

КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. 50-ЛЕТИЯ ВЕЛИКОЙ  
ОКТЯБРЬСКОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ

---

**Для служебного пользования**

На правах рукописи

**КАРПОВ**

**Владимир Александрович**

УДК 621.317.39:531.7

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ  
МАЛОГАБАРИТНЫХ СИНУСНО-КОСИНУСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Специальность 05.11.05—Приборы и методы измерения  
электрических и магнитных величин**

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

**Киев • 1986**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981 - 1985 годы и на период до 1990 года, утвержденных на XXI съезде КПСС, в частности, говорится, что необходимо "...Развивать производство и обеспечить широкое применение автоматических манипуляторов, промышленных роботов ... Обеспечить ускоренное развитие производства комплексов металлообрабатывающего оборудования, оснащенных автоматическими манипуляторами, значительное увеличение выпуска: металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением ... Опережающими темпами развивать производство Электронных устройств регулирования и телемеханики, исполнительных механизмов, приборов и датчиков систем комплексной автоматизации сложных технологических процессов".

В перечисленных системах в качестве первичных измерительных преобразователей, преобразующих пространственные координаты контролируемых объектов в электрические сигналы переменного тока, широкое распространение получили синусно-косинусные трансформаторы (СКТ). Естественно, что от точности, стабильности и надежности при обработке полезной информации, заложенной в параметрах выходных напряжений СКТ, зависит эффективность выполнения функций, возложенных на перечисленные системы.

Методы повышения точности измерения параметров электрических сигналов в настоящее время развиты в достаточной степени благодаря работам таких ученых, как Л.Ф.Куликовский, П.П.Орнатский, А.М.Мелик-Шахназаров, М.С.Ройтман, С.М.Маевский, В.М.Шляндин, Т.М.Алиев, Ю.А.Скрипник, Ю.М.Туэ, В.И.Губарь, И.М.Вишенчук, В.С.Гутников и др. Однако измерение выходных электрических сигналов СОГ имеет свою специфику. В частности, в их составе присутствуют паразитные составляющие, не несущие полезной информации. Их наличие обусловлено несовершенствами самого СКТ. Эти составляющие искажают параметры электрических сигналов, а измерение их известными методами, без учета несовершенств СКТ, приводит к ошибкам. Вопросы же повышения точности преобразования параметров электрических сигналов таких первичных измерительных преобразователей, как СКТ, с учетом их несовершенств исследованы недостаточно.

В связи с этим актуальна задача разработки методов преобразования электрических сигналов СКТ, позволяющих уменьшить влияние паразитных составляющих, не изменяя при этом конструкции самого трансформатора, и измерительных преобразователей на основе этих методов, обладающих инвариантными свойствами к влиянию несовершенств СКТ.

Цель работы. Целью работы является повышение точности аппаратуры на основе малогабаритных СКТ за счет построения измерительных преобразователей, инвариантных к влиянию несовершенств трансформатора.

Поставленная цель определила решение следующих задач:

- исследование влияния основных несовершенств СКТ на конечный результат преобразования в основных типах измерительных преобразователей;
- разработка измерительных преобразователей электрических сигналов (ИПЭС) трансформатора, обладающих инвариантными свойствами по отношению к влиянию изменения электрических параметров СКТ;
- разработка ИПЭС, инвариантных к влиянию основных несовершенств трансформатора;
- исследование возможности измерения паразитных составляющих, обусловленных несовершенствами их, непосредственно в процессе преобразования.

Методика исследования. Основные теоретические результаты получены с использованием известной математической модели асимметричного трансформатора. Анализ погрешностей преобразования выполнен с использованием элементов теории функции комплексного переменного, разложения функций в ряд Тейлора, принципа суперпозиции. Основные теоретические положения проверялись путем экспериментального исследования разработанных макетов преобразователей.

Научная новизна.

I. Получены удобные для анализа выражения выходных напряжений СКТ для основных режимов работы с учетом его основных несовершенств. На основе этих выражений получены выражения погрешностей преобразования для основных типов измерительных преобразователей электрических сигналов.

2. Предложены ИПЭС в фазу, инвариантные к дополнительным погрешностям трансформатора и имеющие расширенный, по сравнению с известными, диапазон преобразования. Выявлены требования, предъявляемые к элементам таких преобразователей. Предложены простые в реализации амплитудные ИПЭС с использованием в качестве функциональных преобразователей фазочувствительных выпрямителей.

3. Доказана возможность уменьшения влияния несовершенств СИГ во всех основных типах измерительных преобразователей. Показано, что их работа основана на проведении двух измерений, отличающихся друг от друга взаимным расположением обмоток, участвующих в формировании результатов измерений, с последующим их осреднением. Предложены измерительные преобразователи с параллельным проведением двух измерений, основанные на двухчастотных режимах питания СКТ. Показано, что наиболее полного уменьшения влияния несовершенств СКТ удастся добиться в преобразователях, инвариантных к влиянию изменений электрических параметров СКТ.

