

УДК 621.3.018.1

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФАЗОВОГО СДВИГА ДЛЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**CONVERTERS OF PHASE SHIFT FOR INFORMATION
AND MEASURING SYSTEMS OF THE OIL AND GAS INDUSTRY**

Канарейкин В. И.

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

V. I. Kanareykin

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation**

e-mail: kanareikina1948@mail.ru

Аннотация. Преобразователи фазового сдвига (фазовращатели и калибраторы фазы) широко применяются в информационно-измерительных системах и системах управления. На практике их используют в составе прецизионных двухфазных генераторов, компенсаторах, компенсационных фазометрах, а также в фазометрической аппаратуре. В нефтегазовой отрасли применяются автоматические компенсаторы переменного тока при измерении электропроводности (автоматический солемер), при измерении расхода глинистого раствора электромагнитными датчиками, в геофизических исследованиях для определения ортогональных составляющих сигнала датчика (электронные каротажные станции).

Актуальным научно-исследовательским направлением является нахождение решений для точного измерения и воспроизведения угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями.

В статье предложен способ построения широкополосных преобразователей фазового сдвига на основе функциональных ЦАП. Устройство состоит из широкополосного квадратурного устройства и блока функционального преобразования. Разработаны математическая и схемотехническая модели преобразователя фазового сдвига на основе гибридных функциональных ЦАП с использованием сплайновой аппроксимации. Установлено, что при увеличении порядка сплайна n точность приближения синусной и косинусной зависимостей увеличивается в 10 раз, а при увеличении количества интервалов аппроксимации точность увеличивается не менее чем в 2 раза.

Экспериментальные исследования преобразователя фазовых сдвигов с разрешающей способностью $0,02^\circ$ на базе 12-разрядных функциональных ЦАП показали, погрешность воспроизведения по углу фазового сдвига составляют $0,04^\circ$, что соответствует требованиям, предъявляемым к эталонам угла фазового сдвига первого разряда ($0,01^\circ - 0,2^\circ$).

Abstract. Converters of phase shift (phase shifters and calibrators of a phase) find broad application, both in control systems, and in information and measuring systems – high-precision phase shifters.

Converters of phase shift are put as a part of precision two-phase generators, in compensators, compensative phase meters and also in the phase meter of equipment, etc. The important place among information and measuring devices is taken by the devices using a compensation method of measurement. In oil and gas branch automatic compensators of alternating current at measurement of conductivity of clay solutions and boring waters (automatic saline tester) are used, at measurement of a consumption of clay solution by electromagnetic sensors, to research of dynamic properties of automatic measuring devices, in geophysical surveys for definition of orthogonal components of a signal of the sensor (electronic logging station).

The actual direction of works in the field of electric phase is finding of decisions for exact measurement and reproduction of a corner of phase shift between two voltages.

In article the way of creation of broadband converters of phase shift on the basis of the functional digital-analog converter (DAC). The device consists of the block of the broadband quadrature device and the block of functional transformation.

Mathematical and circuitry models of the converter of phase shift on the basis of hybrid functional DAC with use of spline approximation are developed. It is established that at increase in an order of a spline of n the accuracy of approach of sinus and cosine dependences increases by 10, and at increase in quantity of intervals of approximation accuracy increases not less than twice.

Pilot studies of the converter of phase shifts with resolution 0.02° on the basis of 12-digit functional DAC with spline approximation showed, the reproduction error on a corner of phase shift makes 0.04° that conforms to requirements imposed to standards of a corner of phase shift of the first category ($0.01^\circ - 0.2^\circ$).

Ключевые слова: угол фазового сдвига, компенсационный метод измерения, информационно-измерительные системы, компенсаторы переменного тока, датчики, преобразователи фазового сдвига, функциональные цифроаналоговые преобразователи.

Key words: corner of phase shift, compensation method of measurement, information and measuring systems, compensators of alternating current, sensors, converters of phase shift, functional digit-analog converters (functional DAC).

Фазовые измерения и управление объектами применяется во многих областях науки и техники. Преобразователи фазового сдвига (фазовращатели и калибраторы фазы) используются, как в системах управления, так и в информационно-измерительных системах – высокоточные (эталонные, образцовые) фазовращатели. Актуальным направлением работ в области фазометрии является нахождение решений

для точного измерения и воспроизведения угла фазового сдвига (УФС) между двумя электрическими напряжениями, между током и напряжением [3, 6, 8].

Существует проблема создания помехоустойчивой аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками. Одним из наиболее эффективных способов решения является компенсационный способ с применением образцовых фазовращателей. В литературе освещены вопросы компенсационного метода измерения в различных отраслях науки, техники и обороны, в том числе и в нефтяной промышленности, актуальной для Республики Башкортостан [3,4,8]. Важное место среди измерительно-информационных устройств общетехнического назначения занимают приборы, использующие компенсационный метод измерения, так как в совокупности с датчиками они позволяют регулировать и контролировать параметры системы.

В нефтегазовой отрасли применяются автоматические компенсаторы переменного тока при измерении электропроводности глинистых растворов и буровых вод (автоматический солемер), при измерении расхода глинистого раствора электромагнитным датчиком для контроля и регулирования процессов разведочного бурения в комплекте с магнитоупругими и индуктивными датчиками (ИРБ-5, ИРБ-4 и ПМК), для исследования динамических свойств автоматических измерительных приборов. Также рекомендуется использовать их при определении электрических свойств нефтепродуктов, при одновременном измерении активной и реактивной составляющих сопротивления различных датчиков. Автоматические компенсаторы переменного тока широко используются в различных областях геофизических исследований для определения ортогональных составляющих сигнала датчика. Например, в промышленной, геофизической разведке используется электронная каротажная станция АЭС-ЛП-900, в аппаратуре электроразведки полезных ископаемых [4,8].

В комплекте с датчиками целесообразно использовать автоматические цифровые фазометры.

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.

