, f_{0} = \sqrt{f_{\min} \cdot f_{\max}},$$

$$a = \frac{(A-D)bd}{b^{2} + d(d+1)D - bd(A-D)}, b = Dd\sqrt{\frac{n_{1}(1+d)}{dn_{1}(AB - BD - D) - (A-D)(B-A)}},$$

$$d = \frac{1}{2n_{1}(AB - D)} \left[n_{2} + \sqrt{n_{2}^{2} - 4(AB - D)(B - A)(A - BD)}\right],$$

$$e = \frac{(A-D)bd}{(b^{2} + d^{2}D)n_{1} + D(B - 1)d}, f = \frac{deD}{b}, K = \frac{1}{1+2a},$$

$$rge \quad A = \alpha_{3} \left(\frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\alpha_{5}}\right) + \frac{1}{\alpha_{1}\alpha_{5}}, B = \alpha_{3} + \frac{1}{\alpha_{5}} + \frac{1}{\alpha_{1}}, D = \frac{\alpha_{3}}{\alpha_{1}\alpha_{5}},$$

α_i – действительные постоянные коэффициенты, являющиеся особыми точками функций,

 $n_1 = B + D - A - 1, n_2 = A(B - A) + B(A - BD) - D(1 - D).$

Коэффициенты *a*, *b*, *d*, *e* и *f* показывают, во сколько раз сопротивление фазоразностной схемы больше R_0 , а емкости меньше C_0 .

Уравнения математической модели квадратурного устройства:

$$\begin{cases} -U_2 - U_1 = (Z_3 + Z_1) \cdot I_1 + Z_3 I_2; \\ -U_2 = (Z_3 + Z_{01}) \cdot I_2 + Z_3 I_1; \\ U_2 + U_1 = (Z_4 + Z_5) \cdot I_3 + Z_4 I_4; \\ U_2 = (Z_4 + Z_{02}) \cdot I_4 + Z_4 I_3. \end{cases}$$
(2)





Рисунок 3 – Погрешности широкополосного квадратурного устройства

Разработанные программы в среде Pascal и MathCAD позволяют проводить анализ квадратурного устройства с учетом отклонений параметров пассивных элементов R_0 , R_a , R_b , R_d , R_e , R_f , C_0 , C_a , C_b , C_d , C_e , C_f . Результаты представляются в виде баз данных по квадратурному устройству. Исследования показали, что при задании на всех элементах одинаковых допусков в сторону превышения (уменьшения) номиналов наблюдается смещение диапазона в область меньших (больших) частот с сохранением значений максимальных отклонений. С увеличением дисбаланса амплитуд входных напряжений квадратурного устройства дисбаланс выходных напряжений также увеличивается. Установлено, что при применении пассивных элементов с допуском 0,1 % погрешности квадратурного устройства в заданном диапазоне не превосходят по УФС 0,1 °, а по амплитуде – 0,01 %.

Экспериментальные исследования проводились на макете квадратурного устройства, спроектированного на диапазон частот 1-10кГц (коэффициент перекрытия частот $F_{max}/F_{min}=10$), с помощью измерителя разности фаз Ф2-34 (основная погрешность в диапазоне 0,5 Гц – 5 МГц составляет ± 0.01 °), цифрового вольтметра В7-34А (основная погрешность в диапазоне частот от 60 Гц до 100 кГц – ±[0,15+0,05(U_{xx}/U_x -1)], %), низкочастотного прецизионного генератора сигналов Г3-122 (рисунок 4).



Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки

Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Отклонение разности фаз выходных напряжений экспериментальной схемы от 90 °

Из рисунка 5 видно, что абсолютная погрешность отклонения от 90 ° в этом диапазоне составила не более 0,2 °, причем абсолютная максимальная погрешность смещена в сторону больших частот, что свидетельствует о подборе номиналов пассивных элементов с допусками в сторону уменьшения. Это согласуется с анализом математической модели. Экспериментальная разность амплитуд выходных напряжений не превысила 0,1 %.