4. Показано, что квадратурная относительно идеального напряжения составляющая выходного напряжения СКТ пропорциональна паразитному сигналу, обусловленному несовершенством СКТ. Предложен метод преобразования, основанный на измерении квадратурных составляющих выходного напряжения СКТ, и ИПЭС на его основе, позволяющие уменьшить влияние несовершенств СКТ, используя одну выходную обмотку. Получено экспериментальное подтверждение метода.

Практическая ценность, работы заключается в

- доказательстве возможности уменьшения влияния несовершенств СКТ во всех основных типах ИПЭС;
- доказательстве возможности измерения паразитных составляющих, обусловленных несовершенством СКТ, непосредственно в процессе преобразования и способе исключения их из конечного результата;
- разработке простых ИПХ инвариантных к дополнительным погрешностям СКТ.

Реализация результатов работы: Измерительные преобразователи повышенной точности, разработанные на основе выводов и рекомендаций, полученных в работе, приняты к использованию

в опытном образце телеметрической измерительной системы с гидравлическим каналом связи (ВНИИ буровой техники, г. Москва); внедрены на предприятии п/я М-5933 (г. Баку), где они используются в составе измерительно-навигационных комплексов для морских судов. Экономический эффект от внедрения составил 63 тыс. руб.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на н. -технических конференциях: "Применение микропроцессорных вычислительных систем для управления технологическими процессами" (Смоленск, 1979г.); "Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем" (Киев, 1980г.); "Фазометрия и её применение" (Славское, 1981г.); "Измерения и контроль при автоматизации производственных процессов" (Барнаул, 1982г.); семинаре: "Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем" (Киев, 1979г.); на н. -технических конференциях Гомельского политехнического института (1979+1985).

Публикация работы. Основные результаты исследования опубликованы в 18 работах, из них 14 в соавторстве; 11 авторских свидетельств, из них 8 в соавторстве.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 156 страницах машинописного текста, из них 39 страниц рисунков и таблиц; списка используемой литературы из 144 названий и приложений.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации производится обзор и анализ известных способов преобразования выходных сигналов СКГ, на основе которого обоснована актуальность направления исследования, поставлены задачи исследования.

Показано, что измерительному преобразованию подвергаются электрические сигналы СКГ, который может работать в одном из трех режимов:

- режиме пульсирующего поля (РПП), когда вектор потока возбуждения не изменяет своего положения относительно входных обмоток;

- режиме вращающегося поля (РВП) ,когда вектор потока возбуждения вращается с частотой питающего напряжения;
- режиме следящего поля (РСП) ,когда вектор потока возбуждения не изменяет своего положения относительно выходных обмоток.

Дана классификация способов построения основных типов измерительных преобразователей электрических сигналов(ИПЭС)

СКТ. Классификационными признаками являются: параметр преобразования (амплитуда или фаза) и режим работы СКТ.В соответствии с этой классификацией известные ИПЭС относятся к одному из четырех основных типов:

- ИПЭС в фазу (фазовращатели) с СКТ, работающим в РПП;
- ИПЭС в фазу (фазовращатели) с СКТ, работающим в РВП;
- амплитудные ИПЭС с СКТ, работающим в РПП;
- амплитудные ИПЭС с СКТ, работающим в РСП.

Показано,что на точность аппаратуры на основе малогабаритных СКТ наибольшее влияние оказывают:

- погрешности от технологических несовершенств трансформатора (ТН) обусловленные неточностью его изготовления: неравномерностью воздушного зазора, различного рода эксцентриситетами, неточностью выполнения скоса пазов и т.п.;
- погрешности от несовершенств электрических параметров (НЭП) СКТ, обусловленные несимметрией электрических параметров входных и выходных обмоток,неравенством коэффициентов трансформации от входных обмоток к выходным,неперпендикулярностью осей входных и выходных обмоток и т.п.;
- погрешности от изменения электрических параметров СКТ при изменении условий эксплуатации - дополнительные погрешности (дп) .

Обоснована целесообразность повышения точности аппаратуры на основе малогабаритных СКТ. за счет построения ИПЭС,инвариантных к влиянию несовершенств самого трансформатора. Поставлены задачи исследования.

