# МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

## МУРАТОВА Вера Владимировна

## ИНФОРМАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Специальность:

05.11.16 -

Информационно-измерительные и управляющие системы (технические системы)

### Диссертация на соискание ученой степени

#### кандидата технических наук

Научный руководитель -

доктор технических наук,

профессор П.К. Ланге

# содержание

введение	5
1 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	
АППРОКСИМАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ	
ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СИЛОВОГО	
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	13
1.1 Особенность измерений, контроля и испытаний силового	
электрооборудования	13
1.2 Использование аппроксимационного подхода при решении задач изме-	
рения, контроля и испытаний	17
1.3 Основные результаты и выводы	22
2 МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ	
ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	23
2.1 Основные параметры периодических сигналов	23
2.2 Анализ аппроксимационных методов измерения интегральных характе-	
ристик гармонических сигналов	25
2.2.1 Метод определения интегральных характеристик гармонических сиг-	
налов по трем мгновенным значениям напряжения и тока, сдвинутым в	
пространстве и связанных с переходами через ноль	29
2.2.2 Метод, основанный на определении интегральных характеристик по	
двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измерен-	
ным в произвольный момент времени, вторые мгновенные значения	
напряжения и тока сдвинуты относительно первых на угол 90° в сторону	
опережения	34
2.2.3 Метод измерения интегральных характеристик с использованием	
сравнения входного и сдвинутого относительно него на произвольный угол	
$\Delta \alpha$ , дополнительного напряжения	41
2.2.4 Метод измерения интегральных характеристик с формированием двух	
дополнительных сигналов напряжения и тока и сравнением входного и од-	48

ного из дополнительных сигналов напряжений и токов

2.2.5 Метод измерения интегральных характеристик, основанный на сравнении основного и дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на угол 90 °, начиная с произвольного момента времени без разделения во времени

2.2.6 Метод с использованием дополнительных сигналов напряжения и тока с разными углами сдвига и перехода входного напряжения через ноль
2.2.7 Метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям напряжения и тока, связанных с переходом сигнала напряжения через ноль и сравнением основного и дополнительного сигналов напряжения
2.3 Основные результаты и выводы

# 3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ИНВАРИАНТНЫХ К ПОГРЕШНОСТЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

3.1 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов и дополнительного напряжения, измеренным в моменты переходов сигналов напряжения через ноль и через произвольный интервал времени

3.2 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов, измеренным в моменты переходов входного и дополнительного напряжений и тока через ноль

3.3 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов с использованием переходов ортогональных составляющих напряжения через ноль

3.4 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов на основе формирования дополнительных сигналов напряжения и использования их характерных точек

3.5 Метод определения параметров по мгновенным значениям сигналов на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов,

3

71

53

58

64

69

74

91

разделенных в пространстве	111
3.6 Основные результаты и выводы	118
4 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ	
И ДИАГНОСТИКИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	119
4.1 Работа асинхронных двигателей при отклонениях частоты, напряжения	
и нагрузки от нормальных значений	119
4.1.1 Изменение частоты при нормальном напряжении	120
4.2 Приемо-сдаточные испытания погружных электродвигателей	121
4.2.1 Опыт короткого замыкания	121
4.2.2 Опыт холостого хода	123
4.3 Информационно-измерительная система контроля параметров	
погружных электродвигателей	124
4.4 Основные результаты и выводы	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	130
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	131
ПРИЛОЖЕНИЕ А Внешний вид стенда	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Основные технические характеристики стенда	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В Основные технические характеристики разработанной	
системы	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Форма протокола тестирования пэд	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты о внедрении результатов диссертационной работы	153

#### введение

#### Актуальность темы

Силовое электрооборудование является сложной составляющей промышленных объектов с большим числом контролируемых параметров. Для обеспечения бесперебойной работы такого оборудования, контроля его аварийных и предаварийных режимов большое значение имеет оперативное измерение информативных параметров сигнала. В связи с этим актуальной является задача разработки информационно-измерительных систем (ИИС) контроля предаварийных режимов работы силового оборудования с высоким быстродействием измерения их параметров. При измерении таких информативных параметров, как среднеквадратическое, средневыпрямленное значение тока и напряжения, активная и реактивная мощность и других, возникает задача обеспечения необходимого быстродействия и точности определения мгновенных значений параметров сигнала и обеспечения многоканальности измерений.

При реализации процедур измерений, контроля и испытаний энергообъектов целесообразно использовать аппроксимационные методы. Большинство данных об исследуемом объекте, полученных экспериментально и представленных в виде чисел, графиков, позволяют определить математическую модель объекта с использованием аппроксимирующих зависимостей.

#### Степень разработанности темы исследования

Разработке и исследованию аналоговых методов, приборов и систем измерения интегральных характеристик периодических сигналов (ИХПС) посвящено множество работ (С.В. Анашкин, С.В. Карташов, Ю.Я. Любарский, Волгин В.Л., Орнатский П.П., Попов В.С. и другие) [1-10]. Основными недостатками, предложенных авторами методов и средств являются невысокая точность и низкое быстродействие.

В 60-е годы XX века широкое распространение получили цифровые методы определения ИХПС с помощью комбинирования аналоговых и аналого-цифровых

преобразователей сигналов (А.Я. Безикович, Е.З. Шапиро, В.Л. Волгин и другие) [4,5]. Затем стали появляться комбинированные средства нахождения ИХПС, которые выполняли неполное аналоговое преобразование входных величин. В таких средствах большинство преобразований входных сигналов осуществлялось в цифровом виде (О.П. Синицкий, В.И. Губарь Шляндин В.М., В.М. Pressman, Y.R.Rapid, Lois A. Marzetta, H. Germer и другие) [11-15].

Для нахождения ИХПС используется аналого-цифровое преобразование мгновенных значений сигналов, с равномерной их дискретизацией и дальнейшей интерпретацией пропорциональных им кодов (И.Ф. Клисторин, И.И. Коршевер, Y.R. Clarke, J.R. Smith, F.J.J. Stockton, A.H. Yang, M. Steidentop)[16-26].

В создание теоретических основ и реализацию средств измерения ИХПС большой вклад внесли ученые: Т.М. Алиев, В.Л. Волгин, Ф.А. Зыкин, В.У. Кизилов, Ф. Кларк, И.Ф. Клисторин, Д. Лэмпард, К.Л. Куликовский, В.С., Мелентьев, П.П. Орнатский, В.С. Попов, Я. Смит, Дж. Стоктон, Ю.М. Туз, Э.К. Шахов, В.М. Шляндин, А. Янг и др.

Один из основных вопросов, который приходится решать при построении ИИС, реализующих аппроксимационные методы, связан с определением оптимальных моментов времени, в которых нужно выполнять измерение мгновенного значения сигналов, исходя из требований точности определения их параметров.

При измерении параметров периодических сигнала изначально считается, что отсчеты сигналов равномерно распределены по периоду, т.е. период точно поделен на *n* интервалов дискретизации. В реальных ситуациях это условие не выполняется, что неизбежно приводит к погрешности, которую в некоторых зарубежных работах называют погрешностью некратности. Очевидно, что этот вид погрешности обусловлен, в первую очередь, колебаниями частоты входного сигнала, а также неточным делением периода на *n*. При этом повышение точности измерения достигается, в основном, только за счет увеличения разрядности аналого-цифрового преобразователя и числа точек дискретизации.

Наиболее простую реализацию рассматриваемые методы обеспечивают при измерении ИХПС. Однако применение аппроксимационных методов для измере-

ния параметров периодического сигнала по их мгновенным значениям не может существенно сократить время измерения, поскольку методы предусматривают равномерное распределение отсчетов по периоду сигнала и точное определение значения периода, т.е. время измерения зависит от периода сигнала.

В связи с этим возникает задача сокращения времени измерения информационных интегральных характеристик и построения ИИС, обеспечивающих возможность определения этих параметров за время, значительно меньшее периода сигнала.

Исследования современных ученых, таких как Н.С. So, H. Hoseini, А.К. Muciek, R.C. Dugan, Ю.Р. Агалиалов, И.Н. Желбаков, Ю.П. Муха сводятся к попыткам уменьшения погрешности нахождения отдельных ИХПС за счет обработки полученных результатов измерений [27-31]. В этих методах отсутствует системный подход к нахождению всего комплекса характеристик сигналов, а также не рассматривается сокращение времени измерений.

В работах В.С. Мелентьева, В.И. Батищева, Д.И. Нефедьева [32-43] аппроксимационный подход активно использовался для решения оперативного нахождения ИХПС. Этот подход основан на определении интегральных характеристик по функциональной зависимости от параметров модели периодического (в том числе и гармонического) сигнала, а также формировании дополнительного сигнала. Построение модели выполняется с учетом априорной информации об исследуемом объекте.

Тем не менее, многие вопросы разработки аппроксимационных методов и средств измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС), которые основаны на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе, и сравнении мгновенных значений входных и дополнительных сигналов, остаются открытыми.

Цель диссертационной работы - разработка и исследование быстродействующей ИИС определения ИХГС с использованием аппроксимационных методов их измерения с пространственным разделением сигнала, позволяющей повы-

сить точность оперативного контроля параметров электрооборудования, а так же выявлять и регистрировать аварийные ситуации.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Обоснование возможности использования аппроксимационного подхода к решению задач оперативного измерения и контроля параметров силового электрооборудования.