Экспериментальное исследование широкополосного квадратурного устройства подтвердило идентичность результатов теоретических и экспериментальных исследований. При сужении диапазона перекрытия частот $F_{max}/F_{min} < 10$ квадратурное устройство погрешность уменьшается до 0,1 °.

В третьей главе рассмотрены принципы построения функционального ЦАП гибридным методом на основе сплайновой аппроксимации *n*-го порядка.

Теория сплайновой (кусочно-многочленной) аппроксимации достаточно хорошо описана. Метод сплайновой аппроксимации позволяет минимизировать методические погрешности путем двойной коррекции: путем увеличения порядка многочленов *n* и путем увеличения количества отрезков (интервалов) аппроксимации *i*. По критерию Фишера и методу наименьших квадратов, начиная с полинома 3-го порядка, дисперсия остатков синусной и косинусной зависимости имеют величину 4-го порядка малости, что соответствует высокой точности, требуемой в поставленной нами задачи, и является минимальным оптимальным порядком сплайна.

Показано оригинальное схемотехническое решение реализации синуснокосинусных преобразователей фазового сдвига на основе функциональных ЦАП с полиномиальной аппроксимацией [11], предложен и рассмотрен преобразователь фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП 3-го порядка со сплайновой аппроксимацией (рисунок 6) [10,12], разработаны его математическая и схемотехническая модели. Формирование выходного сигнала происходит в соответствии с выражением (1).





В качестве коэффициентов $sin\varphi$ и $cos\varphi$ взяты полиномы, аппроксимирующие функции $cos(\pi \cdot x/2)$ и $sin(\pi \cdot x/2)[4]$:

$$k_{1} = a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}x^{2} + a_{3i}x^{3} \approx \cos\frac{\pi}{2}x,$$

$$k_{2} = b_{0i} + b_{1i}x + b_{2i}x^{2} + b_{3i}x^{3} \approx \sin\frac{\pi}{2}x.$$
(3)

где x – относительное значение цифрового кода N/N_{max} , $x \in [0,1]$, N – текущий код; N_{max} – максимальное значение цифрового кода N; i=1,2,..n – количество интервалов аппроксимации (количество полиномов).

Значения коэффициентов кубического сплайна при равномерном разбиение интервалов аппроксимации приведены в табл. 1, 2. Как показали исследования дисперсии остатков естественного кубического сплайна немного меньше, чем кубического сплайна интерполяционным методом.

коэффи-	<i>n</i> =1	<i>n</i> =2		<i>n</i> =3			<i>n</i> =4			
циенты	<i>i</i> =1	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>i</i> =4
b_{0i}	0,000	0,000	-0,043	0,000	-0,006	-0,093	0,000	-0,001	-0,024	-0,123
b_{1i}	1,000	1,000	1,164	1,000	1,035	1,285	1,000	1,011	1,097	1,349
b_{2i}	-0,057	-0,005	-0,214	-0,001	-0,068	-0,306	-0,001	-0,029	-0,139	-0,352
b_{3i}	-0,111	-0,155	-0,066	-0,162	-0,120	-0,044	-0,164	-0,140	-0,093	-0,033
a_{0i}	1,000	1,000	0,957	1,000	0,989	0,941	1,000	0,996	0,974	0,934
a_{1i}	0,000	0,000	0,164	0,000	0,062	0,201	0,000	0,028	0,114	0,215
a_{2i}	-0,579	-0,527	-0,736	-0,511	-0,631	-0,763	-0,506	-0,578	-0,687	-0,773
a_{3i}	0,111	0,066	0,155	0,044	0,120	0,162	0,033	0,093	0,140	0,164