Однако, широко распространенные фазовращатели (емкостные, потенциометрические, электромеханические с синусно-косинусными вращающимися трансформаторами) имеют точность отсчета УФС порядка 1° . Сравнительно низкая точность связана с механическим выполнением элементов. Отсутствие достаточно точных и удобных в работе фазовращателей привело, например, к тому, что при контроле некоторых технологических процессов конструкторы приборов часто вынуждены отказаться от более простого метода, связанного с измерением и регулированием УФС, и использовать сложные частотные методы.

С середины 80-х годов развитие получили методы построения фазовращателей, основанные на применении синтезаторов частоты и принципе деления частоты.

Таким образом, повышение метрологических и эксплуатационных характеристик фазовращателей является весьма актуальной задачей, решение которой, как показывает практика, требует разработки новых и модернизации старых схем фазовращателей и методов их построения.

Анализ научной литературы показал, что среди разнообразных способов построения широкополосных преобразователей фазового сдвига (фазовращателей и калибраторов фазы) по своей функциональности, техническим характеристикам и схемотехнической реализации преимущества имеют синусно-косинусные фазовращатели на основе функциональных цифроаналоговых преобразователей (ЦАП).

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

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.

Научная новизна работы.

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 цифруправляемого преобразователя фазовых сдвигов.

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

Методы исследований. В работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. При решении поставленной

задачи использовались методы теоретической электротехники, основы информатики, цифровой и вычислительной техники, информационно-измерительной 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.

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). 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 [1,2,8]:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = U \cos \phi + jU \sin \phi = U e^{j\phi}. \quad (1)$$

Уравнение (1) описывается структурной схемой, представленной на рисунке 1.

Источники погрешностей синусно-косинусного преобразователя фазовых сдвигов: методические погрешности реализации зависимостей $\cos \phi$ и $\sin \phi$, инструментальные погрешности реализации расчетных значений элементов схемы, погрешность воспроизведения 90°-го УФС и равенств модулей питающих напряжений и др.

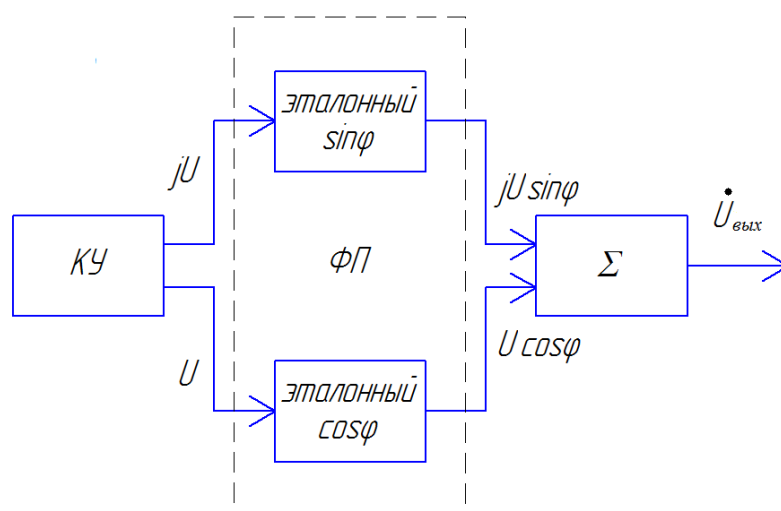


Рисунок 1. Структурная схема синусно-косинусного фазовращателя:
 КУ – квадратурное устройство, квадратурный фазовый модулятор;
 эталонные $\sin\varphi$ и $\cos\varphi$ – устройства, обеспечивающие высокоточное воспроизведение зависимостей $\sin\varphi$ и $\cos\varphi$ (функциональные ЦАП [8]);
 ФП – синусно-косинусные функциональные преобразователи;
 Σ – сумматор

Структурная схема преобразователя фазового сдвига на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией 3-го порядка представлена на рисунке 2. Здесь КП – кодопреобразователь.

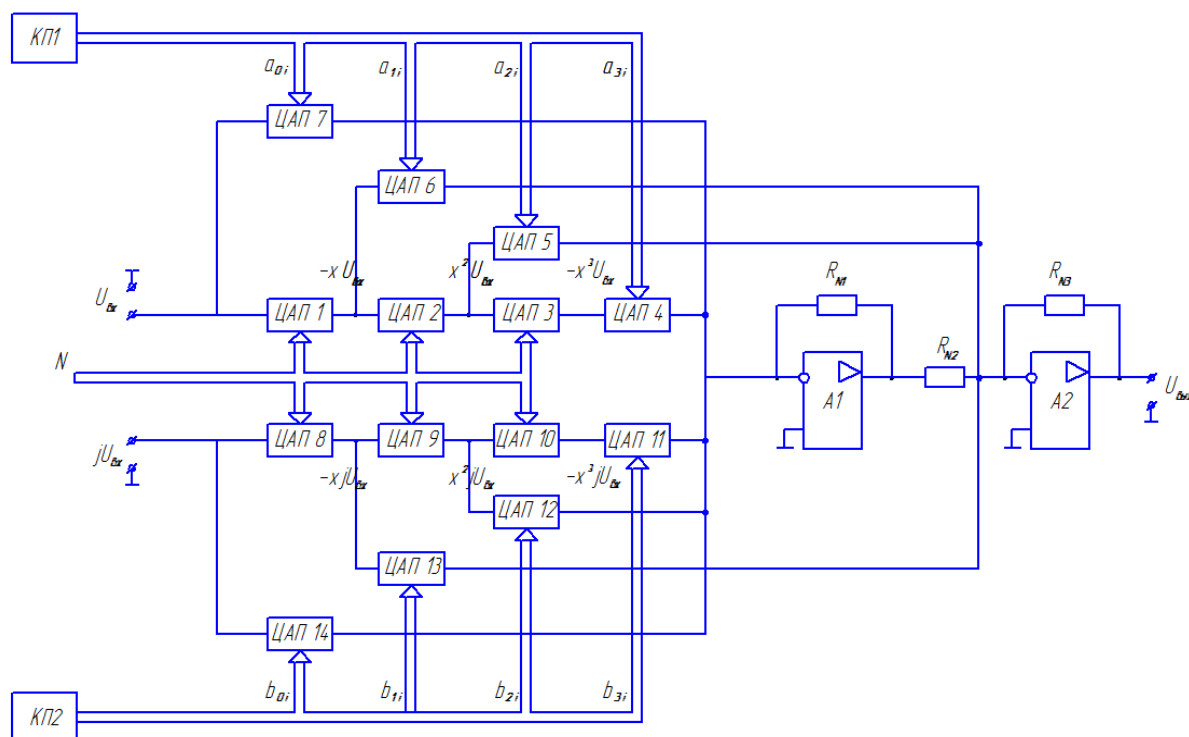


Рисунок 2. Структурная схема синусно-косинусного фазовращателя со сплайновой аппроксимацией