2. Классификация известных аппроксимационных методов и средств измерения ИХГС с целью разработки новых методов их измерения.

3. Разработка новых методов и средств измерения интегральных характеристик периодических сигналов, близких к гармонической модели, по мгновенным значениям переходных процессов с улучшенными метрологическими характеристиками и высоким быстродействием.

4. Исследование методических погрешностей новых методов определения ИХГС, а также разработка способов их корректировки.

5. Разработка автоматизированной ИИС контроля электрических параметров силового электрооборудования, характеризуемой высокими быстродействием и точностью.

#### Научная новизна

1. Разработаны новые аппроксимационные методы определения ИХГС по мгновенным значениям гармонических сигналов, отличающиеся формированием дополнительного сигнала с последующей коррекцией погрешности. Реализация новых методов позволяет избавиться от частотной и угловой погрешностей, возникающих при формировании дополнительного сигнала, и погрешности по модулю фазосдвигающего блока, осуществляющего формирование дополнительных сигналов.

2. Разработан новый метод измерения интегральных характеристик периодических сигналов, модель которых близка к модели гармонического сигнала, отличающийся формированием дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного, а также сигнала, инверсного входному. Метод позволяет исключить угловую погрешность фазосдвигающего блока и погрешность по напряжению инвертора.

3. Проведено исследование метрологических характеристик новых методов и систем определения ИХГС, основанных на применении дополнительных сигналов, сдвинутых по сравнению с входными на произвольный угол, которое позволило определить их возможности с точки зрения метрологических характеристик.

#### Теоретическая и практическая значимость

Значимость теоретических результатов работы заключается в создании обобщенной методики измерения ИХГС, что позволяет проектировать ИИС для различного силового электрооборудования.

Практическая значимость определяется тем, что разработанные методы и алгоритмы измерений являются основой при проектировании информационноизмерительных систем, предназначенных для испытания и контроля электродвигателей погружных насосов для нефтяных скважин в ООО «Роснефть-Ремонт НПО» и ООО «Инженерные технологии».

#### Методы научных исследований

В работе использованы методы теории измерений, численного анализа, теории электрических цепей и сигналов, методов цифровой обработки сигналов, методов аналитического и имитационного моделирования.

#### Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Методы измерения ИХГС по мгновенному значению гармонического сигнала, основанные на формировании дополнительного сигнала с применением его последующей коррекции.

2. Методы и алгоритмы определения ИХГС, основанные на формировании двух сигналов напряжения: инверсного входному, а также дополнительного.

3. Методика экспериментальной оценки погрешностей известных и новых методов и систем определения информационных интегральных характеристик гармонических сигналов.

4. Обобщенная структурная схема ИИС контроля электрических параметров силового электрооборудования.

#### Соответствие паспорту специальности

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальностей научных работников 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы»: п. 2 «Новые методы и технические средства контроля и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем», п. 3 «Методы и технические средства метрологического обеспечения информационно-измерительных и управляющих систем, п. 3 «Методы и измерительных и управляющих систем, метрологического обеспечения испытаний и контроля, метрологического сопровождения и метрологической экспертизы информационно-измерительных и управляющих систем, методы проведения их метрологической аттестации».

#### Достоверность результатов исследования

Достоверность определяется экспериментальными исследованиями ИИС на испытательных стендах, подтверждающими основные теоретические положения работы и не противоречащими известным положениям в данной области исследований.

#### Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и Всероссийских конференциях, в том числе на Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 2015 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2016 г.) Международной научно-практической конференции «Современный взгляд на проблемы технических наук» (г. Уфа, 2015 г.), Международной научнопрактической конференции «Современные тенденции развития естествознания и технических наук» (г. Белгород, 2018 г.)

Работа выполнялась в рамках грантов РФФИ: № 16-08-00252-а «Создание теоретических основ синтеза структурно-алгоритмических методов построения высокоточных быстродействующих систем определения характеристик периодических и переходных процессов», № 13-08-00173-а «Методология синтеза аппроксимационных методов и систем оперативного анализа и идентификации квазидетерминированных процессов в сложных технических системах»; № 14-08-00700-а «Методология способов коррекции характеристик и динамических параметров измерительных преобразователей на основе использования аппроксимационных методов»; № 18-08-00253-а «Создание теоретических основ методологии обработки сигналов аналитических приборов и синтеза методов улучшения их характеристик», госбюджетной фундаментальной научно-исследовательской работы «Создание методологии сверхбыстрого анализа и идентификации квазидетерминированных периодических и переходных процессов» (рег. номер 01201257378).

#### Внедрение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли применение при разработке ИИС стендовых испытаний погружных электродвигателей и внедрены в Самарском филиале ООО «Роснефть-Ремонт НПО» (г. Отрадный) и ООО «Инженерные технологии» (г. Самара). Разработанные методики оценки погрешностей внедрены в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке магистров по направлению 12.04.01 «Приборостроение» по магистерской программе «Приборостроение»

#### Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 38 работ, в том числе 11 в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ.

#### Личный вклад автора

Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. Техническая часть экспериментальных работ проведена с участием коллектива кафедры «Информационно-измерительная техника» Самарского технического университета.

#### Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и библиографического списка из 110 наименований, общим объемом 155 страниц печатного текста и 5 приложений на 12 страницах.

#### Благодарность

Исследования выполнены на кафедре «Информационно-измерительная техника» Самарского государственного технического университета. Тематика исследований была предложена автору д.т.н., профессором В.С. Мелентьевым в сентябре 2012 года. Автор выражает глубокую благодарность и признательность безвременно ушедшему из жизни В.С. Мелентьеву, за научное руководство, за помощь в постановке задач, проведении экспериментов, анализе результатов и подготовке публикаций на протяжении 5 лет.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность д.т.н, профессору П.К. Ланге за научное руководство, за поддержку на заключительных этапах подготовки работы.

# 1 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППРОКСИМАЦИОННОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Особенность измерений, контроля и испытаний силового электрооборудования

Эффективность и надежность электрических станций и подстанций является одной из главных проблем качества электрической энергии в промышленности.

Надежность силового электрооборудования во многом определяется эффективностью работы средств его защиты от аварийных режимов работы, которая определяется в основном быстродействием таких средств.

Однако существующие средства защиты часто не имеют высокое быстродействие. Для обеспечения высокой эффективности необходимо контролировать интегральные характеристики напряжений и токов в силовых цепях (активную и реактивную мощность, эффективное значение напряжений и токов), однако такие параметры определяются существующими средствами недостаточно быстро.

Проблемой является также наличие помех в силовых электрических цепях.

Большое количество помех влияет на качество электроэнергии. Существует общепринятая классификация видов помех, которые способны значительно ухудшить качество электроэнергии, к таким относят: одиночные помехи, периодические, гармонические, а так же шумы. Такие виды помех являются сигналами, протекающие во времени, природа их появления может быть различна. Одиночные помехи появляются из-за коммутации сетей и электроприемников, коротких замыканий и статических разрядов, а так же возмущений тока и напряжения в сети. Еще одним видом помех - периодические, они зависят от импульсноциклического характера нагрузки мощных электроприемников. Такие виды помех, как гармонические (высшая гармоническая составляющая (ВГС) возникают с частотой сети или кратной ей. Они могут быть вызваны мощными нелинейными электропотребителями в случае если мощность питающей сети ограничена. Такие виды помех, как гармонические и периодические зачастую приводят к возникновению несинусоидальности напряжения [44 – 51, 15].

На различных участках сети причины появления ВГС могут быть совершенно разными. В зависимости от характера, интенсивности и продолжительности высшие гармоники влияют на работу систем автоматики и телемеханики отрицательно, значительно снижается экономичность, надежность работы электрических сетей, уменьшается срок эксплуатации электрооборудования и приводят к появлению других нежелательных последствий [52-59]. В высоковольтных сетях появление ВГС обусловлено воздействием мощных нелинейных электроприемников коронными разрядами, грозовыми разрядами и аварийными режимами работы линий электропередач. В низковольтных сетях они обусловлены нестационарными процессами и нелинейными характеристиками отдельных электроприемников.

Высшие гармоники сигналов нередко превышают установленные пороговые значения из года в год из-за возрастания количества мощных потребителей, вырабатывающих высшие гармоники сигналов. Чтобы прогнозировать параметры несинусоидальных режимов в системе электроснабжения промышленных предприятий на начальном этапе проектирования предприятия и изменения его схемы, а так же чтобы определить уровень высших гармоник при включении потребителей - источников ВГС, необходимо решить важнейшую задачу расчета параметров ВГС в сети предприятия.

Проведенные в работе исследования состава высших гармоник сигналов в цепях нескольких энергообъектов и электрического оборудования показали, что:

- в электрических сетях, имеющих номинальное напряжение 110 кВ и выше действующие сигналы имеют форму, близкую к синусоидальной;

-коэффициенты искажения синусоидальности, которые являются комплексной величиной и характеризуют соотношение между ВГС и первой гармоникой сигналов, меньше 2 %;

- коэффициенты отдельных гармоник в сигналах, имеют наибольшую амплитуду, которая меньше 1,5 %. - близки к модели гармонических сигналов (МГС), имеющие место в силовых цепях разных электромеханических систем [60].