Таблица 1 – Коэффициенты естественного кубического сплайна

коэф-	n=1	n	=2		<i>n=3</i>			n=	4	
ты	<i>i</i> =1	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i=3</i>	<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i=3</i>	<i>i</i> =4
b_{0i}	-0,002	0,000	-0,058	0,000	-0,008	-0,100	0,000	-0,002	-0,026	-0,127
b_{1i}	1,613	1,574	1,878	1,571	1,637	2,036	1,571	1,593	1,732	2,129
b_{2i}	-0,173	-0,023	-0,576	-0,007	-0,185	-0,769	-0,003	-0,081	-0,351	-0,877
b_{3i}	-0,441	-0,592	-0,245	-0,622	-0,455	-0,167	-0,632	-0,536	-0,358	-0,126
a_{0i}	0,997	1,000	0,959	1,000	0,989	0,943	1,000	0,996	0,974	0,936
a_{1i}	0,056	0,008	0,248	0,003	0,099	0,307	0,001	0,046	0,176	0,331
a_{2i}	-1,497	-1,311	-1,798	-1,269	-1,550	-1,872	-1,254	-1,426	-1,688	-1,900
a_{3i}	0,441	0,245	0,592	0,166	0,455	0,622	0,126	0,358	0,536	0,632

Таблица 2 – Коэффициенты кубического сплайна интерполяционным методом

Принцип работы фазовращателя (рисунок 6). На аналоговые входы ЦАП1 и ЦАП4 поступают гармонические сигналы U_{ex} и jU_{ex} с одинаковыми амплитудой и частотой, но сдвинутые относительно друг друга на 90°. Каждый из каскадно-соединенных ЦАП умножает сигнал, поступающий на его аналоговый вход, на величину входного кода «х» и изменяет его полярность. Поэтому на выходах ЦАП1 – ЦАП3 получаем напряжения: $-xU_{ex}$, x^2U_{ex} , $-x^3U_{ex}$, а на выходах ЦАП8 – ЦАП10 получаем ряд напряжений: $-jxU_{ex}$, jx^2U_{ex} , $-jx^3U_{ex}$. Выходные напряжения ЦАП4 – ЦАП7 моделируют слагаемые полиномов a_{0i} - a_{3i} , выходные напряжения ЦАП11 – ЦАП14 – полиномов b_{0i} - b_{3i} (3). С помощью кодопреобразователей КП 1 и КП 2 загружаются коэффициенты сплайна. В качестве кодопреобразователей могут использоваться ОЗУ, ПЗУ с малой памятью или микроконтроллер. Сигналы с входа фазовращателя U_{ex} и jU_{ex} участвуют в формировании постоянных составляющих воспроизводимых полиномов. Напряжения суммируются на операционных усилителях А1 и А2 с соответствующими коэффициентами. Операционный усилитель А1 служит для корректировки знаков коэффициентов полиномов выражения (3) при однополярном режиме работы ЦАП, в случае биполярного включения ЦАП в нем нет необходимости. Схема фазовращателя на рисунке 6 не содержит нестандартных элементов. Функциональные ЦАП можно выполнить в виде одной многоканальной интегральной микросхемы, также как и фазовращатель.

Методическая погрешность УФС и амплитуды напряжения фазовращателя определяются соотношениями:

$$\Delta \varphi = \varphi - \operatorname{arctg} \frac{k_2}{k_1}, \tag{4}$$
$$\delta U_{_{\theta blx}} = \frac{U_{_{\theta x}} - U_{_{\theta blx}}}{U_{_{\theta x}}} = 1 - \sqrt{k_1^2 + k_2^2}.$$

Методические погрешности фазовращателя, обусловленные влиянием функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией при различном количестве интервалов аппроксимации *i*, представлены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Методические погрешности фазовращателя по амплитуде и УФС при использовании функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимации:

а) n=1, б) n=2, в) n=3

Установлено, что метод сплайновой аппроксимации по сравнению с методами Тейлора и Чебышева обеспечивает меньшие значения методических погрешностей воспроизведения УФС и амплитуды фазовращателя при $n \ge 3$, т.е. при аппроксимации синусной и косинусной зависимостей сплайном из трех и более полиномов.

Рассмотрим погрешности фазовращателя, вызванные широкополосным квадратурным устройством. Если погрешность квадратуры равна θ , то при

10

формировании в фазовращателе выходного напряжения в соответствии с зависимостью (1) модуль выходного напряжения составит U' и будет отличаться от заданного значения U, а его УФС будет определяться значением φ' , и также не будет совпадать с истинным значением φ (рисунке 8).