В диссертации проведен анализ влияния несовершенств СКТ на конечный результат преобразования основных типов ИПЭС. Обоснована целесообразность обеспечения х.х. на выходных обмотках СКТ, т.к. при этом уменьшается влияние основных несовершенств трансформатора,

Анализ влияния ТИ проведен с использованием известной

математической модели трансформатора с малой асимметрией магнитопровода, в которой неточность изготовления сводится к неравномерности магнитной проводимости вдоль воздушного зазора трансформатора. В соответствии с этой моделью напряжения на обмотках СКТ описываются системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{E}^a &= [z + z_0(1 + \Delta\lambda_d)] \dot{I}^a + z_0 \Delta\lambda_{dq} \dot{I}^k; \\ \dot{E}^k &= [z + z_0(1 + \Delta\lambda_q)] \dot{I}^k + z_0 \Delta\lambda_{dq} \dot{I}^a; \\ \dot{U}^a &= z_0 [(1 + \Delta\lambda_d) \cos\alpha + \Delta\lambda_{dq} \sin\alpha] \dot{I}^a + z_0 [(1 + \Delta\lambda_q) \sin\alpha + \Delta\lambda_{dq} \cos\alpha] \dot{I}^k; \\ \dot{U}^b &= z_0 [(1 + \Delta\lambda_d) \sin\alpha + \Delta\lambda_{dq} \cos\alpha] \dot{I}^a + z_0 [(1 + \Delta\lambda_q) \cos\alpha - \Delta\lambda_{dq} \sin\alpha] \dot{I}^k, \end{aligned} \quad (I)$$

где  $\dot{E}^a$ ,  $\dot{E}^k$ ,  $\dot{U}^a$ ,  $\dot{U}^b$  - напряжения на входных  $\{, k$  и выходных  $a, b$  обмотках СКТ;  $z$  - эквивалентное сопротивление входных обмоток;  $z_0$  - эквивалентное сопротивление намагничивающего контура по последовательной схеме замещения;  $\dot{I}^a$ ,  $\dot{I}^k$  - токи входных обмоток;  $\Delta\lambda_d$ ,  $\Delta\lambda_q$  - изменения относительной магнитной проводимости вдоль перпендикулярных осей  $d$ ,  $q$ ;  $\Delta\lambda_{dq}$  - изменение магнитной проводимости между осями  $d$  и  $q$  (значения величин  $\Delta\lambda_d$ ,  $\Delta\lambda_q$ ,  $\Delta\lambda_{dq}$  зависят от взаимного расположения входных и выходных обмоток);  $\alpha$  - положение выходных обмоток относительно вектора потока возбуждения (угол поворота).

На основе исходной системы уравнений (I) получены выражения выходных напряжений СКТ для основных режимов работы:

Для РПП:

$$\dot{U}_{m1}^a = \dot{E}^a e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_d) \cos\alpha + \Delta\lambda_{dq} \sin\alpha]; \dot{U}_{m1}^b = \dot{E}^k e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_d) \sin\alpha + \Delta\lambda_{dq} \cos\alpha] \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda_d = \Delta\lambda_d a e^{j\psi}$ ;  $\Delta\lambda_q = \Delta\lambda_q a e^{j\psi}$ ;  $a e^{j\psi} = z / (z + z_0)$ ;  $k e^{j\psi} = z_0 / (z + z_0)$ .

Для РВП:

$$\dot{U}_{m1}^a = \dot{E}^a e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_d) e^{j\alpha} + \delta e^{j(\alpha - \chi)}]; \dot{U}_{m1}^b = \dot{E}^k e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_q) e^{j\alpha} - \delta e^{j(\alpha - \chi)}] \quad (3)$$

где  $\Delta\lambda_1 = (\Delta\lambda_d + \Delta\lambda_q) / 2$ ;  $\Delta\lambda_2 = (\Delta\lambda_d - \Delta\lambda_q) / 2$ ;  $\delta e^{j\chi} = \Delta\lambda_2 + j \Delta\lambda_{dq}$ ;  $\delta = \delta a e^{j\psi}$ .

Для РСР:

$$\dot{U}_{m1}^a = \dot{E}^a e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_d) \cos(N - \alpha) + \delta \cos(N - \alpha - \chi)]; \dot{U}_{m1}^b = \dot{E}^k e^{j\psi} [(1 + \Delta\lambda_q) \sin(N - \alpha) - \delta \sin(N - \alpha - \chi)], \quad (4)$$

где  $N$  - выходной параметр преобразования.

На основе выражений (2+4) для основных типов ИПЭС получены выражения погрешности преобразования, обусловленной ТН  $\chi_{тн}$  и дополнительными погрешностями СКТ  $\chi_{дт}$ , приведенные в таблице I.



Получены выражения погрешности преобразования от влияния несовершенств электрической части  $\chi_{нэч}$ , которые включают в себя как несовершенства электрических параметров СКТ, так и несовершенства аппаратурной части. Выражения погрешностей  $\chi_{нэч}$  сведены в табл.1, где  $\delta$  - величина, характеризующая неперпендикулярность осей входных и выходных обмоток, отличие от расчетных аргументов коэффициентов передач аппаратурной части;  $\Delta$  характеризует неравенство коэффициентов трансформации от входных обмоток к выходным, отличие от расчетных модулей коэффициентов передач аппаратурной части;  $\mu = \alpha \sin \delta / \Delta$ ,  $\rho = \sqrt{\delta^2 + \Delta^2}$

Показано, что несовершенства электрической части одинаково влияют на конечный результат преобразования во всех основных типах ИПЭС; дополнительные погрешности СКТ влияют на результат преобразования только в ИПЭС в фазу.