Многие проблемы ВГС решены отечественными и зарубежными учеными. Вопросы, связанные с ВГС, впервые были освещены в работах Мельникова Н.А., Константинова Б.А., Либкинда М.С. Так же, большой вклад для решения этой проблемы в нашей стране внесли такие ученые, как: Глинтерник С.Р., Гераскин О.Т., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Зорин В.В., Кузнецов В.Г., Крайчик Ю.С., Кучумов Л.А., Мамошин Р.Р., Никифорова В.Н., Самородов Г.И., Салтыков В.М., Солодухо Я.Ю., Тимофеев Д.В., Трофимов Г.Г., Федоров В.К., Черепанов В.В., Шалимов М.Г., Шидловский А.К. и другие, за рубежом - Аррилага, Д. Брэдли, А. Роберт и многие другие.

Труды И.В. Жежеленко являются основополагающими работами в области анализа несинусоидальных режимов электропотребления промышленных предприятий [61, 62].

Электроэнергетическая система промышленных предприятий входит в категорию сложных систем, под которыми в первую очередь понимают системы, с глубокими внутренними связями, в состав которых входит большое число взаимодействующих и взаимосвязанных между собой элементов.

Главной особенностью сложных систем, которая значительно ограничивает применение существующих методов расчета, является невозможность их корректного математического описания из-за большого количества элементов, связанных между собой неизвестным образом и недостаток информации о параметрах и режимах работы электрооборудования.

В качестве исходных экспериментальных данных при проведении измерений, контроля и испытания электрических параметров электрооборудования всегда используют измерительные сигналы.

Однако при определении ИХПС с применением данных методов считается, что отсчеты сигналов равномерно распределены по периоду, т.е. период точно поделен на определенное число интервалов дискретизации. В реальных условиях данное условие не выполняется, это неизбежно приводит к возникновению погрешности.

Применение данных методов для нахождения ИХПС не может существенно уменьшить время измерения, т.к. в методах применяется равномерное распределение отсчетов по периоду сигнала и точное определение значения периода, т.е. время измерения зависит от периода сигнала.

Возникает задача максимального сокращения времени определения ИХПС и построения средств измерений, обеспечивающих возможность определения этих параметров путем обработки мгновенных значений (МгЗ) за время, меньшее периода входного сигнала (BxC).

Одним из путей решения данной задачи является привлечение априорной информации о модели объекта или измерительного сигнала для определения его информативных параметров.

Для проведения теоретического анализа, определения параметров сигналов независимо от их физической природы, предсказания результатов в меняющихся условиях создаются математические модели сигналов. Математическая модель позволяет описывать определяющие, главные параметры сигналов, и отсеивать множество второстепенных признаков.

Процедуры измерений, контроля и испытаний по своей сути являются аппроксимационными задачами [15, 63]. Абсолютно все данные об исследуемом объекте, полученные экспериментально и представленные в виде чисел, графиков, формул, являются моделью исследуемой реальности, т.е. аппроксимирующая ее форма.

Аппроксимационным подходом называют общность принципов, методов и средств, цель которых заключается в построении явных аналитических моделей, вид которых задается, учитывая априорную информацию, имеющиеся фактические экспериментальные данные, и цель проводимых исследований [10, 33,64 – 66].

Аппроксимационный подход и его практические приложения нашли широкое применение не только в задачах, связанных с математическим

моделированием сигналов, объектов и систем, но и в теории и технике идентификации [35-38]. В середине 60-х годов прошлого столетия идентификация отделилась, став самостоятельным научным направлением, которое смогло объединить в себе принципы и методологию математического моделирования, теорию и методы статистического оценивания, измерительные технологии, методы оптимального планирования эксперимента и обработки данных, которые получены экспериментальным путем [4,5].

Существуют такие задачи измерения, контроля и испытаний, в которых вид сигнала может быть задан физическими законами рассматриваемых явлений, а погрешности измерений незначимы. Таким примером могут являться переходные процессы электрических цепях линейного типа. Характер процесса определяется параметрами цепи, а мгновенные значения напряжения (МгЗН) или мгновенные значения тока (МгЗТ) возможно измерить новейшими средствами с достаточно высокой точностью. По такому принципу осуществляют работу различные системы испытаний и контроля блоков электронной аппаратуры, энергообъектов и электротехнического оборудования.

# 1.2 Использование аппроксимационного подхода при решении задач измерения, контроля и испытаний

Применение аппроксимационного подхода в задачах построения ИИС такого типа, приводит к результативному решению и дает общеметодологическую платформу для приведения к единому виду измерительных средств и их дальнейшего метрологического анализа.

В последние годы решение задач нахождения параметров квазидетерминированных сигналов, когда вид модели можно определить с высокой точностью, используя априорные данные, а случайные составляющие искомых величин возникают только из-за наводимых помех и могут быть признаны пренебрежимо малыми, выделяют в особое направление, называемое измерительно-моделирующим подходом [63].

Чтобы дать описание неслучайным измерительным сигналам, применяются квазидетерминированные модели. В данных моделях априорно известны значения одного или нескольких параметров, которые принимают, как правило, за случайные величины с совершенно незначительной случайной компонентой, влиянием которой возможно пренебречь [67].

Для решения таких задач, как определение ИХПС можно использовать аппроксимационный подход [35, 37]. Если измерительный сигнал x(t) аппроксимируется зависимостью  $x_{M}(t_{1}, \alpha_{1}, \alpha_{2}, ..., \alpha_{m})$ , то, произведя измерения *m* значений сигнала при различных, в общем случае произвольных, значениях аргумента *t*, можно составить систему из *m* уравнений, которую можно решить относительно параметров  $\alpha_{1}, \alpha_{2}, ..., \alpha_{m}$ .

$$\begin{cases} x(t_1, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = x(t_1), \\ \dots \\ x(t_m, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = x(t_m), \end{cases}$$
(1.1)

В том случае, когда модель  $x_{M}(t_1, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m)$  нелинейна относительно параметров  $\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_m$  функцией, а значения  $t_1, ..., t_m$  выбраны произвольно, система (1.1) может быть сложной для аналитического или явного численного решения. Поэтому в тех случаях, когда возможна альтернатива, необходимо выбирать модели, линейные относительно параметров. Если нет невозможности сделать этого, то упростить решение системы (1.1) можно выбором соответствующих значений  $t_1, ..., t_m$  [36].

Таким образом, привлечение априорной информации о форме сигнала дает возможность заменить интегральные преобразования арифметическими операциями с точечными оценками. Предложенный подход позволяет обобщить существующие методы, алгоритмы и средства измерения интегральных характеристик сигналов и разрабатывать новые.

Одним из недостатков аппроксимационного подхода является анализ точности измерений. Когда модель и реальный сигнал (PeC) полностью совпадают, то получается методически точный результат. При каком-либо несоответствии модели и вида моделируемого сигнала оценки параметров могут иметь существенные отличия от оптимальных.

В соответствии с общей методикой метрологического анализа аппроксимационных методов, алгоритмов и средств [38, 68, 69] оценки результирующей погрешности задаются целями измерений и обработки результатов. В общем случае, качество решения аппроксимационной задачи можно оценить некоторой результирующей погрешностью, которая включает в себя все составляющие, позволяющие определить несоответствие между моделью и моделируемой зависимостью. В случае случайных сигналов это интегральные, как правило, среднеквадратические оценки. При квазидетерминированных сигналах могут быть получены более жесткие оценки равномерного приближения. Однако чтобы получить такие оценки необходимо знать вид реальной аппроксимируемой зависимости [41].

Для получения аналитических оценок погрешностей предлагается применять модели более общего вида, которые включают используемую интерпретационную модель как частный случай. В качестве общих эталонных моделей могут использоваться функциональные ряды

$$x_{\rm sr}(t) = \sum_{k=0}^{N} a_k \varphi_k(t), \quad N \to \infty.$$
(1.2)

В таком случае наибольшее отклонение значений модели от соответствующих значений сигналов определяется как

$$\Delta_{x\max} = \sup |x(t) - x_M(t,\vec{\alpha})| = \sup \left| \sum_{k=0}^{\infty} a_k \varphi_k(t) - x_M(t,\vec{\alpha}) \right|.$$
(1.3)

Для оценки несоответствия модели и РеС можно использовать среднеквадратическую погрешность

$$\sigma^{2} = \frac{1}{b-a} \int_{a}^{b} [x(t) - x_{M}(t,\vec{\alpha})]^{2} dt = \frac{1}{b-a} \int_{a}^{b} \left[ \sum_{k=0}^{\infty} a_{k} \varphi_{k}(t) - x_{M}(t,\vec{\alpha}) \right]^{2} dt .$$
(1.4)

Метрологическая аттестация результатов по суммарной погрешности аппроксимации сигнала моделью в практических задачах применяется достаточно редко [70]. Чаще всего конечной целью проводимых измерений и обработки являются числовые, как правило, интегральных характеристик сигналов. В данном случае задача заключается в анализе влияния отдельных факторов на погрешность нахождения характеристики. В случае детерминированной задачи в качестве таких влияющих факторов служат несоответствие модели виду сигнала и нестабильность параметров сигнала. Закон трансформации составляющих погрешности в результирующую зависит от алгоритма преобразования полученных результатов отдельных измерений в искомую оценку, из-за чего задача становится специфичной для каждой области применения.