Рисунок 8 – Векторная диаграмма напряжений фазовращателя при наличии погрешности квадратуры θ

Погрешности фазовращателя в этом случае определяются уравнениями:

$$\delta U_{abx} = \frac{U - U}{U} = \sqrt{1 + 2\frac{\sin\theta}{a + \frac{1}{a}}} - 1 \approx \frac{\sin\theta}{a + \frac{1}{a}},$$

$$\Delta \varphi = \varphi - \varphi' = \operatorname{arctg} \frac{U_y}{U_x} - \operatorname{arctg} \frac{U_y \cos\theta}{U_x + U_\gamma \sin\theta},$$

$$\delta U_{abx} = \gamma_{U1} \cos^2 \varphi + \gamma_{U2} \sin^2 \varphi,$$

$$\Delta \varphi = \varphi - \varphi' = \operatorname{arctg} \frac{U_y}{U_x} - \operatorname{arctg} \frac{(1 + \gamma_{U1})U_y}{(1 + \gamma_{U2})U_x},$$

$$U_x$$
(5)

где $a = \frac{U_x}{U_y}$, γ_{U1} и γ_{U2} - относительные погрешности синфазной и квад-

ратурной составляющих напряжения.

Погрешности фазовращателя, обусловленные влиянием погрешностей квадратурных напряжений по УФС θ и неравенству модулей γ_U , представлены на рисунке 9. Параметры θ и γ_U для математической модели фазовращателя определяются из математического моделирования широкополосного квадратурного устройства (глава 2). Как видно из рисунка 9 наибольшая погрешность, обусловленная погрешностями квадратурного устройства, возникает в фазовращателе при УФС равном $\pi/4$ или 45 °.



Рисунок 9 – Погрешности воспроизведения УФС и амплитуды фазовращателя, определяемые квадратурным устройством



Рисунок 10 – Распределение погрешности УФС фазовращателя, вызванные методическими погрешностями функциональных ЦАП и погрешностями квадратурного устройства

При использовании модели широкополосного квадратурного устройства с допусками пассивных элементов не более 0,1 % (требования к квадратурному устройству сформулированные в главе 2 по математической модели) погрешности фазовращателя составляют: по УФС не более 0,1 °, а по амплитуде – 0,01 %. Погрешности фазовращателя по математической модели представлены на рисунке 10.

Схемотехническое моделирование фазовращателя в программе Micro-Cap подтвердило схемотехническую работоспособность фазовращателя, его элементов [5,6] и адекватность математической модели.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией. Для согласования каскадов квадратурного устройства и функциональных ЦАП используются ЦАП с *R-2R* матрицей.

Функциональные ЦАП со сплайновой аппроксимацией, реализующие синусную и косинусную зависимости выполнены на 4-х канальных 12-разрядных

12

прецизионных микросхемах ЦАП МАХ514 на *R-2R*-резистивной матрице с последовательным цифровым интерфейсом и операционных усилителях К140УД17, при этом разрешающая способность преобразователя фазовых сдвигов составляет 0,02 °. Разработана экспериментальная установка, включающая настольную станцию NI ELVIS и виртуальный прибор в среде графического программирования LabVIEW[1, 7, 8].

С помощью экспериментального стенда производится исследование метрологических характеристик фазовращателя в два этапа. Первый этап эксперимента – исследование макетов функциональных ЦАП, реализующих синусную и косинусную зависимости (рисунок 11, а) [1]. Второй этап – исследование блока функциональных преобразователей (рисунок 11, б).



Рисунок 11 – Схема для исследования функционального ЦАП и фазовращателя на основе функциональных ЦАП с помощью лабораторной установки NI ELVIS и LabVIEW

Результаты экспериментальной оценки погрешностей синуснокосинусного фазовращателя на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией представлены на рисунке 12.