Анализ погрешностей от ТН, проведенный с учетом конкретных видов ТН СКТ (эксцентриситета, магнитной и электромагнитной асимметрии), показал, что амплитудные ИПЭС меньше подвержены влиянию ТН, чем ИПЭС в фазу.

В диссертации исследуются ИПЭС с уменьшенным влиянием изменения электрических параметров СКТ (ДП) на конечный результат преобразования.

Показано, что в ИПЭС в фазу с СКТ, работающим в РПП, для уменьшения влияния ДП целесообразно опорный сигнал формировать из выходных напряжений трансформатора.

Однако в известных ИПЭС с формированием опорного сигнала из выходных напряжений СКТ, диапазон преобразования составляет  $(0; 180)^\circ$ . Для расширения диапазона преобразования предложено дополнить выходную информацию знаком и представлять её в виде  $(0+; -180)^\circ$ . Предложено устройство выделения знака, с использованием которого разработаны ИПЭС с расширенным диапазоном преобразования.

Дан анализ влияния несовершенств аппаратурной части (НАЧ), в результате которого установлено, что влияние на конечный результат преобразования фазовых погрешностей аппаратурной части значительно ослаблено; погрешности же, связанные с отличием модулей коэффициентов передач элементов аппаратурной части от расчетных, полностью входят в результат преобразования. Предложено фазодвигающее устройство со стабильным модулем коэффициента передачи.



Показано, что наличие в составе амплитудных ИПЭС сложных функциональных преобразователей ограничивает их применение. Для упрощения реализаций амплитудных ИПЭС предложено в качестве функциональных преобразователей использовать фазочувствительные выпрямители. Даны конкретные реализации таких ИПЭС.

Показано, что основным недостатком известных ИПЭС в фазу с СКТ, работающим в РВП, и периодическим изменением структуры является одновременное получение результатов преобразования, используемых при осреднении. Для одновременного проведения измерений предложен режим двух встречно вращающихся разночастотных полей. Показано, что такой режим работы возможен вследствие линейности электрических параметров СКТ в широких пределах частот и амплитуд питающих напряжений. Предложены ИПЭС с СКТ, работающим в таком режиме, и выделением полезного сигнала либо на одной и другой частотах, либо на разностной частоте. Дан анализ влияния несовершенств аппаратной части, показано, что влияние ДП ослабляется обратно пропорционально разнице в частотах питающих напряжений. В результате экспериментального исследования макетов таких ИПЭС, показано, что ослабление влияния ДП происходит в  $25 \times 30$  раз.

В диссертации описан метод преобразования электрических сигналов СКТ, позволяющий уменьшить влияние его несовершенств.

Показано, что эффективность работы известных ИПЭС, предложенных Косинским А.В. и Сафоновым Л.Н., позволяющих уменьшить влияние несовершенств СКТ, основана на одном общем свойстве трансформатора. Оно состоит в том, что несовершенства СКТ приводят к изменению магнитной проводимости вдоль воздушного зазора трансформатора в функции второй оборотной гармоники. Причем начальная фаза и амплитуда этой гармоники зависят от взаимного расположения входных и выходных обмоток (угла поворота). Показано, что, имея две пары взаимно перпендикулярных входных и выходных обмоток, всегда можно организовать два измерения, не изменяя при этом распределения магнитной проводимости, таким образом, что погрешности от ТН в конечные результаты войдут с разными знаками.

Предложен метод преобразования электрических сигналов

СКТ, основанный на двух измерениях, отличающихся взаимным расположением обмоток, участвующих в формировании результатов измерений, с последующим их осреднением.

Показана возможность применения данного метода преобразования для всех основных типов ИПЭС. Предложены конкретные КПЭС, работа которых организована в соответствии с предложенным методом. Алгоритмы работы таких ИПЭС поясняются рис. 1\*3.

На основе анализа, проведенного во второй главе, для предложенных ИПЭС получены выражения погрешностей преобразования, которые сведены в табл. 2. Анализ погрешностей преобразования показал, что ослабление влияния ТН происходит во всех типах ИПЭС. Наиболее полное ослабление влияния ТН происходит в ИПЭС, инвариантных к ДП СКТ. В известных же ИПЭС с СКТ, работающим в РВП, ослабление влияния ТН происходит не в полной мере, кроме того, эти ИПЭС подвержены влиянию ДП СКТ. Важной особенностью ИПЭС, реализованных в соответствии с предложенным методом, является инвариантность их линейности преобразования к влиянию несовершенств олектрической части (как несовершенств электрических параметров, так и несовершенств аппаратурной части).