В общем случае для проведения оценки влияния составляющих погрешности, которые обусловлены несоответствием модели и вида сигнала, на погрешность результата измерения какой-либо интегральной характеристики сигнала  $Y = F[x_M(t, \vec{a})]$ , определяемой в соответствии с (1.1), можно применить следующие методы [37].

1. С использованием расчетного значения интегральной характеристики PeC и определения относительной погрешности (ОтнП)

$$\delta = \frac{Y - Y_p}{Y_p},\tag{1.5}$$

где  $Y_p$  - расчетное значение интегральной характеристики, определенное для PeC.

Данный метод можно применять для прогнозирования погрешности и определения области применения методов определения интегральных характеристик, основываясь на требования точности при известных спектрах PeC.

2. С помощью вычисления погрешности измерения интегральной характеристики как функции, у которой аргументы заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от PeC.

Известно, что погрешность вычисления значения той или иной функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена при помощи дифференциала этой функции. Погрешность функции это приращение функции, которое она получит, в случае если ее аргументам дать приращения, которые равны их погрешностям. Так как чаще всего погрешности бывают достаточно малы, то возможна замена приращений дифференциалами. Если известны только предельные абсолютные погрешности (АбсП) аргументов, то при вычислении дифференциалов необходимо для всех производных брать их абсолютные значения [71]. В зависимости от того как производится оценка отклонения модели от PeC, возможны три подхода к определению погрешности [37].

Если считать, что предельные АбсП аргументов соответствуют наибольшему отклонению, определяемому согласно (1.3), то для интегральной характеристики  $Y = F[x(t_1), x(t_2), ..., x(t_m)]$ 

$$\Delta Y = \left[ \left| (Y)'_{x(t_1)} \right| + \left| (Y)'_{x(t_2)} \right| + \dots + \left| (Y)'_{x(t_m)} \right| \right] \Delta x_{\max} .$$
 (1.6)

Если считать, что предельное значение АбсП аргументов определяется через среднеквадратическую погрешность  $\sigma$  в соответствии с (1.4), то

$$\Delta Y = \left[ \left| (Y)'_{x(t_1)} \right| + \left| (Y)'_{x(t_2)} \right| + \dots + \left| (Y)'_{x(t_m)} \right| \right] \sigma.$$
(1.7)

Если АбсП аргументов соответствуют действительным разностям между МгЗ реального сигнала и модели в точках  $t_1, t_2, ..., t_m$ :  $\Delta x(t_1) = x(t_1) - x_M(t_1, \vec{a}); ... \Delta x(t_m) = x(t_m) - x_M(t_m, \vec{a})$ , то

$$\Delta Y = \Delta x(t_1)(Y)'_{x(t_1)} + \Delta x(t_2)(Y)'_{x(t_2)} + \dots \Delta x(t_m)(Y)'_{x(t_m)}.$$
(1.8)

При использовании данного метода ОтнП равна

$$\delta = \frac{\Delta Y}{Y_p}.\tag{1.9}$$

3 Третий предусматривает экспериментальное метод определение погрешности. Для этого производится измерение интегральной характеристики  $Y = F[x(t, \vec{\alpha})]$ образцовым средством измерения метрологическими С характеристиками, обеспечивающими возможность его использования в условиях РеС, и сравнение с результатом измерения У прибором, использующим аппроксимационный метод.

Практическое применение предложенной методологии характеристики влияния погрешности и ее составляющих, вследствие несоответствия модели и вида PeC, на полученный результат будет рассмотрено ниже.

Все эти особенности применения аппроксимационного подхода к нахождению параметров квазидетерминированных сигналов, а так же метрологическому анализу полученных результатов дают возможность сделать более общими принципы, методы и средства нахождения информативных параметров сигналов. В их основе лежит определение этих параметров с помощью функциональной связи и параметров модели, которая выбирается исходя из данных об исследуемом объекте, и метрологическом анализе полученных результатов из-за различия между моделью и PeC.

#### 1.3 Основные результаты и выводы

1. Проведенный анализ показал, что сигналы в силовых цепях различных электромеханических систем близки моделям гармонических сигналов.

2. Установлено, что информативными параметрами, характеризующими состояние электрической сети и используемыми для контроля режимов работы силового электрооборудования являются сигналы напряжения и тока.

3. Рассмотренные в работе исследования показывают, что для определения интегральных параметров периодических сигналов может быть успешно адаптирован аппроксимационный подход, который заключается в определении информативных параметров по отдельным мгновенным значениям сигналов, не связанным с периодом сигнала, в предположении их соответствия известным моделям с последующей оценкой погрешностей, обусловленных отклонением принятых моделей от реальных сигналов.

# **2** МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Во второй главе рассматриваются основные параметры периодических сигналов. Анализируется возможность использования аппроксимационного подхода к измерению ИХПС, форма которых близка к гармонической. Приводится классификация методов и средств измерения ИХПС по МгЗ напряжения и тока, основанных на формировании ортогональных составляющих (ОртС) сигналов. Проводится метрологический анализ методов и средств измерения.

#### 2.1 Основные параметры периодических сигналов

Рассмотренные в первой главе электрические параметры силового электрооборудования, необходимые для контроля и анализа режимов их работы, показывают, что основными являются следующие ИХПС: среднеквадратическое значение (СКЗ) напряжения и тока, активная мощности (АкМ) и реактивная мощности (PeM).

Математическая модель сложного периодического сигнала характеризуется условием x(t) = x(t + lT), где l=1, 2, 3, ...; T – период сигнала.

В общем виде периодические сигналы напряжения и тока можно представить следующими выражениями:

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk}); \qquad (2.1)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ik}), \qquad (2.2)$$

где  $U_{km}$ ,  $I_{km}$  - амплитудные значения *k*-тых гармонических составляющих напряжения и тока;  $\omega$  – угловая частота;  $\psi_{uk}$ ,  $\psi_{ik}$  - начальные фазы гармоник напряжения и тока *k*-того порядка.

Основными информативными параметрами периодических сигналов напряжения и тока являются ИХПС, к которым относятся [4]: - СКЗ сигналов напряжения и тока

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} u^{2}(t) dt} ; \qquad (2.3)$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^{2}(t) dt}; \qquad (2.4)$$

- Активная мощность

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} P_k; \qquad (2.5)$$

- Реактивная мощность

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k.$$
 (2.6)

где u(t), i(t) – мгновенные значения сигналов напряжения и тока,  $U_k$ ,  $I_k$  - СКЗ напряжения и тока k-той гармоники;  $\varphi_k$  - угол сдвига фаз между k-тыми гармониками напряжения и тока.

Для оценки формы кривой сигнала обычно используют следующие коэффициенты [4]:

- коэффициент искажения синусоидальности напряжения

$$k_{c} = \frac{U_{\Gamma}}{U_{CK3}}, \qquad (2.7)$$

где  $U_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}$  - СКЗ высших гармоник;

- коэффициенты *k*-той гармонической составляющей напряжения и тока, равные:

$$h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}; h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}},$$

где  $U_{1m}$ ,  $I_{1m}$  - амплитудные значения первых гармоник напряжения и тока.

## 2.2 Анализ аппроксимационных методов измерения интегральных характеристик гармонических сигналов

Одним из основных элементарных периодических сигналов является синусоидальный (гармонический) сигнал, описываемый моделью вида

 $x(t) = A\sin(\omega t + \alpha) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \alpha\right)$  и имеющий три параметра: амплитуду A, ча-

стоту  $\omega$  (или период *T*) и начальную фазу  $\alpha$ .

Проведенный в первой главе анализ гармонического состава сигналов показал, что в сетях с номинальным напряжением 220 В и выше модель сигналов близка к гармонической и коэффициенты гармонических составляющих не превышают 0,2% и 0,4% соответственно для сигналов напряжения и тока.

Рассмотрим методы и системы определения ИХГС по их МгЗ, обеспечивающие время измерения менее периода сигнала.

Значительно упрощает процедуру и сокращает время измерения определение ИХГС по отдельным МгЗ.

Для МГС, имеющего три параметра: амплитуду A, частоту (период)  $\omega$  (T) и начальную фазу  $\alpha$ , в соответствии с (1.1) можно составить систему трех уравнений [32]:

$$\begin{cases}
A \sin(\omega t_1 + \alpha) = x(t_1); \\
A \sin(\omega t_2 + \alpha) = x(t_2); \\
A \sin(\omega t_3 + \alpha) = x(t_3),
\end{cases}$$
(2.8)

решение которой позволяет определить искомые параметры сигнала.

Если отсчеты  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  равномерно распределены по периоду T, то приходим к известному решению, вытекающему из теоремы Котельникова [73]. Однако равномерное распределение отсчетов по периоду предполагает известным значение самого периода T, при этом время измерения приблизительно равно ему.

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения интегральных характеристик по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов, не связанным с периодом BxC. Это предполагает два основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве [74].

В основу классификации измерения ИХГС положено пространственное разделение мгновенных значений сигналов.

Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных ортогональных составляющих сигналов и использовании их МгЗ.

Классификация данных методов представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Классификация методов

Предлагается классификация методов измерения ИХГС, в которой в качестве классификационных признаков используются: вид дополнительных сигналов (ДопС) (формирование ортогональных составляющих сигналов или сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол); количество

формируемых ДопС (один, два и более); связь с характерными точками сигналов (переходы через ноль) и их количество; применение образцовых интервалов времени (ИнтВ).