Рисунок 12 – Погрешность воспроизведения амплитуды и УФС фазовращателя без учета влияния квадратурного устройства при: a) *n*=1, б) *n*=2, в) *n*=3

Исследования показали высокую сходимость теоретических и экспериментальных исследований, как по качественным, так и по количественным характеристикам [2]. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Экспериментальные и теоретические погрешности преобразователя фазового сдвига

Число интервалов		теорет	ически	e	экспериментальные				
n	1	2	3	4	1	2	3	4	
$\Delta \varphi$, °	0,15	0,025	0,003	0,0007	0,2	0,06	0,05	0,04	
$\delta U_{\scriptscriptstyle 6blx},$ %	1,5	0,1	0,02	0,007	1,5	0,15	0,06	0,04	

В приложениях приведены:

- расчет и анализ широкополосного квадратурного устройства в программах Turbo Pascal и MathCad, таблицы для выбора диапазонов перекрытия квадратурного устройства с заданной точностью, таблицы анализа данных;

- патенты на изобретения;

14

- программа в среде MathCad для исследования погрешностей фазовращателя и его основных блоков, идеализированная модель работы синусно-косинусного фазовращателя;

- текст модели фазовращателя в схемотехнической программе Micro-Cap в формате P-Spice;

- таблица с характеристиками прецизионных операционных усилителей для проектирования функциональных ЦАП;

- макетные платы экспериментальной установки;

- акты внедрения и использования результатов научно-практических исследований.

Основные результаты и выводы по работе

1. Проанализированы существующие способы построения преобразователей фазового сдвига. Широкополосные преобразователи фазового сдвига на практике реализуются с помощью синусно-косинусных фазовращателей. Установлено, что при построении синусно-косинусных фазовращателей улучшение метрологических характеристик достигается за счет применения функциональных ЦАП. Наименьшие методические погрешности могут быть получены применением функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией.

2. Использование широкополосного квадратурного устройства на основе фазоразностных *RC*-цепей позволило воспроизводить сдвиг фаз в диапазоне частот от 100 Гц до 1кГц, от 1 кГц до 10 кГц, от 10 кГц до 100 кГц (коэффициент перекрытия $F_{max}/F_{min}=10$) с погрешностями модулей выходных напряжений менее 0,01 %, фазового сдвига менее 0,1 °. Разработана математическая модель, методика анализа и расчета элементов схемы квадратурного устройства. Погрешности по УФС и амплитуде от допусков пассивных элементов носят линейных характер. Установлено, что для обеспечения отклонение разности фаз выходных напряжений от 90 °-го с погрешностью до 0,1 ° необходимо использовать пассивные элементы с допусками не более 0,1 %. Разработанное квадратурное устройство на диапазон частот от 1 до 10 кГц обеспечивает отклонение разности фаз выходных напряжений от 90 °-го с погрешностью не более 0,2 °. При сужении диапазона перекрытия частот $F_{max}/F_{min}<10$ квадратурное устройство позволяет уменьшить погрешность до 0,1 °.

3. Разработано техническое решение для реализации гибридного функционального ЦАП с кусочно-полиномиальной аппроксимацией *n*-го порядка. При увеличении порядка полинома *n* точность приближения синусной и косинусной зависимостей увеличивается в 10 раз, при увеличение количества интервалов аппроксимации точность увеличивается не менее чем в 2 раза. Оптимальным является применение сплайна 3-го порядка с количеством интервалов аппроксимации от трех и выше. Исследования функциональных ЦАП по составленной математической модели позволили определить максимальные значения методических погрешностей синусно-косинусного преобразователя фазовых сдвигов, которые составили: при одном интервале аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{_{6blx}}=1,5$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,15$ °; при двух интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{_{6blx}}=0,1$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,025$ °; при трех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{_{6blx}}=0,02$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,003$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{_{6blx}}=0,02$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,003$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{_{6blx}}=0,007$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,0007$ °.

4. Экспериментальные погрешности преобразователя фазовых сдвигов на основе функциональных ЦАП составили: при одном интервале аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=1,5$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,2$ °; при двух интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,15$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,06$ °; при трех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,06$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,05$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,06$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,05$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,06$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,05$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,06$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,05$ °; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{ablx}=0,04$ %, по УФС $\Delta \varphi=0,04$ °. Экспериментальные и теоретические исследования погрешностей преобразователя фазового сдвига на функциональных ЦАП показали, что качественное распределение погрешностей имеет одинаковый характер и свидетельствует об адекватности разработанных моделей.