Синусная и косинусная зависимости 3-го порядка реализуются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} k_{1i} &= a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}x^2 + a_{3i}x^3 \approx \cos \frac{\pi}{2} x, \\ k_{2i} &= b_{0i} + b_{1i}x + b_{2i}x^2 + b_{3i}x^3 \approx \sin \frac{\pi}{2} x, \end{aligned} \quad (2)$$

где i – количество отрезков, на которые разбивается интервал сплайновой аппроксимации.

Обозначим сплайн, реализующий синусную зависимость, через коэффициент k_{1i} , а косинусную – через k_{2i} (далее обозначены в математической модели). Принцип действия. 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 « x » и изменяет его полярность. Поэтому на выходах ЦАП1 – ЦАП3 получаем напряжения: $-xU_{ex}$, x^2U_{ex} , $-x^3U_{ex}$, а на выходах ЦАП4 – ЦАП6 получаем ряд напряжений: $-jxU_{ex}$, jx^2U_{ex} , $-jx^3U_{ex}$. Выходные напряжения ЦАП1 – ЦАП3 моделируют слагаемые полиномов, выходные напряжения ЦАП4 – ЦАП6 – полиномов (2). С помощью кодопреобразователей КП 1 и КП 2 загружаются коэффициенты сплайна. В качестве кодопреобразователей могут использоваться ОЗУ, ПЗУ с малой памятью или микроконтроллер. При применении микроконтроллера переменные коэффициенты сплайна a_{0i} - a_{3i} и b_{0i} - b_{3i} программируются в микроконтроллер и загружаются непосредственно на ЦАП1-ЦАП3 и ЦАП4-ЦАП6. Сигналы с входа U_{ex} и jU_{ex} участвуют в формировании постоянных составляющих воспроизводимых полиномов. Напряжения суммируются на ОУ А1 и А2 с соответствующими коэффициентами. ОУ А1 служит для корректировки знаков \pm коэффициентов полиномов выражения (2). Полярности суммируемых напряжений определяют их знаки. Суммирование

происходит в два этапа. На ОУ А1 суммируются напряжения, требующие изменения полярности. Затем на ОУ А2 происходит формирование выходного гармонического сигнала, который сдвинут по фазе относительно входного сигнала U_{ex} на угол $\pi x/2$. Получен патент на изобретение №2408136 «Функциональный ЦАП» [5].

Разработаны программы расчета коэффициентов сплайна различными методами в пакетах MathCad, Matlab, Maple. Значения коэффициентов естественного кубического сплайна при равномерном разбиении интервалов аппроксимации i приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты естественного кубического сплайна

коэф- ТЫ	$n=1$	$n=2$		$n=3$			$n=4$			
	$i=1$	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
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

Значения коэффициентов кубического сплайна интерполяционным методом приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты кубического сплайна интерполяционным методом

коэф- ТЫ	$n=1$	$n=2$		$n=3$			$n=4$			
	$i=1$	$i=1$	$i=2$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
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

Как показало исследование дисперсия остатков естественного кубического сплайна немного меньше, чем дисперсия остатков кубического сплайна интерполяционным методом.

Математическое моделирование. Математическая модель фазовращателя на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией состоит из модели широкополосного квадратурного устройства на RC -цепи и модели функциональных ЦАП [1, 9].

Результаты расчета методических погрешностей фазовращателя с учетом погрешности сплайновой аппроксимации синусной и косинусной зависимости в сравнении с погрешностями полиномиальной аппроксимации, использующей разложение в ряды Тейлора, Чебышева и метод степенной интерполяции, приведены в таблице 3. Здесь n – количество отрезков, на которые разбивается интервал в случае сплайновой аппроксимации и степень полиномов в случае других методов.

Таблица 3. Методические погрешности фазовращателя в зависимости от метода аппроксимации

n	Полиномиальная аппроксимация методом Тейлора		Полиномиальная аппроксимация методом Чебышева		Метод сплайновой аппроксимации	
	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\delta U_{\text{вых}}, \%$
3	0,5	1	0,07	0,2	0,003	0,022
4	0,1	0,6	0,009	0,01	0,0007	0,007
5	0,01	0,06	0,0006	0,001	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,0023
6	0,002	0,002	0,0006	$3 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$	0,0012

Метод сплайновой аппроксимации по сравнению с методами Тейлора и Чебышева обеспечивает меньшие значения методических погрешностей воспроизведения УФС $\Delta\varphi$ и амплитуды $\delta U_{\text{вых}}$ при $n \geq 3$, 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 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 (рисунок 3).

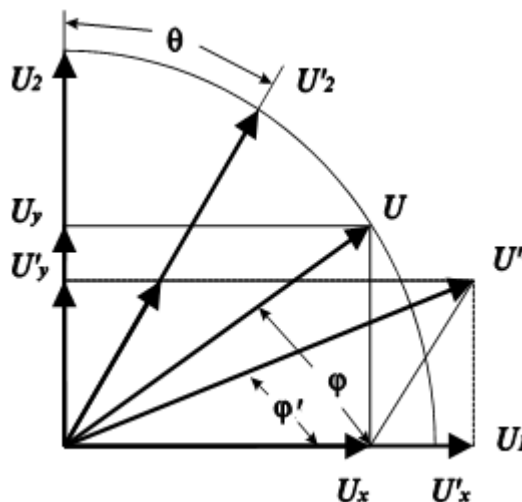


Рисунок 3. Векторная диаграмма напряжений фазовращателя при наличии погрешности квадратуры θ

Погрешности фазовращателя в этом случае определяются уравнениями:

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

$$\Delta \phi = \phi - \phi' = \arctg \frac{U_y}{U_x} - \arctg \frac{U_y \cos \theta}{U_x + U_y \sin \theta}, \quad (3)$$

$$\delta U_{\text{вых}} = \gamma_{U1} \cos^2 \phi + \gamma_{U2} \sin^2 \phi,$$

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

где $a = \frac{U_x}{U_y}$, γ_{U1} и γ_{U2} - относительные погрешности синфазной и квадратурной составляющих напряжения.