Исключая противоположные операции (формирование одного или двух дополнительных сигналов; связь или отсутствие связи с характерными точками сигналов; использование или не использование образцовых ИнтВ), можно условно выделить шесть групп, характеризующие принципы синтеза методов.

Первую группу составляют методы, основанные на формировании одного ДопС, не использующие характерные точки сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ортогональных составляющих сигналов: *I-AC-E*; *I-AC-G* (формирование только дополнительного сигнала напряжения); *I-BC-E*; *I-BC-G* (формирование только дополнительного сигнала тока); *I-AC-BC-E*; *I-AC-BC-G* (формирование дополнительных сигналов как напряжения, так и тока).

При использовании ДопС, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-E*; *II-AC-G* (формирование только ДопС напряжения); *II-BC-E*; *II-BC-G* (формирование только ДопС тока); *II-AC-BC-E*; *II-AC-BC-G* (формирование ДопС как напряжения, так и тока).

Ко второй группе отнесены методы, основанные на формировании одного ДопС, связанные с характерными точками одного из сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ОртС: *I-AC-EH*; *I-AC-GH* (формирование только ДопС напряжения); *I-BC-EH*; *I-BC-GH* (формирование только ДопС тока); *I-AC-BC-EH*; *I-AC-BC-GH* (формирование ДопС как напряжения, так и тока).

При использовании ДопС, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-EH*; *II-AC-GH* (формирование только ДопС напряжения); *II-BC-EH*; *II-BC-GH* (формирование только ДопС тока); *II-AC-BC-EH*; *II-AC-BC-GH* (формирование ДопС как напряжения, так и тока).

Третью группу составляют методы, основанные на формировании одного ДопС, связанные с характерными точками двух и более сигналов.

Для этой группы можно синтезировать следующие методы.

При использовании ОртС: *I-AC-EJ*; *I-AC-GJ* (формирование только ДопС напряжения); *I-BC-EJ*; *I-BC-GJ* (формирование только ДопС тока); *I-AC-BC-EJ*; *I-AC-BC-EJ*; *I-AC-BC-GJ* (формирование ДопС как напряжения, так и тока).

При использовании дополнительных сигналов, сдвинутых на произвольный угол: *II-AC-EJ*; *II-AC-GJ* (формирование только ДопС напряжения); *II-BC-EJ*; *II-BC-EJ*; *II-BC-GJ* (формирование только ДопС тока); *II-AC-BC-EJ*; *II-AC-BC-GJ* (формирование ДопС как напряжения, так и тока).

К четвертой группе отнесены методы, основанные на формировании двух ДопС напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, не использующие характерные точки сигналов.

С учетом того, что формирование двух дополнительных ортогональных составляющих одного сигнала не возможно, то для этой группы могут быть синтезированы только методы, использующие дополнительные сигналы, сдвинутые на отличный от 90° угол: *II-AD-E*; *II-AD-G* (формирование двух ДопС напряжения); *II-BD-E*; *II-BD-G* (формирование двух ДопС тока); *II-AD-BC-E*; *II-AD-BC-G* (формирование двух ДопС напряжения и одного ДопС тока); *II-AC-BD-E*; *II-AC-BD-G* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух ДопС тока); *II-AD-BD-E*; *II-AD-BD-G* (формирование по два дополнительных сигнала напряжения и тока).

Пятую группу составляют методы, основанные на формировании двух ДопС напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, связанные с характерными точками одного из сигналов.

Поскольку здесь также не могут быть использованы ОртС, то возможно синтезировать следующие методы: *II-AD-EH*; *II-AD-GH* (формирование двух ДопС напряжения); *II-BD-EH*; *II-BD-GH* (формирование двух ДопС тока); *II-AD-BC-GH* (формирование двух ДопС напряжения и одного ДопС тока); *II-AC-BD-EH*; *II-AC-BD-GH* (формирование одного ДопС напряжения и двух ДопС тока); *II-AD-BD-GH* (формирование одного ДопС напряжения и двух ДопС тока); *II-AD-BD-EH*; *II-AD-BD-GH* (формирование одного ДопС напряжения и двух ДопС тока); *II-AD-BD-EH*; *II-AD-BD-GH* (формирование по два дополнительных сигнала напряжения и тока).

К шестой группе относятся методы, основанные на формировании двух ДопС напряжения, либо тока, либо как напряжения, так и тока, связанные с характерными точками двух и более сигналов.

Если не использовать ОртС сигналов, то для этой группы могут быть синтезированы следующие методы: *II-AD-EJ*; *II-AD-GJ* (формирование двух ДопС напряжения); *II-BD-EJ*; *II-BD-GJ* (формирование двух ДопС тока); *II-AD-BC-EJ*; *II-AD-BC-GJ* (формирование двух ДопС напряжения и одного ДопС тока); *II-AC-BD-EJ*; *II-AC-BD-GJ* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного.); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного сигнала напряжения и двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование одного дополнительного.); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование двух дополнительных сигналов тока); *II-AD-BD-EJ*; *II-AD-BD-GJ* (формирование двух сигналов напряжения и тока).

Таким образом, если не вводить структурную избыточность, то представленная классификация позволяет в общем случае синтезировать 66 методов [75].

#### 2.2.1 Метод определения интегральных характеристик

## гармонических сигналов по трем мгновенным значениям напряжения и тока, сдвинутых в пространстве и связанных с переходами через ноль

Метод измерения ИХГС, который заключается в определении параметров по трем мгновенным значениям напряжения и тока. В момент перехода сигнала напряжения через ноль измеряют первое и, сдвинутое относительно него на угол  $\Delta \alpha$ , второе мгновенное значение тока, а также первое мгновенное значение напряжения, сдвинутое относительно перехода напряжения через ноль также на угол  $\Delta \alpha$ ; в момент перехода сигнала тока через ноль измеряют второе и, сдвинутое относительно него на угол  $\Delta \alpha$ , третье Mr3H, а также третье Mr3T, сдвинутое относительно перехода тока через ноль также на угол  $\Delta \alpha$ . ИХГС определяются по полученным мгновенным значениям сигналов.

Графики процессов (ГП), поясняющие метод, представлены на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.1

Данный метод осуществляет пространственное разделение МгЗ сигналов. В результате этого значительно сокращается время измерения.

Входные напряжение и ток соответствуют следующим выражениям:  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ ,  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , а ДопС напряжения и тока принимает вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta \alpha)$ ,

где  $U_m$ ,  $I_m$  - амплитудные значения напряжения и тока; φ - угол сдвига фаз между напряжением и током; ω - угловая частота входного сигнала [76].

Мгновенные значения в моменты времени (MB)  $t_1$  и  $t_2$  будут соответственно равны:  $I_{11} = I_m \sin(-\varphi); \quad I_{21} = I_m \sin(-\varphi + \Delta \alpha); \quad U_{21} = U_m \sin \Delta \alpha; \quad U_{12} = U_m \sin \varphi;$  $U_{22} = U_m \sin(\varphi + \Delta \alpha); \quad I_{22} = I_m \sin \Delta \alpha.$ 

Используя МгЗ сигналов, можно определить ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока

$$U_{CK3} = \left| \frac{\sqrt{2}U_{21}U_{12}U_{22}}{\sqrt{4}U_{21}^2U_{22}^2 - \left(U_{22}^2 - U_{12}^2 + U_{21}^2\right)^2} \right|;$$
(2.9)

$$I_{CK3} = \left| \frac{\sqrt{2}I_{11}I_{21}I_{22}}{\sqrt{4}I_{21}^2I_{22}^2 - \left(I_{21}^2 - I_{11}^2 + I_{22}^2\right)^2} \right|;$$
(2.10)

- активная и реактивная мощности

$$P = -\frac{I_{11}U_{21}U_{12}U_{22}\left(U_{22}^2 - U_{12}^2 + U_{21}^2\right)}{4U_{21}^2U_{22}^2 - \left(U_{22}^2 - U_{12}^2 + U_{21}^2\right)^2};$$
(2.11)

$$Q = -\frac{I_{11}U_{21}U_{12}U_{22}}{\sqrt{4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{22}^2 - U_{12}^2 + U_{21}^2)^2}}.$$
 (2.12)

Схема ИИС, реализующей метод, представлена на рисунке 2.3 [77].



Рисунок 2.3 - ИИС, реализующая метод по п.2.2.1

В состав ИИС входят характерные для всех систем определения ИХГС, использующие формирование дополнительных сигналов, блоки [78]: первичные преобразователи (ПП) напряжения и тока ППН и ППТ; аналого-цифровые преобразователи (АЦП) АЦП1, АЦП2, АЦП3 и АЦП4; фазосдвигающие блоки (ФБ) ФБ1 и ФБ2; нуль-органы (Н-О) Н-О1 и Н-О2; контроллер КНТ; шины управления ШУ и данных ШД.

При реализации методов, в которых используются мгновенные значения сигналов, неизбежно возникает погрешность квантования. Для анализа влияния квантования на погрешность результатов определения ИИС может быть использована известная методика [79].