Недостатком ИПЭС, представленных на рис. 1\*3, является последовательное проведение измерений. Для параллельного проведения измерений предложены ИПЭС на основе двухчастотных режимов работы СКТ (рис. 4\*6):

- режима двух разночастотных пульсирующих полей (рис. 4);
- режима двух разночастотных согласовращающихся полей (рис. 5);
- режима двух разночастотных встречновращающихся полей (рис. 6);

На основе принципа суперпозиции и соотношений (2\*3), получены погрешности преобразования для предложенных двухчастотных ИПЭС, выражения которых сведены в табл. 2, где индексами 1, 2 обозначается принадлежность соответствующих величин к частотам  $w_1$ ,  $w_2$ .

Анализ погрешностей преобразования ИПЭС с СКТ, работающими в двухчастотных режимах, показал, что наилучшими характеристиками обладает ИПЭС с СКТ, работающим в режиме двух встречновращающихся полей.

Экспериментальное исследование макетов ИПЭС на основе данного метода показало, что точность преобразования повы-

пается в (3+5) раз по сравнению с основными типами ИПЭС.

В диссертации исследуется возможность измерения паразитных составляющих, обусловленных несовершенствами СКТ, непосредственно в процессе преобразования.

Анализ выходных напряжений СКТ, работающего в РПП, показал, что вектор, образованный паразитными составляющими, повернут относительно вектора идеального выходного напряжения на угол  $\psi$ , определяемый электрическими параметрами СКТ и не зависящий от угла поворота (рис.7). Модуль этого вектора зависит от угла поворота по сложной зависимости. Из (2) можно получить:

$$\vec{U}_{\text{нп}}^{\text{д}} = \vec{U}_{\text{нп}}^{\text{д}} + j \vec{U}_{\text{кв}}^{\text{д}} = E_k e^{j\varphi} [\cos\alpha + \alpha \cos\psi + (\lambda_1 \lambda_2 \cos\alpha + \lambda_1 \lambda_2 \sin\alpha)] + j E_k e^{j\varphi} [\sin\psi + (\lambda_1 \lambda_2 \cos\alpha + \lambda_1 \lambda_2 \sin\alpha)].$$

Показано, что квадратурная, относительно напряжения  $E_k e^{j\varphi}$ , составляющая выходного напряжения  $\vec{U}_{\text{нп}}^{\text{д}}$  пропорциональна паразитной составляющей, обусловленной ТН СКТ.

Предложен метод преобразования, основанный на измерении квадратурных составляющих выходного напряжения трансформатора, в соответствии с которым измеренную синфазную составляющую необходимо сложить с измеренной квадратурной составляющей, сдвинутой на 90 градусов и умноженной на  $\text{ctg}\psi$ . Алгоритм преобразования поясняет рис.8, в соответствии с которым с использованием (2) можно записать:

$$\vec{U}_{\text{вых}} = \vec{U}_{\text{синф}} + j \vec{U}_{\text{кв}} \text{ctg}\psi = E_k e^{j\varphi} \cos\alpha.$$

Для измерения квадратурных составляющих предложено использовать измеритель на основе прямоугольно-координатного компенсатора переменного тока.

Разработана методика измерения углов  $\varphi$  и  $\psi$ , необходимых для реализации метода.

Проведено экспериментальное исследование метода, основанное на сравнении погрешности отображения синусоидальной зависимости, полученной в соответствии с предложенным методом. Погрешности отображения получены путем сравнения выходных напряжений испытуемого трансформатора с выходными напряжениями образцового СКТ, класс точности которого более чем на порядок превосходит класс точности испытуемого СКТ.

В качестве испытуемого использовался трансформатор типа СКТ-220-ІП кл. 0,35%.

Погрешности основных типов ИПЭС

Таблица 1

Типы ИПЭС	Погрешности ИПЭС		
	$\chi_{\text{TH}}$	$\chi_{\text{ДП}}$	$\chi_{\text{нзч}}$
			$\chi_{\text{нзп}}, \chi_{\text{нчп}}$
ИПЭС в фазу с СКТ в РПП	$\alpha(\Delta\lambda_{\text{д}}\cos\psi + \Delta\lambda_{\text{дф}}\sin\psi)$	$\Delta\varphi$	$\frac{1}{2}[\delta - \rho\sin(2\alpha + \mu + \delta/2)]$
ИПЭС в фазу с СКТ в РВП	$\alpha[\Delta\lambda_{\text{д}}\sin\psi - \delta\sin(2\alpha - \psi - \alpha)]$	$\Delta\varphi$	$\frac{1}{2}[\delta - \rho\sin(2\alpha + \mu + \delta/2)]$
Амплитудный ИПЭС с СКТ в РПП	$\alpha\delta\cos\psi\sin(2\alpha - \psi)$	0	$\frac{1}{2}[\delta - \rho\sin(2\alpha + \mu + \delta/2)]$
Амплитудный ИПЭС с СКТ в РСР	$\alpha\delta\cos\psi$	0	$\frac{1}{2}[\delta - \rho\sin(2\alpha + \mu + \delta/2)]$