5. Исследование преобразователя фазовых сдвигов на базе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией показало, что при использовании 12разрядного ЦАП с разрешающей способностью 0,02 ° обеспечивается погрешность воспроизведения по УФС до 0,04 °, что соответствует требованиям, предъявляемым к высокоточным фазовращателям в системах управления и к эталонам УФС первого разряда (0,01 ° - 0,2 °).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Газизов А.А., Канарейкин В. И., Максутов А. Д., Сапельников В. М. Экспериментальное исследование функционального ЦАП// Датчики и системы. – 2009. - №5. – С. 58-60.

2. Газизов А.А., Канарейкин В. И., Максутов А. Д., Сапельников В. М.. Исследование погрешности калибратора фазового сдвига// Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2010. - №3. – С. 16-17.

3. Сапельников В. М. Канарейкин В. И., Клименко С. С. Повышение точности измерения коэффициента мощности// Механизация и электрификация сельско-го хозяйства – 2010. - №3. – С. 23-25.

В других изданиях:

4. Газизов А.А., Шабанов М.А., Канарейкин В.И., Тарасов А.В., Сапельников В.М. Цифроуправляемый калибратор фазы на базе функциональных ЦАП// Инновации и перспективы сервиса: Сборник статей Международной научнотехнической конференции, 18 декабря 2007 г. – Уфа: Уфимск. гос. академия экономики и сервиса, 2007.- С. 41-45.

5. Канарейкин В.И., Канарейкина С.Г. Прикладное применение цифроаналоговых преобразователей// Инновации в интеграционных процессах образования, науки, производства: Сборник трудов Международной научной конференции (г. Мелеуз, 17-18 апреля 2008 г.). – Уфа: Гилем, 2008. – С. 129-131. 6. Канарейкин В.И., Газизов А.А., Сапельников В.М, Хакимов Р.А. Моделирование функциональных ЦАП в программе MICRO-CAP// АгроКомплекс – 2008: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XIX Международной специализированной выставки. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2008. – С.154–159.

7. Сапельников В. М., Газизов А. А., Канарейкин В. И. Применение лабораторных виртуальных приборов LabVIEW для исследования погрешностей функциональных ЦАП// Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Сборник трудов Международной научнотехнической конференции. - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2008. – С. 119 – 122.

8. Газизов А.А., Канарейкин В.И., Сапельников В.М. Исследование параметров функционального ЦАП в среде LABVIEW// Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-08): Сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием. – М.: ИПУ РАН, 2008, С. 251 – 253.

9. Сапельников В.М., Канарейкин В. И. Широкополосное квадратурное устройство для калибраторов фазы// Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции в 2 т. Т. 2/ редкол.: В. А. Шабанов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – С. 157 – 160.

10. Сапельников В.М., Канарейкин В. И. Калибраторы фазы на функциональном ЦАП// АгроКомплекс – 2009: Сборник трудов Всероссийской научнопрактической конференции с международным участием в рамках XIX Международной специализированной выставки. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2009. – С. 213-215.

Патенты:

11. Патент №74022 МПК Н03М 1/66. Устройство нелинейного цифроаналогового преобразования сигнала/ Сапельников В. М., Канарейкин В. И. и др. - №74022: заявитель Сапельников В. М.; заявл. 2007, опубл. 2008, бюл. № 16. – 4 С.: ил.

12. Патент №2408136 МПК Н03М 1/66. Функциональный ЦАП/ Сапельников В. М., Канарейкин В. И., Клименко С. С. - №2408136: заявитель ГОУВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; заявл. 2009, опубл. 2010, бюл. № 36. – 6 С.: ил.

Диссертант

Plasser

В.И. Канарейкин

КАНАРЕЙКИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФАЗОВОГО СДВИГА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦАП

Специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 07.07.2011 г. Формат бумаги 60×84 ¹/16. Усл. печ. л. 116. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать трафаретная.Заказ 330.Тираж 100 экз.

Издательство Башкирского государственного аграрного университета Типография Башкирского государственного аграрного университета Адрес издательства и типографии: 450001, г. Уфа ул. 50-летия Октября, 34