Если считать, что при амплитудных значениях напряжения  $U_m$  и тока  $I_m$ МгЗН, пропорциональные  $U_{21}$ ,  $U_{12}$ ,  $U_{22}$  измеряются с погрешностью преобразования АЦП1 и АЦП2, а МгЗН, пропорциональные  $I_{11}$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ измеряются с погрешностью преобразования АЦП3 и АЦП4 и предельные АбсП измерений соответствуют  $\Delta U_{21} = \Delta U_{12} = \Delta U_{22} = \Delta U = U_m/2^n$  и  $\Delta I_{11} = \Delta I_{21} = \Delta I_{22} = \Delta I = I_m/2^n$  (где n – разрядность АЦП), то предельные АбсП вычисления СКЗ напряжения и тока АкМ и РеМ в соответствии с (2.9) - (2.12) с учетом погрешности квантования АЦП преобразуются к виду [80]:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U; \qquad (2.13)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I; \qquad (2.14)$$

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| \Delta I + \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| \right] \Delta U; \qquad (2.15)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| \Delta I + \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| \right] \Delta U.$$
(2.16)

Используя выражения (2.9) – (2.16) можно определить ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности (ПрП) определения АкМ  $\gamma_P$  и PeM  $\gamma_Q$ :

- Относительные погрешности измерения СКЗ напряжения  $\delta_{U_{CK3}}$  и тока  $\delta_{I_{CK3}}$ 

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{1}{2^{n} |\sin \varphi \sin \omega \Delta t \sin(\omega \Delta t + \varphi)|} \left\{ \operatorname{ctg} \varphi [\sin(\omega \Delta t + \varphi) \cos \varphi - \sin \omega \Delta t] + \right. \\ \left. + \left. \left. \left. + \left| \sin(\omega \Delta t + \varphi) \sin \omega \Delta t - \cos \varphi \right| + \left| \operatorname{ctg} \varphi [\sin \omega \Delta t \cos \varphi - \sin(\omega \Delta t + \varphi)] \right| \right\}; \right.$$
(2.17)  
$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{1}{2^{n} |\sin \varphi \sin \omega \Delta t \sin(\omega \Delta t + \varphi)|} \left\{ \operatorname{ctg} \varphi [\sin(\omega \Delta t + \varphi) \cos \varphi - \sin \omega \Delta t] + \right. \\ \left. + \left. \left. + \left| \sin(\omega \Delta t + \varphi) \sin \omega \Delta t - \cos \varphi \right| + \left| \operatorname{ctg} \varphi [\sin \omega \Delta t \cos \varphi - \sin(\omega \Delta t + \varphi)] \right\}; \right.$$
(2.18)

- Предельные погрешности определения активной и реактивной мощностей

$$\gamma_{P} = \frac{1}{2^{n}} \left[ \left| \operatorname{ctg}\phi \right| + \frac{\left| \operatorname{ctg}(\omega\Delta t + \phi)(1 + \cos^{2}\phi) \right|}{\left| \sin\omega\Delta t \sin\phi \right|} + \frac{\left| 1 + 4\cos\omega\Delta t \cos\phi\cos(\omega\Delta t + \phi) \right|}{4\left| \sin\omega\Delta t \sin\phi\sin(\omega\Delta t + \phi) \right|} + \frac{\left| \sin^{2}(\omega\Delta t + \phi)(3 + \cos^{2}\phi) + \sin^{2}\omega\Delta t \left( \sin^{2}\phi - 4\cos^{2}\phi \right) - \sin2\phi\cos2\phi - \sin^{4}\phi \right|}{2U_{1m} \left| \sin\omega\Delta t \sin^{2}\phi\sin^{2}(\omega\Delta t + \phi) \right|} \right]; \quad (2.19)$$

$$\gamma_{Q} = \frac{1}{2^{n}} \left[ 1 + \frac{\left| \operatorname{ctg}\phi \left[ \sin(\omega\Delta t + \phi)\cos\phi - \sin\omega\Delta t \right] + \left| \sin\omega\Delta t \sin(\omega\Delta t + \phi) - \cos\phi \right|}{\left| \sin(\omega\Delta t + \phi)\sin\phi \right|} + \frac{\left| \sin\omega\Delta t \sin(\omega\Delta t + \phi) - \cos\phi \right|}{\left| \sin\omega\Delta t \sin(\omega\Delta t + \phi) \right|} + \frac{\left| \operatorname{ctg}\phi \left[ \sin\omega\Delta t \cos\phi - \sin(\omega\Delta t + \phi) \right] \right]}{\left| \sin\omega\Delta t \sin(\omega\Delta t + \phi) \right|} \right]$$

$$+\frac{\left|\operatorname{ctg}\varphi[\sin\omega\Delta t\cos\varphi - \sin(\omega\Delta t + \varphi)]\right|}{\left|\sin(\omega\Delta t + \varphi)\sin\omega\Delta t\right|}\right].$$
(2.20)

На рисунке 2.4 приведены графики зависимости ОтнП  $\delta_{U_{CK3}}$  и  $\delta_{I_{CK3}}$  от угла сдвига фаз  $\varphi$  при различных интервалах  $\omega \Delta t$  для 12-разрядного АЦП в соответствии с (2.17) и (2.18).



 $\delta_{I_{CK3}}$  от  $\phi$  и  $\omega \Delta t$ 

На рисунках 2.5 и 2.6 приведены графики зависимости ПрП  $\gamma_P$  и  $\gamma_Q$  от угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$  при различных образцовых интервалах  $\omega\Delta t$  для 12-разрядного АЦП в соответствии с (2.19).



Рисунок 2.5 - Зависимость погрешности  $\gamma_P$  от  $\phi$  и  $\omega \Delta t$ 

Рисунок 2.6 - Зависимость погрешности  $\gamma_{O}$  от  $\phi$  и  $\omega \Delta t$ 

Анализ выражений (2.17) - (2.20) и рисунков 2.5 и 2.6 показывает, что определение ИХГС согласно данному методу производится с погрешностью, величина которой зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током и от образцовых интервалов  $\omega \Delta t$ . Степень влияния погрешности квантования АЦП на погрешность результата определения интегральных характеристик уменьшается при увеличении  $\omega \Delta t$ .

Установлено, что погрешности измерения СКЗ сигналов и РеМ принимают минимальные значения при  $\omega \Delta t = 90^{\circ}$  и при данном значении интервала практически не зависят от угла сдвига фазы между напряжением и током.

2.2.2 Метод, основанный на определении интегральных характеристик по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, вторые мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно первых на угол 90° в сторону опережения

В данном методе время определения параметров сигналов не зависит от момента начала измерения и угла сдвига фаз между напряжением и током, а опреде-

ляется только временем аналого-цифрового преобразования МгЗ сигналов в код и выполнением вычислительных процедур в соответствии с алгоритмом измерения.

Однако реализация метода предусматривает использование ОртС напряжения и тока, что может привести к погрешности, обусловленной не идеальностью ФБ, осуществляющих формирование дополнительных сигналов.

ГП, поясняющие метод, приведены на рисунке. 2.7.



Рисунок 2.7 – Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.2

Входные и дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид:  $u_1(t) = U_m \sin\omega t$ ;  $u_2(t) = U_m \cos\omega t$ ;  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ ;  $i_2(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$ , где  $U_m$ ,  $I_m$  - амплитудные значения напряжения и тока;  $\omega$  - угловая частота BxC;  $\varphi$ - угол сдвига фаз между входными напряжением и током.

Мгновенные значения сигналов в MB  $t_1$  будут равны:  $U_1 = U_m \sin \alpha_1$ ;

$$U_{2} = U_{m} \sin\left(\alpha_{1} + \frac{\pi}{2}\right) = U_{m} \cos\alpha_{1}; \ I_{1} = I_{m} \sin\alpha_{2}; \ I_{2} = I_{m} \sin\left(\alpha_{2} + \frac{\pi}{2}\right) = I_{m} \cos\alpha_{2},$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ , - начальные фазы сигналов  $u_1(t)$  и  $i_1(t)$  в MB  $t_1$ .

Используя МгЗ сигналов можно найти выражения для определения ИХГС: - СКЗ напряжения и тока

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2}}; \qquad (2.21)$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}}; \qquad (2.22)$$

- Активная и реактивная мощности

$$P = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2}; \tag{2.23}$$

$$Q = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{2}.$$
 (2.24)

Схема ИИС, реализующая метод, представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Структура ИИС, реализующая метод по п. 2.2.2

Одним из существенных недостатков ИИС, реализующих данный метод и использующих мгновенные значения как входных, так и ДопС, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФБ.

В случае если амплитудное значение напряжения на выходе ФБ1 отличается от амплитуды BxC на величину  $\Delta U_{\rm M}$ , а амплитуда тока на выходе ФБ2 отличается от амплитуды входного тока на величину  $\Delta I_{\rm M}$ , то мгновенные значения дополнительных сигналов примут вид:  $U_2 = (U_m + \Delta U_{\rm M})\cos\alpha_1$  и  $I_2 = (I_m + \Delta I_{\rm M})\cos\alpha_2$ [81].

Для оценки точности измерения ИХГС используется методика определения результирующей погрешности как погрешности вычисления значения функции,
аргументы которой заданы приближенно, с погрешностями, соответствующими амплитудных значений сигнала на входе и выходе ФБ [32].