Погрешности ИПЭС с уменьшенным влиянием несовершенств СКТ

Таблица 2

Типы ИПЭС	Погрешности ИПЭС			
	$\chi_{\text{TH}}$	$\chi_{\text{ДП}}$	$\chi_{\text{нзч}}$	
			$\chi_{\text{нзп}}$	$\chi_{\text{нчп}}$
ИПЭС в фазу с СКТ в РВП	$\alpha\Delta\lambda_{\text{д}}\sin\psi$	$\Delta\varphi$	$\frac{\delta}{2}$	$\frac{\delta}{2}$
ИПЭС в фазу с СКТ в РПП	0	0	$\frac{\delta}{2}$	$\frac{\delta}{2}$
Амплитудный ИПЭС с СКТ в РПП	0	0	$\frac{\delta}{2}$	$\frac{\delta}{2}$
Амплитудный ИПЭС с СКТ в РСР	0	0	$\frac{\delta}{2}$	$\frac{\delta}{2}$
ИПЭС с СКТ в режиме двух пульсирующих полей	0	0	0	$[\rho_1\sin(\mu_1 + \frac{\delta_1}{2}) - \rho_2\sin(\mu_2 + \frac{\delta_2}{2})]\sin 2\alpha$
ИПЭС с СКТ в режиме двух встречно-вращающихся полей	0	$\Delta\varphi - \Delta\varphi_2$	0	$\frac{\delta_1 - \delta_2}{2}$
ИПЭС с СКТ в режиме двух согласовращающихся полей	$2\alpha\Delta\lambda_{\text{д}}\sin\psi$	$\Delta\varphi + \Delta\varphi_2$	$\frac{\delta}{2}$	$\frac{\delta_1 + \delta_2}{2} + \frac{1}{2\alpha}[\rho_1\sin(2\alpha + \mu_1 + \frac{\delta_1}{2}) - \rho_2\sin(2\alpha + \mu_2 + \frac{\delta_2}{2})]$