Установлено, что наибольшая погрешность, обусловленная погрешностями квадратурного устройства, возникает в фазовращателе при УФС равном $\pi/4$ или 45° . Допускается рассогласование амплитуд выходных напряжений, подаваемых с квадратурного устройства на

функциональные ЦАП, не более чем 0,35% при этом погрешность УФС фазовращателя $\Delta\varphi$ составляет не более $0,1^\circ$.

Установлено, что увеличение значения модуля входного напряжения широкополосного квадратурного устройства, подаваемого как опорный сигнал на функциональные ЦАП, также линейно увеличивает методическую погрешность УФС.

Математическое моделирование спроектированного широкополосного квадратурного устройства показало, что при погрешности изготовления пассивных элементов 0,1% погрешности по квадратуре θ составляет $0,1^\circ$, погрешности дисбаланса выходных амплитуд менее 0,01%. На основании этих исходных данных погрешности фазовращателя составляют по УФС не более $0,1^\circ$, а по амплитуде – менее 0,1%. Погрешности по шкале фазовращателя с учетом совместной работы блока функциональных ЦАП и квадратурного устройства (рисунок 4).

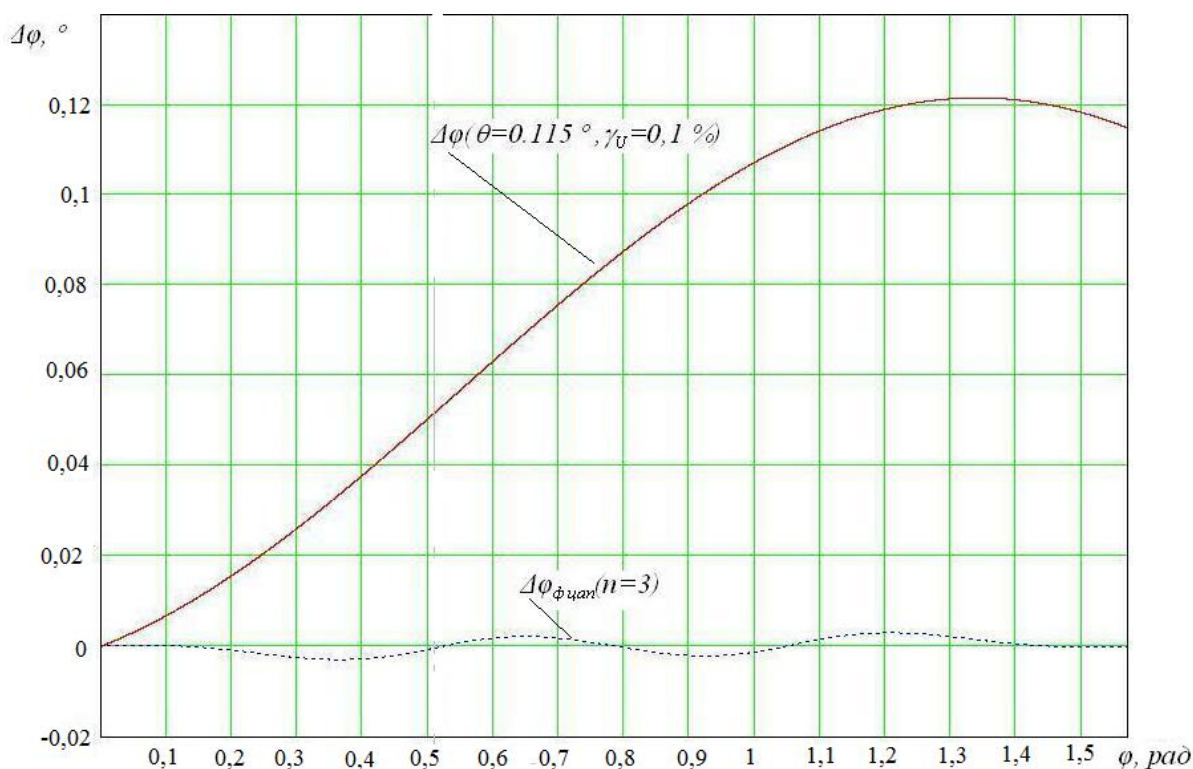


Рисунок 4. Распределение погрешности УФС по шкале фазовращателя при фиксированном значении погрешностей квадратурного устройства и методической ошибки функциональных преобразователей со сплайновой аппроксимацией

Как видно из рисунка 4, определяющим для создания фазовращателя на основе функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией является обеспечение строго ортогональных и равных по модулю квадратурных напряжений.

Схемотехническое моделирование. Под схемотехническим моделированием понимают моделирование электрических процессов в электронных устройствах, традиционно изображаемых в виде принципиальных электрических схем, т. е. соединений условных обозначений диодов, транзисторов, резисторов и т. д. Схемотехническая модель состоит из трех моделей: модели широкополосного квадратурного устройства (КУ), моделей функциональных ЦАП (ФЦАП \sin , ФЦАП \cos). Для анализа работоспособности функционирования электрической схемы фазовращателя в программе Micro-Cap разработана схемотехническая модель (рисунок 5). При разработке в качестве линейных ЦАП применили ЦАП на $R-2R$ матрице. Модель ИМС прототипа линейного умножающего ЦАП AD7520 (10-разрядный), но с 12-разрядной матрицей. ИМС содержит на подложке 12 двухполярных КМОП - ключей, 12-разрядную матрицу $R-2R$ (разветвитель тока, а не делитель напряжения) и резистор обратной связи $R_{oc}=R$. Модель учитывает погрешности сопротивлений КМОП - ключей и сопротивлений резистивной матрицы $R-2R$, паразитные параметры ОУ. По результатам моделирования установлено, что при отклонениях сопротивлений ключей 5% максимальная погрешность выходного напряжения составляет всего 0,003%. При погрешности сопротивлений, составляющих резисторную матрицу $R-2R$ умножающего ЦАП, равной 0,2%, погрешность преобразования в конечной точке шкалы составляет 2 ЕМР. Адекватность схемотехнической модели линейного ЦАП подтверждаются паспортными характеристиками ЦАП.