Если считать, что МгЗ входного напряжения измерены без погрешности, то можно определить предельные значения абсолютных погрешностей измерения СКЗ напряжения и тока, активной и реактивной мощностей:

$$\Delta U_{\rm CK3M} = \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_2} \right| \Delta U_{\rm M}; \qquad (2.25)$$

$$\Delta I_{\rm CK3M} = \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \Delta I_{\rm M}; \qquad (2.26)$$

$$\Delta P_{\rm M} = \left| \frac{\partial P}{\partial U_2} \right| \Delta U_{\rm M} + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \Delta I_{\rm M}; \qquad (2.27)$$

$$\Delta Q_{\rm M} = \left| \frac{\partial Q}{\partial U_2} \right| \Delta U_{\rm M} + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \Delta I_{\rm M} \,. \tag{2.28}$$

Используя (2.21) – (2.24) и (2.25) - (2.28), можно определить ОтнП при измерении СКЗ сигналов и приведенные погрешности при измерении АкМ и РеМ:

$$\delta_{U_{\text{CK3M}}} = h_U |\cos \alpha_1|; \qquad (2.29)$$

$$\delta_{I_{\text{CK3M}}} = h_I |\cos \alpha_2|; \qquad (2.30)$$

$$\gamma_{PM} = \gamma_{QM} = h_U |\cos \alpha_2| + h_I |\cos \alpha_1|, \qquad (2.31)$$

где  $h_U = \Delta U_M / U_m$ ;  $h_I = \Delta I_M / I_m$ .

Из (2.29) и (2.30) следует, что погрешность определения СКЗ сигналов зависит только от погрешности по модулю ФБ и начальной фазы сигнала α<sub>1</sub> (α<sub>2</sub>).

На рисунке 2.9 приведен график зависимости ОтнП определения СКЗ сигнала от  $\alpha_1$  ( $\alpha_2$ ) при  $h_U = h_I = 0,1\%$  в соответствии с (2.29) и (2.30).

Погрешности определения AкM и PeM зависят не только от погрешности по модулю ФБ и α<sub>1</sub>, но и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ.



На рисунке 2.10 представлены графики зависимости приведенной погрешности определения AкM (PeM) от начальной фазы сигнала  $\alpha_1$  и  $\varphi$  при  $h_U = h_I = 0,1\%$ согласно (2.31).



Рисунок 2.10 - Зависимость погрешности  $\gamma_{PM}$  от  $\alpha_1$  и  $\phi$  при

 $h_U = h_I = 0,1\%$ 

Анализ рисунка 2.10 показывает существенную зависимость погрешностей определения AкM и PeM как от α<sub>1</sub>, так и от φ.

В рассматриваемом методе определения ИХГС используется измерение МгЗ сигналов с последующей обработкой пропорциональных им цифровых кодов. Использование в цифровых методах и средствах измерения квантования по уровню неизбежно приводит к погрешности квантования. Погрешность обусловлена

округлением значения непрерывной неизвестной измеряемой величины до какого-либо значения известной дискретной величины.

Для оценки влияния квантования на погрешность определения ИХГС может быть использована предложенная методика, при условии, что предельные АбсП аргументов соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений сигналов [32].

Если пренебречь погрешностью от нелинейности, то можно считать, что основной погрешностью АЦП является абсолютная погрешность квантования в канале напряжения  $\Delta U = \frac{U_{np}}{2^n}$  и тока  $\Delta I = \frac{I_{np}}{2^n}$ , где  $U_{np}$ ,  $I_{np}$  - максимально допустимые напряжения и ток на входе АЦП; *n*-число двоичных разрядов.

В этом случае абсолютная погрешность ИХГС в соответствии с (2.25) - (2.28) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left\| (U_{CK3})'_{U_1} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_2} \right| \Delta U;$$
(2.32)

$$\Delta I_{CK3} = \left\| (I_{CK3})'_{I_1} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_2} \right| \Delta I;$$
(2.33)

$$\Delta P = \left\| (P)'_{I_1} \right| + \left| (P)'_{I_2} \right| \Delta I + \left\| (P)'_{U_1} \right| + \left| (P)'_{U_2} \right| \Delta U;$$
(2.34)

$$\Delta Q = \left\| (Q)'_{I_1} \right| + \left| (Q)'_{I_2} \right| \Delta I + \left\| (Q)'_{U_1} \right| + \left| (Q)'_{U_2} \right| \Delta U.$$
(2.35)

Используя (2.25) – (2.28) с учетом абсолютных погрешностей квантования АЦП (2.32) – (2.35), можно определить предельные относительные погрешности вычисления СКЗ сигналов и приведенные погрешности измерения АкМ и РеМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{1}{2^n} (|\sin \alpha_1| + |\cos \alpha_1|); \qquad (2.36)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{1}{2^{n}} (|\sin \alpha_{2}| + |\cos \alpha_{2}|); \qquad (2.37)$$

$$\gamma_P = \gamma_Q = \frac{1}{2^n} (|\sin \alpha_1| + |\cos \alpha_1| + |\sin \alpha_2| + |\cos \alpha_2|)$$
(2.38)

Из (2.36) и (2.37) следует, что ОтнП вычисления СКЗ сигналов зависит только от разрядности АЦП и начальной фазы сигнала.

На рисунке 2.11 приведен график зависимости погрешности δ значения СКЗ от начальной фазы сигнала *α*<sub>1</sub> при 12-разрядных АЦП в соответствии с выражени-

ями (2.36) и (2.37).



Рисунок 2.11 - Зависимость погрешности  $\delta$  значения СКЗ от угла  $\alpha_1$  при n = 12

В общем случае ПрП вычисления активной и реактивной мощностей зависит от разрядности АЦП, начальной фазы сигнала и угла сдвига фаз между напряжением и током.

На рисунке 2.12 приведен график зависимости приведенной погрешности измерения АкМ  $\gamma P$  от начальной фазы сигнала напряжения  $\alpha_1$  и угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$  в соответствии с выражениями (2.38) при 12-разрядном АЦП.



Рисунок 2.12 - Зависимость погрешности  $\gamma P$  от  $\alpha l$  и  $\phi$  при n = 12

Данный метод обеспечивает возможность начала измерения в произвольный MB. Кроме того, время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением, током и периода BxC, а ограничено только временем аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов, ввода, пропорциональных им кодов в КНТ и выполнения вычислительных операций.

Полученные результаты позволяют оценивать погрешность измерения при известных допустимых значениях погрешностей ФБ и разрядности АЦП.

### 2.2.3 Метод измерения интегральных характеристик с использованием сравнения входного и сдвинутого относительно него на произвольный угол Δα дополнительного напряжения

Метод заключается в том, что в момент равенства входного и дополнительного напряжений одновременно измеряют МгЗ входного напряжения и тока; через произвольный интервал времени  $\Delta t$  измеряют мгновенные значения входного и дополнительных сигналов напряжения и тока [82].

ГП, поясняющие метод, приведены на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13. - Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.3

41

Если сигналы имеют МГС, то выражения для входного и дополнительного напряжения и ток будут иметь вид:  $u_1(t) = U_m \sin(\omega t) = U_m \sin(\omega t + \Delta \alpha);$  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi).$ 

В момент времени  $t_1$ , когда основное и дополнительное напряжения будут равны, выражения для МгЗ сигналов примут вид:  $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$ ;  $U_{21} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta \alpha)$ ;  $I_{11} = I_m \sin(\alpha_1 + \phi)$ ,

где  $U_m$ ,  $I_m$  - амплитудные значения напряжения и тока;  $\alpha_1$  - фаза сигнала напряжения в MB  $t_1$ ;  $\omega$  - угловая частота сигнала;  $\phi$  - угол сдвига фаз между напряжением и током.

Равенство мгновенных значений сигналов  $U_{11} = U_{21}$  возможно в случае, если  $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2}$ . Таким образом, получаем  $U_{11} = U_{21} = U_m \cos \frac{\Delta \alpha}{2}$ , а  $I_{11} = I_m \sin \left( \varphi + \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) = I_m \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right)$ .

Через интервал времени  $\Delta t$  мгновенные значения сигналов будут равны:  $U_{12} = U_m \cos\left(\omega\Delta t - \frac{\Delta\alpha}{2}\right); U_{22} = U_m \cos\left(\omega\Delta t + \frac{\Delta\alpha}{2}\right); I_{12} = I_m \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} + \omega\Delta t\right).$ 

Используя полученные выражения, можно определить основные ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока определяются выражениями

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{2U_{21}^2 \left(U_{21}^2 - U_{12}U_{22}\right)}{4U_{21}^2 - \left(U_{22} + U_{12}\right)^2}};$$
(2.39)

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{I_{11}^2}{2} + \frac{\left[I_{11}\left(U_{22} + U_{12}\right) - 2U_{21}I_{12}\right]^2}{2\left[4U_{21}^2 - \left(U_{22} + U_{12}\right)^2\right]^2}};$$
(2.40)

- Активная и реактивная мощности

$$P = \frac{U_{21} \left\{ U_{21} I_{12} \left( U_{12} - U_{22} \right) - I_{11} \left[ U_{12} \left( U_{12} + U_{22} \right) - 2U_{21}^2 \right] \right\}}{4U_{21}^2 - \left( U_{22} + U_{12} \right)^2};$$
(2.41)

$$Q = \frac{U_{21}(U_{12}I_{11} - U_{21}I_{12})}{\sqrt{4U_{21}^2 - (U_{22} + U_{12})^2}}.$$
(2.42)

Схема ИИС, реализующей такой метод, представлена на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 - Структурная схема ИИС, реализующая метод по п. 2.2.3

В схеме ИИС на рисунке 2.14 использован компаратор (КОМП).