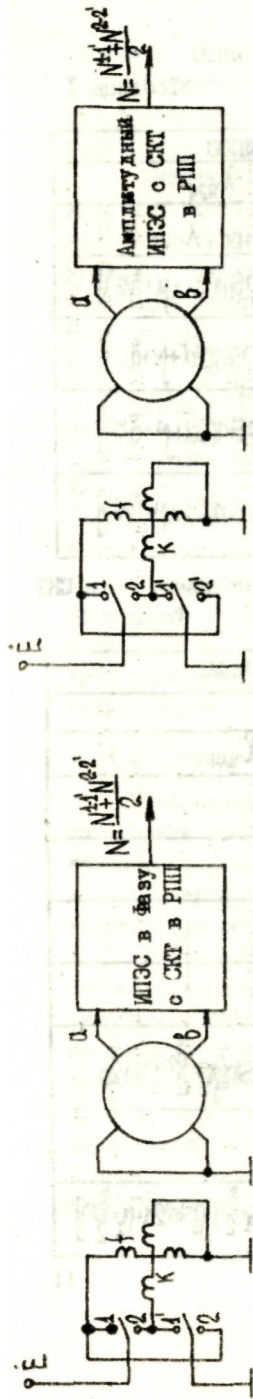


Рис. 1. Уменьшение влияния несовершенств СКТ в ИПЭС в фазу с СКТ в РПП

Рис. 2. Уменьшение влияния несовершенств СКТ в амплитудных ИПЭС с СКТ в РПП

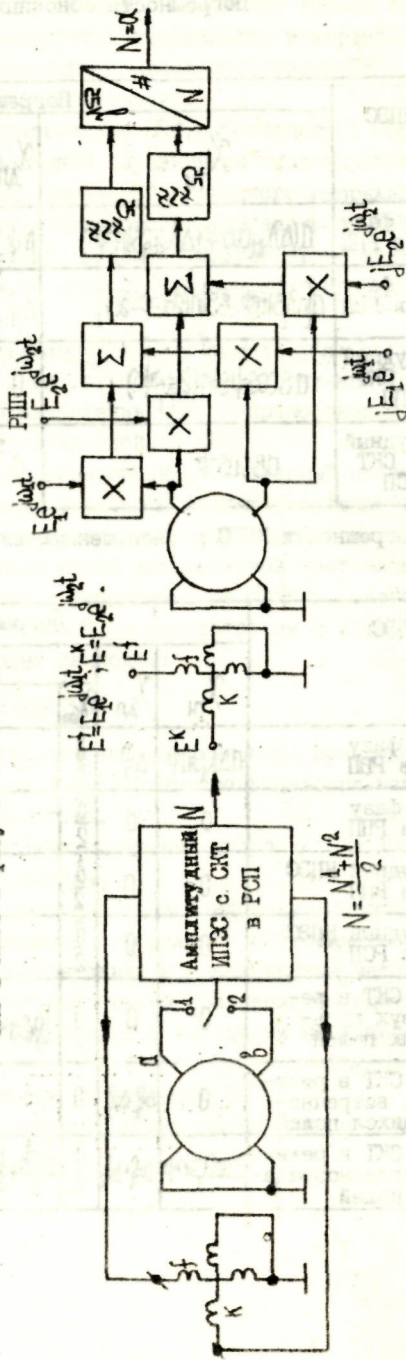


Рис. 3 Уменьшение влияния несовершенств СКТ в амплитудных ИПЭС с СКТ в РСП

Рис. 4 ИПЭС с СКТ, работающим в режиме двух пульсирующих разночастотных полей

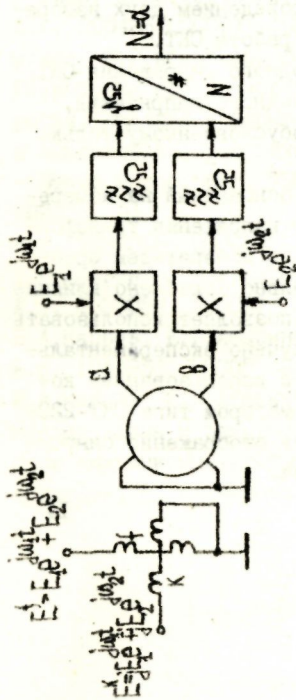


Рис. 5 ИЭС с СКТ, работающим в режиме двух согласованных полей

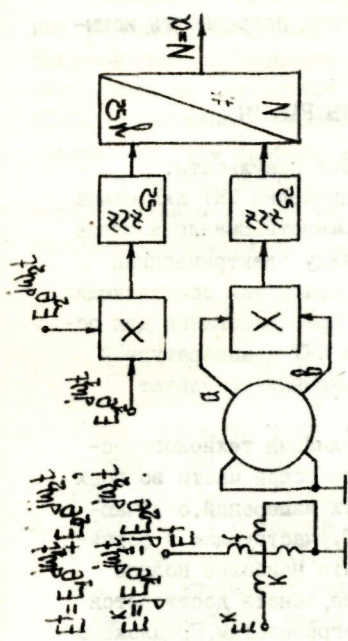


Рис. 6 ИЭС с СКТ, работающим в режиме двух встречноповращающихся полей

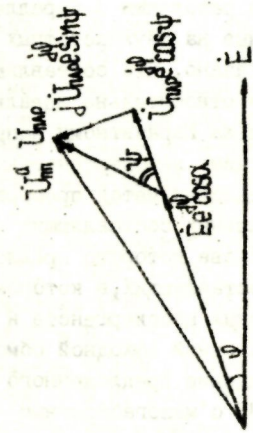


Рис. 7 Векторная диаграмма, поясняющая измерение квадратурной составляющей выходного напряжения СКТ

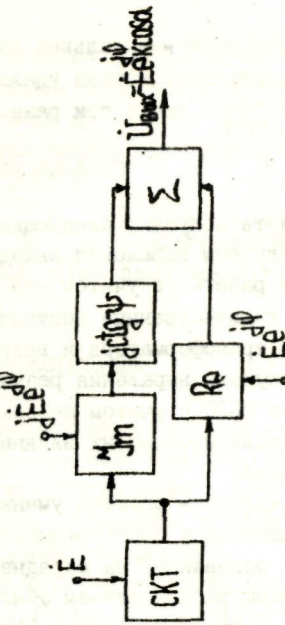


Рис. 8 Структурная схема, поясняющая алгоритм преобразования, основанный на измерении квадратурных составляющих

Анализ экспериментальных данных показал, что с использованием предложенного метода удалось снизить погрешность испытуемого СКТ более чем в три раза.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Получены выражения выходных напряжений СКТ для основных режимов работы с учетом его несовершенств. Выявлена связь и получены количественные соотношения между электрическими параметрами трансформатора и величиной паразитных составляющих.

2. Получены выражения результатов преобразования для основных типов ИПЭС с учетом несовершенств СКТ и аппаратурной части; проанализировано их влияние на конечный результат преобразования.

3. Предложены способы уменьшения влияния технологических несовершенств и несовершенств электрической части во всех типах ИПЭС, основанные на осреднении двух измерений, отличающихся взаимным расположением обмоток СКТ, участвующих в формировании результатов измерения. Показано, что наиболее полное уменьшение влияния технологических несовершенств достигается в ИПЭС, инвариантных к дополнительным погрешностям. Предложены способы преобразования с параллельным проведением двух измерений, основанные на двухчастотных режимах работы СКТ.

4. Показано, что составляющая выходного напряжения СКТ, квадратурная относительно идеального выходного напряжения, пропорциональна паразитному напряжению, обусловленному только технологическими несовершенствами.