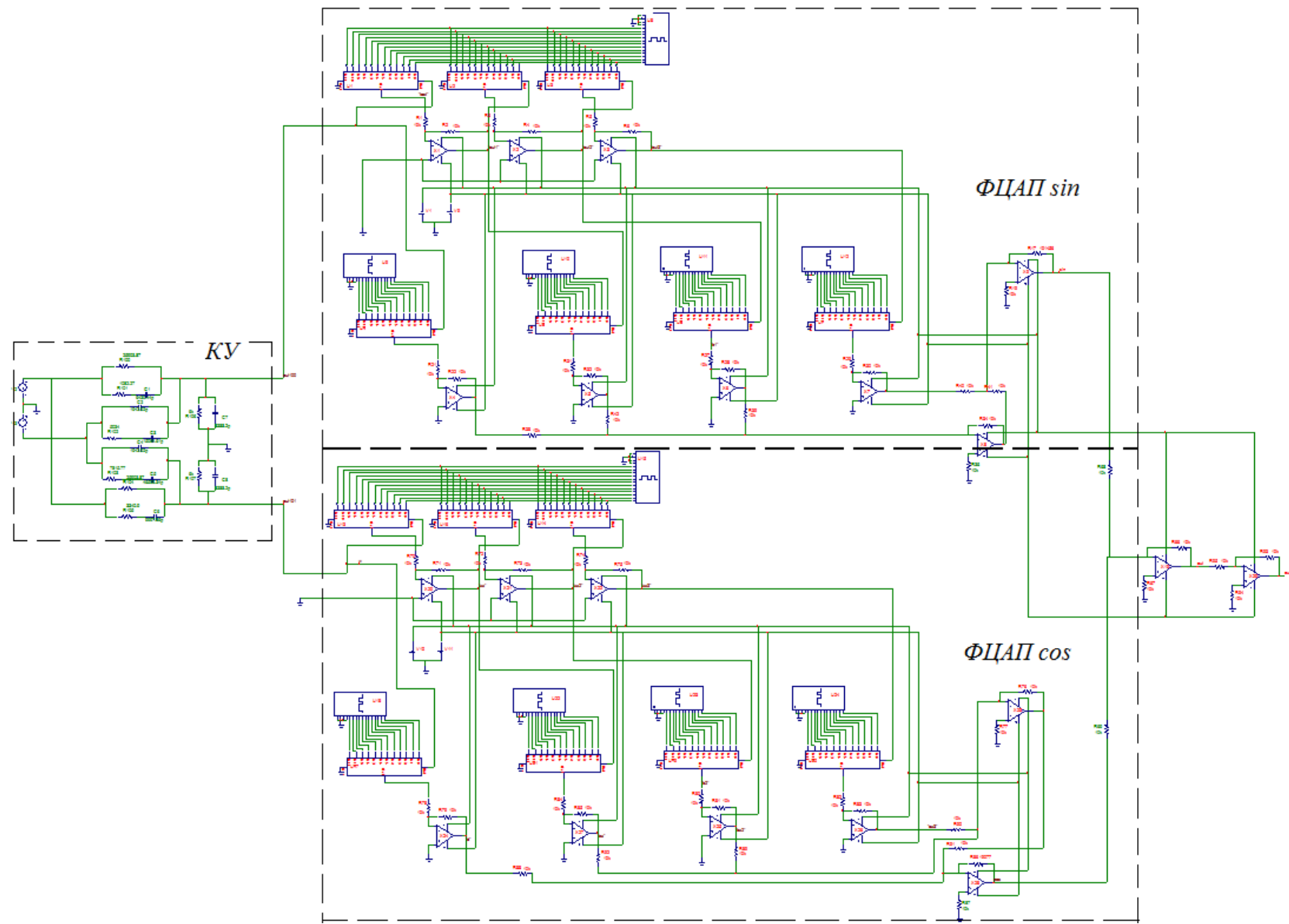


Рисунок 5. Схемотехническая модель преобразователя фазового сдвига в программе Micro-Cap

Для проектирования функциональных ЦАП в качестве линейных ЦАП целесообразно использовать ИМС ЦАП на матрице $R-2R$ с токовым выходом, но с более высокими техническими характеристиками. ИМС прототипа линейного умножающего ЦАП КР572ПА1 (зарубежный аналог AD7520). ИМС содержит на подложке 10 двухполярных КМОП-ключей, 10-разрядную матрицу $R-2R$ (разветвитель тока, а не делитель напряжения) и резистор обратной связи $R_{oc} = R$. Модель учитывает погрешности сопротивлений КМОП-ключей и сопротивлений резистивной матрицы $R-2R$. Моделирование осуществлялось в режиме анализа переходных процессов (Transient).

График зависимости входного и выходного сигналов фазовращателя, сдвинутого на заданный УФС (в данном случае $\Delta\varphi = 10^\circ$) в программе Micro-Cap, представлен на рисунке 6.

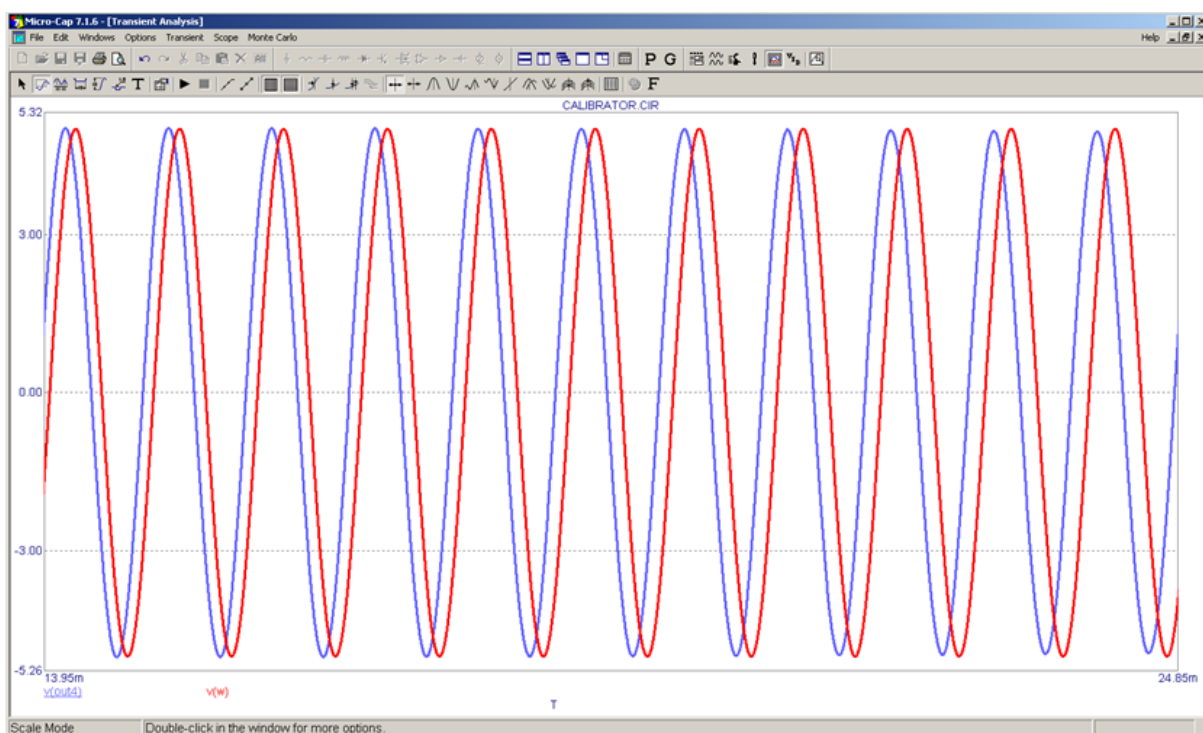


Рисунок 6. Регулируемый 10° -й УФС выходного напряжения относительно входного напряжения на частоте 1кГц при амплитуде квадратных напряжений 5 В

Адекватность работы схемотехнической модели подтверждается качественным совпадением результатов с математической моделью преобразователя фазового сдвига.

Экспериментальное исследование. Функциональные ЦАП со сплайновой аппроксимацией, реализующие синусную и косинусную зависимости выполнены на 4-х канальных 12-разрядных прецизионных микросхемах ЦАП MAX514 на R - $2R$ -резистивной матрице с последовательным цифровым интерфейсом и операционных усилителях К140УД17, при этом разрешающая способность преобразователя фазовых сдвигов составляет $0,02^\circ$. Разработана экспериментальная установка, включающая настольную станцию *NI ELVIS* и виртуальный прибор в среде графического программирования *LabVIEW* [1, 2, 6, 7].

С помощью экспериментального стенда производится исследование метрологических характеристик фазовращателя в два этапа. Первый этап эксперимента – исследование макетов функциональных ЦАП, реализующих синусную и косинусную зависимости. Второй этап – исследование блока функциональных преобразователей (рисунок 7).

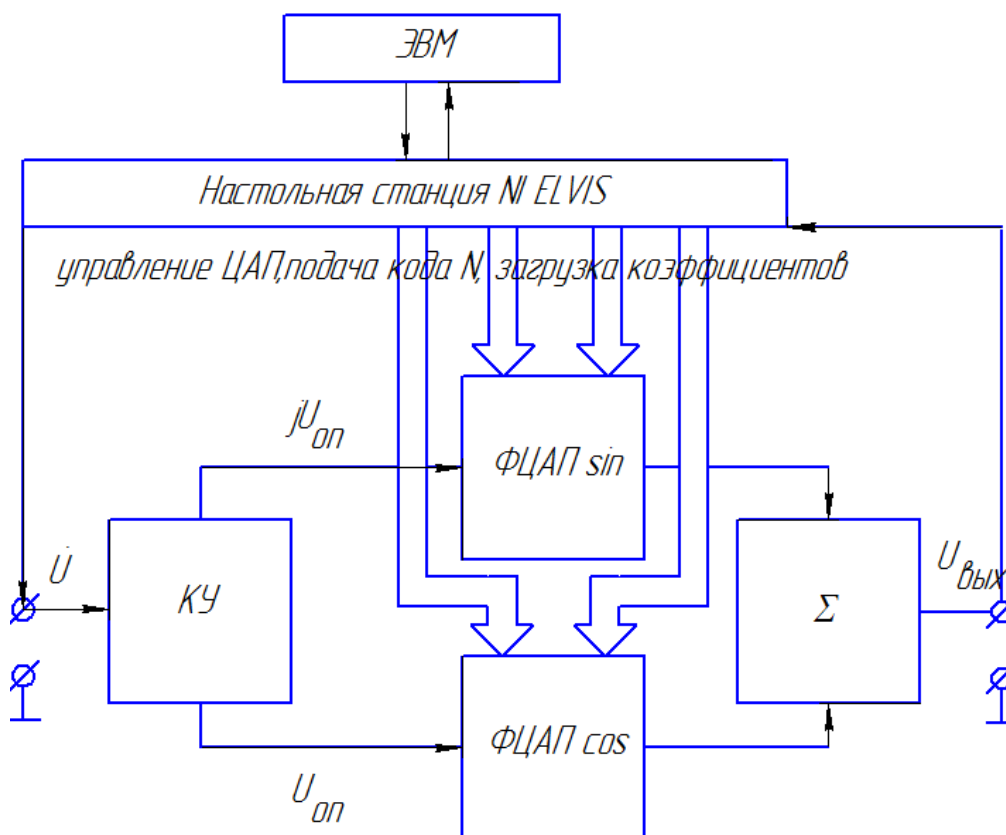


Рисунок 7. Схема для исследования фазовращателя на основе функциональных ЦАП с помощью лабораторной установки *NI ELVIS* и *LabVIEW*

На рисунке 8 представлены внешний вид экспериментальной установки и основных узлов преобразователя фазового сдвига.