5. Предложен метод преобразования, основанный на измерении ортогональных составляющих выходного напряжения трансформатора, на основе которого предложен ИПЭС с измерителем ортогональных составляющих, в котором значительно ослаблено влияние технологических несовершенств и который позволяет использовать СКТ только с одной выходной обмоткой. Получено экспериментальное подтверждение предложенного метода, с использованием которого в ИПЭС с малогабаритным трансформатором типа СКТ-220-III кл. 0,35% удалось снизить погрешность отображения синусоидальной зависимости более чем в три раза.



6. Предложены способы и устройства преобразования выходных сигналов СКТ в фазу с уменьшенным влиянием дополнительных погрешностей, обладающие расширенным диапазоном преобразования. Выявлены требования, предъявляемые к элементам таких ИПЭС. Предложено фазосдвигающее устройство, наиболее полно отвечающее этим требованиям.

7. Предложены простые в реализации амплитудные ИПЭС с использованием в качестве функциональных преобразователей фазочувствительных выпрямителей.

## СЫЛКИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абаринов Е.Г., Карпов В.А. Микропроцессорный преобразователь угла поворота в код на вращающемся трансформаторе. - Тез. докл./Н.-техн.конференция "Применение микропроцессорных вычислительных систем для управления технологическими процессами."- Смоленск, 1980, с. 102-104.
2. Абаринов Е.Г., Карпов В.А. Преобразователь угла поворота в код на основе СКТ.-Тез. докл./Республ. н.-техн.конференция "Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем". - Киев, 1980, с.19-20.
3. А.с. 890423 (СССР) . Преобразователь угловых перемещений в код/ Е.Г.Абаринов, В.А.Карпов. - Оpubл. в Б.И. 1981, №46.
4. Разработка преобразователей геометрических параметров бурения, наладка и испытание блоков аппаратуры для записи в аналоговой форме технологических параметров бурения. - Отчет № гос. рег. 78079236, инв. 02840031215, Гомель, ПИ, с. 94.
5. А.с. 1037056 (СССР) . Преобразователь угловых перемещений/ Е.Г.Абаринов, В.А.Карпов. - Оpubл. в Б.И. 1983, № 31.
6. А.с. 1037057 (СССР) Преобразователь угловых перемещений/ В.А.Карпов, Е.Г.Абаринов. - Оpubл. в Б.И. 1983, № 31..
7. А.с. 1044956 (СССР) Преобразователь угловых перемещений/ В.А.Карпов, Е.Г.Абаринов. - Оpubл. в Б.И. 1983, № 36.
8. Исследование и разработка математической и физической модели индукционных датчиков и аппаратуры для измерения и обработки их выходного сигнала. ~ Отчет № гос.рег.81053692,

- инв. № 02840032775, Гомель, ПИ, 1984, с. 90,
9. Теоретическая оценка погрешностей измерения относительной скорости и разработка преобразователей скорости в кодцифру и пройденный путь. - Отчет "ДСП" № гос.рег. 61053692, инв. № 02840031836, Гомель, ПИ, 1984, с. 42.
  10. А.с. П03272 (СССР) .Преобразователь угла поворота вала в код/ В.А.Карпов. - Опубл. в Б.И. 1984, № 26.
  11. А.с. П13829 (СССР) .Преобразователь угловых перемещений/ В.А.Карпов, Е.Г.Абаринов - Опубл. в Б.И. 1984, № 34.
  12. А.с. П37581 (СССР) . Преобразователь угловых перемещений/ В.А.Карпов, Е.Г.Абаринов. - Опубл. в Б.И. 1985, № 1.
  13. А.с. П37582 (СССР) .Способ преобразования угловых перемещений в код/ В.А.Карпов,Е.Г.Абаринов. - Опубл. в Б.И. 1985, №4
  14. А.с. П35010 (СССР) .Способ преобразования угловых перемещений/ В.А.Карпов, Е.Г.Абаринов - Опубл. в Б.И. 1985, №2
  15. А.с. П49408 (СССР) .Преобразователь угловых перемещений в код/ В.А.Карпов. - Опубл. в Б.И. 1985, № 13.
  16. Карпов В.А. Способ преобразования угловых перемещений в код. Пол. реш. по заявке № 3750813, от 12.12.84.
  17. Абаринов Е.Г., Карпов В.А. Погрешности преобразователей "угол-фаза". - Гомель, 1985.-9с. - Рукопись депонирована в ЦНИИ приборостроения 1985, № 2786-А.
  18. Карпов В.А. Структурные методы повышения быстродействия измерительных преобразователей повышенной точности на основе синусно-косинусных трансформаторов (СКТ) .Тез. докл. "ДСП"/Респ.н.-техн. конференция: "Структурные методы повышения точности,чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем". - Житомир, 1985, с.49-50.