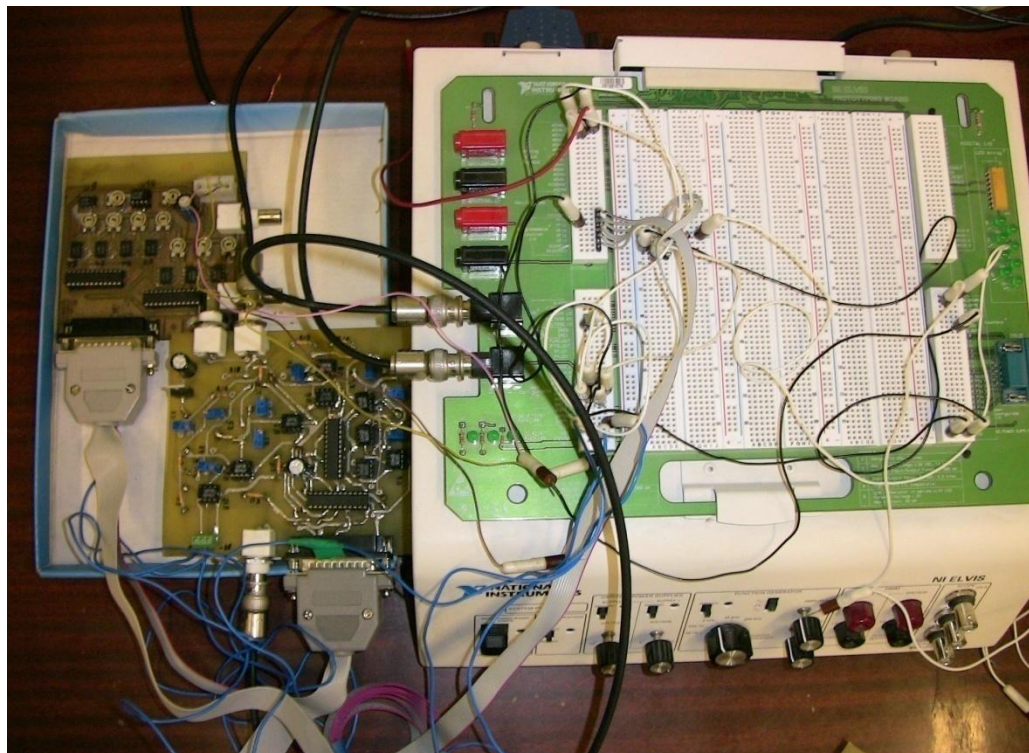


Рисунок 8. Два функциональных ЦАП подключенных к плате NI ELVIS PCI-6251

Выходные характеристики ФЦАП \sin и ФЦАП \cos записываются в выходной файл в виде таблицы зависимости кода от напряжения. Эти данные обработали в MS Excel. Таким образом, используя математическую модель, определяем погрешности изготовленного блока синусо-косинусного фазовращателя без учета влияния квадратурного устройства.

Расхождение теоретических и экспериментальных исследований, как по качественным, так и по количественным характеристикам составила 1%. Результаты экспериментальных исследований преобразователя фазового сдвига представлены в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные погрешности преобразователя фазового сдвига

Число интервалов	1	2	3	4
$\Delta\varphi, ^\circ$	0,22	0,06	0,05	0,04
$\delta U_{\text{вых}}, \%$	1,53	0,15	0,06	0,04

Дальнейшее исследование показало, что качественно характеристики не изменяются. Основными параметрами, определяющими точность, являются шаг квантования ЦАП, интегральная нелинейность, дифференциальная нелинейность, погрешность смещения и погрешность преобразования. Дифференциальная нелинейность MAX514 составляет $\pm 0,5$ ЕМР (единица младшего разряда), интегральная нелинейность ± 1 ЕМР. Шаг квантования:

$$\phi(N) = \frac{N}{N_{\max}} \cdot \frac{\pi}{2}.$$

$$\text{Шаг для 12-разрядного ЦАП: } \phi(1) = \frac{N}{N_{\max}} \cdot \frac{\pi}{2} = 0,00038 \text{ рад} = 0,02^\circ.$$

Погрешность преобразователя фазового сдвига, обусловленная дифференциальной и интегральной нелинейностью MAX514, будет составлять половину шага квантования линейного ЦАП и равняться $\pm 0,01^\circ$. Эту погрешность при построении функциональных ЦАП можно снизить за счет увеличения разрядности линейных ЦАП. В связи с этим проведение экспериментальных исследований функциональных преобразователей со сплайновой аппроксимацией при количестве интервалов более 4 нецелесообразно (методическая погрешность составляет на несколько порядков меньше аппаратной).

Применение более высокоразрядных высокоточных линейных ЦАП порядка 16 и выше позволяет обеспечить шаг квантования УФС менее чем

$\phi(1) = \frac{N}{N_{\max}} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2^{16}} \cdot \frac{\pi}{2} = 0,000024 \text{ рад} = 0,0014^\circ$ (32-х разрядов – десятые мили градуса), что позволяет увеличить разрешающую способность и уменьшить погрешность преобразователя фазового сдвига.

В результате НИОКР обоснована и доказана применимость функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией для повышения точности в информационно-измерительных системах, что подтверждается

приведенными результатами теоретических и экспериментальных исследований с высокой степенью сходимости до 1%.

Разработан широкополосный цифруправляемый преобразователь фазового сдвига на основе функциональных ЦАП со следующими параметрами: диапазон входного и выходного напряжения -15...15 В, режим работы - переменное напряжение, разрешающая способность $0,1^\circ$, диапазон рабочих частот от 100 Гц до 100 кГц, диапазон основной погрешности измерения и регулирования угла фазового сдвига не более $0,2^\circ$, время установления выходного сигнала не более 1 мс.

Спроектированные функциональные ЦАП подтверждают применимость разработанных методики и способа построения функциональных ЦАП, обеспечивающих требуемую в задаче точность и разрешающую способность. Таким образом, это дает возможность масштабирования в производстве ряда функциональных ЦАП для различных прикладных задач в медицине, нефтегазовой отрасли, приборостроении и др.

Выполнение функциональных ЦАП в виде ИМС позволяет изменить подход к проектированию информационно-измерительных систем использующих фазовые и частотные методы.

Выводы

1. Математическое моделирование функциональных ЦАП позволило определить максимальные значения методических погрешностей синусно-косинусного преобразователя фазовых сдвигов, которые составили: при одном интервале аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{\text{вхл}} = 1,5\%$, по УФС $\Delta\varphi = 0,15^\circ$; при двух интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{\text{вхл}} = 0,1\%$, по УФС $\Delta\varphi = 0,025^\circ$; при трех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{\text{вхл}} = 0,02\%$, по УФС $\Delta\varphi = 0,003^\circ$; при четырех интервалах аппроксимации – по амплитуде $\delta U_{\text{вхл}} = 0,007\%$, по УФС $\Delta\varphi = 0,0007^\circ$.

2. Спроектированный преобразователь фазовых сдвигов на основе 12-разрядных функциональных ЦАП со сплайновой аппроксимацией обеспечивает при трех интервалах аппроксимации погрешность по углу фазового сдвига $0,05^\circ$, по амплитуде $0,06\%$, при четырех интервалах аппроксимации погрешность по углу фазового сдвига снижается до $0,04^\circ$, по амплитуде $0,04\%$.

3. Экспериментальные и теоретические исследования погрешностей преобразователя фазового сдвига на функциональных ЦАП показали, что качественное распределение погрешностей имеет одинаковый характер и свидетельствует об адекватности разработанных математической и схемотехнической моделей преобразователя фазового сдвига. Разработанные модели позволяют проводить проектирование преобразователей фазового сдвига по техническому заданию заказчика с требуемыми выходными техническими характеристиками устройства.

Перспективы

Выполнение функциональных ЦАП в виде ИМС позволит расширить область применения цифроаналоговых преобразователей и решать задачи с цифроаналоговым нелинейным управлением, регулированием и контролем информационно-измерительных устройств и систем.

Список используемых источников

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

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

3 Кравченко С.А. Калибраторы фазы. Л.: Энергоиздат, 1981. 100 с.

4 Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.

5 Функциональный ЦАП/ Сапельников В.М., Канарейкин В.И., Клименко С.С.: пат. на изобретение №2408136 МПК Н03М 1/66. №2408136: заявитель ГОУ ВПО УГНТУ; заявл. 20.05.2009; опубл. 27.12.2010// Бюл. № 36. 7 с.: ил.

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

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: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2008. С. 119 – 122.

8 Сапельников В.М., Кравченко С.А., Чмых М.К. Проблемы воспроизведения смещаемых во времени электрических сигналов и их метрологическое обеспечение. Уфа: Изд-во Баш. гос. ун-та, 2000. 196 с.

9 Сапельников В.М., Канарейкин В.И. Широкополосное квадратурное устройство для калибраторов фазы // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. в 2 т. / редкол.: В. А. Шабанов [и др.]. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. Т. 2. С. 157 – 160.

References

1 Eksperimentalnoe issledovanie funktsionalnogo CAP/ A.A. Gazizov, V. I. Kanareykin, A. D. Maksutov, V. M. Sapelnikov // Datchiki i sistemy. 2009. №5. S. 58-60. [in Russian].

2 Issledovanie pogreshnosti kalibratora fazovogo sdviga/ A.A. Gazizov, V.I. Kanareykin, A. D. Maksutov, V. M. Sapelnikov // Mehanizaciya i elektrifikaciya selskogo hozyaystva. 2010. №3. S. 16-17. [in Russian].

- 3 Kravchenko S.A. Kalibratory fazy. L.: Energoizdat, 1981. 100 s. [in Russian].
- 4 Kulikovskiy K.L., Kuper V.Ya. Metody i sredstva izmereniy. M.: Energoatomizdat, 1986. 448 s. [in Russian].
- 5 Funkcionalnyy CAP/ Sapelnikov V.M., Kanareykin V.I., Klimenko S.S. Pat. na izobreteniye №2408136 MPK N03M 1/66. №2408136: zayavitel GOU VPO UGNTU; zayavl. 20.05.2009, opubl. 27.12.2010, byul. № 36. 7 c.: il. [in Russian].
- 6 Sapelnikov V.M., Kanareykin V.I., Klimenko S.C. Povysheniye tochnosti izmereniya koeffitsienta moschnosti // Mehanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hozyaystva . 2010. №3. S. 23-25. [in Russian].
- 7 Sapelnikov V.M., Gazizov A.A., Kanareykin V.I. Primeneniye laboratornykh virtualnykh priborov LabVIEW dlya issledovaniya pogreshnostey funktsionalnykh CAP // Metody, sredstva i tehnologii polucheniya i obrabotki izmeritelnoy informatsii: Sb. tr. mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Penza: Inf.-izd. centr PGU, 2008. S. 119 – 122. [in Russian].
- 8 Sapelnikov V.M., Kravchenko S.A., Chmyh M.K. Problemy vosproizvedeniya smeschaemykh vo vremeni elektricheskikh signalov i ih metrologicheskoe obespecheniye / Izd. Bash. gos. un-ta. Ufa, 2000. 196 s. [in Russian].
- 9 Sapelnikov V.M., Kanareykin V.I. Shirokopolosnoye kvadraturnoye ustroystvo dlya kalibratorov fazy // Elektrotehnologii, elektroprivod i elektrooborudovaniye predpriyatiy: sb. nauch. tr. II Vseros. nauch.-tehn. konf. v 2 t. / redkol.: V. A. Shabanov i dr. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2009. T. 2. S. 157 – 160. [in Russian].

Сведения об авторе

About the author

Канарейкин В.И., канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладные и естественнонаучные дисциплины» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.I. Kanareykin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of "Applied and Natural-Science Disciplines" FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: kanareikina1948@mail.ru