Произведем оценку погрешности определения интегральных характеристик из-за несоответствия модели виду реального сигнала, используя ранее рассмотренную методику [83].

Пусть предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению модели от PeC. В этом случае предельные значения АбсП определения ИХГС в соответствии с (2.39) – (2.42) определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \qquad (2.43)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max} + \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\max}; \quad (2.44)$$

$$\Delta P = \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max} + \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\max}; \quad (2.45)$$

$$\Delta Q = \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max} + \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\max}.$$
(2.46)

Для анализа погрешности из-за отклонения PeC от гармонической модели сигнала можно воспользоваться методикой, предложенной в [32]. Тогда в

соответствии с (2.39) - (2.42) относительные погрешности определения СКЗ сигналов и приведенные значения измерения АкМ и РеМ будут равны:

- СКЗ напряжения и тока

$$\delta_{U_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ 2\cos^2 \frac{\Delta \alpha}{2} + \left| \cos^2 \frac{\Delta \alpha}{2} - \cos^2 \omega \Delta t \right| + \left| \cos \omega \Delta t - \cos \left( \omega \Delta t - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| \right]}{2\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sin^2 \omega \Delta t \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}; (2.47)$$

$$\delta_{I_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} + \omega \Delta t \right) \right| + \left| \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ \left| \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} + \omega \Delta t \right) \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| + \left| \cos \omega \Delta t + 1 \right| \right]}{2\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sin^2 \omega \Delta t \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}; (2.48)$$

- активной и реактивной мощности

$$\begin{split} \gamma_{P} &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \sin\left(\omega\Delta t + \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right| + \left| \sin\frac{\Delta\alpha}{2} \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sin\omega\Delta t} \right|^{2} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sin^{2}\omega\Delta t} \left| \cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right|^{2}} \times \\ &\times \left[ 2 \left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} + \omega\Delta t\right) \sin\frac{\Delta\alpha}{2} \sin\omega\Delta t - \cos\varphi\cos^{2}\omega\Delta t + \cos(\varphi - \Delta\alpha) \right| + \right. \\ &+ \left| \cos\varphi - \cos\omega\Delta t\cos(\varphi - \Delta\alpha) - \cos(\omega\Delta t + \varphi) \right| + \\ &+ \left| 2\cos\varphi - \sin(\varphi - \Delta\alpha)\sin\omega\Delta t - \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \cos(\omega\Delta t + \Delta\alpha) \right| \right]; \quad (2.49) \\ &\gamma_{Q} &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \cos\left(\omega\Delta t - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right| + \left| \cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sin\omega\Delta t} \right|^{2} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sin^{2}\omega\Delta t} \left| \cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right|^{2} \times \end{split}$$

$$\times \left[ 2 \left| 2\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} - \omega\Delta t\right) \cos\frac{\Delta\alpha}{2}\sin\omega\Delta t - \sin\varphi \right| + \left|\sin\varphi\cos\omega\Delta t\right| + \left| 2\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} + \omega\Delta t\right) \cos\frac{\Delta\alpha}{2}\sin\omega\Delta t - \sin\varphi\cos\omega\Delta t \right| \right].$$
(2.50)

Анализ полученных выражений показывает, что относительная погрешность измерения СКЗ напряжения зависит только от спектра сигнала, интервала времени  $\Delta t$  и угла сдвига фазы ФБ  $\Delta \alpha$ . Погрешности определения остальных параметров зависят еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током  $\varphi$ .

На рисунке 2.15 представлены графики зависимости погрешности  $\delta_U$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 в соответствии с (2.47).



Рисунок 2.15 - Графики зависимости погрешности  $\delta_U$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002

На рисунках 2.16 – 2.21 приведены графики зависимости погрешностей  $\delta_I$ ,  $\gamma_P$  и  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{i5}$ =0,002 и  $h_{u5}$ =0,004 согласно выражениям (2.48) – (2.50) для  $\varphi$ =0° и  $\varphi$ =90°.

Анализ рисунков 2.16 – 2.21 показывает рост погрешности с увеличением угла сдвига фазы между сигналами напряжения и тока.



Рисунок 2.16 - Графики зависимости погрешности  $\delta_I$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =0°



Рисунок 2.17 - Графики зависимости погрешности  $\delta_I$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =90°



Рисунок 2.18 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =0°

46



Рисунок 2.19 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =90°



Рисунок 2.20- Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =0°



Рисунок 2.21 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $h_{u5}$ =0,002 и  $h_{i5}$ =0,004 для  $\varphi$ =90°

## 2.2.4 Метод измерения интегральных характеристик с формированием двух дополнительных сигналов напряжения и тока и сравнением входного и одного из дополнительных сигналов напряжений и токов

Метод заключается в сравнении входного и дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе на углы  $2\Delta\alpha$ . Причем в момент равенства мгновенных значений входного и, сдвинутого относительно него на углы  $2\Delta\alpha$ , дополнительного напряжений измеряют МгЗН, сдвинутого относительно входных сигналов на угол  $\Delta\alpha$ . В этот же МВ измеряется мгновенные значения дополнительного тока, сдвинутого относительно входного на  $\Delta\alpha$ . В момент равенства МгЗ входного и сдвинутого относительно него на угол  $\Delta\alpha$ . ИХГС определяются по измеренным МгЗ напряжения и тока [84].

ГП, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Графики процессов, поясняющие метод по п.2.2.4

Для входных гармонических напряжения и тока выражения для ДопС будут иметь вид:  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta \alpha);$   $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta \alpha);$  $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \Delta \alpha + \phi);$   $i_3(t) = I_m \sin(\omega t + 2\Delta \alpha + \phi).$  Схема ИИС, реализующей такой метод, представлена на рисунке 2.23.



Рисунок 2.23 – ИИС, реализующая метод по п. 2.2.4

При этом выражения для мгновенного значения сигналов в соответствующие МВ будут равны:

$$\begin{cases} U_{11} = U_{31}; \\ U_{21} = \pm U_m; \\ I_{21} = \pm I_m \cos\varphi; \\ I_{12} = I_{32}; \\ I_{22} = \pm I_m. \end{cases}$$
 (2.51)

В момент времени  $t_1$ , когда  $U_{11} = U_{31}$ , мгновенное значение входного напряжения имеет вид:  $U_{11} = U_m \sin \omega \Delta t_1$ ,

где  $\Delta t_1$  - ИнтВ между переходом сигнала  $u_1(t)$  через ноль до момента времени  $t_1$ , а мгновенные значения первого и второго ДопС будут равны:  $U_{21} = U_m \sin(\omega \Delta t_1 + \Delta \alpha)$  и  $U_{31} = U_m \sin(\omega \Delta t_1 + 2\Delta \alpha)$ .

Равенство МгЗ сигналов  $U_{11} = U_{31}$  выполняется в случае, если  $\omega \Delta t_1 + 2\Delta \alpha = \omega \Delta t_1$  ( $\Delta \alpha \neq 0$ ), то есть, когда  $2\Delta \alpha = \pi + 2\pi l - 2\omega \Delta t_1$  или  $\omega \Delta t_1 = \frac{\pi}{2}(2l+1) - \Delta \alpha$ , где l=0, 1. Отсюда  $U_{21} = U_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2k+1)\right] = \pm U_m$ .

СКЗ напряжения равно:

$$U_{CK3} = \frac{|U_{21}|}{\sqrt{2}}.$$
 (2.52)

В момент времени  $t_1$  МгЗ дополнительного тока  $i_2(t)$  равно  $I_{21} = I_m \sin(\omega \Delta t_1 + \Delta \alpha + \varphi) = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2l+1) + \varphi\right] = \pm I_m \cos \varphi$ .

В момент времени  $t_2$ , когда  $I_{12} = I_{32}$ , по аналогии с напряжением, МгЗ основного и дополнительного сигналов будут равны:  $I_{12} = I_m \sin \omega \Delta t_2$ ;  $I_{22} = I_m \sin(\omega \Delta t_2 + \Delta \alpha)$  и  $I_{32} = I_m \sin(\omega \Delta t_2 + 2\Delta \alpha)$ ,

где  $\Delta t_2$  - ИнтВ между переходом сигнала  $i_1(t)$  через ноль до момента времени  $t_2$ .

Равенство МгЗ сигналов  $I_{12} = I_{32}$  выполняется в том случае, если  $\omega \Delta t_2 + 2\Delta \alpha = \omega \Delta t_2$ , то есть, когда  $2\Delta \alpha = \pi + 2\pi l - 2\omega \Delta t_2$  или  $\omega \Delta t_2 = \frac{\pi}{2}(2l+1) - \Delta \alpha$ . Отсюда  $I_{22} = I_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2l+1)\right] = \pm I_m$  [85].

СКЗ тока равно:

$$I_{CK3} = \frac{|I_{22}|}{\sqrt{2}}.$$
 (2.53)

Активная и реактивная мощность определяются следующими выражениями:

$$P = \frac{U_{21}I_{21}}{2}; \tag{2.54}$$

$$Q = \frac{U_{21}|I_{22}|\text{sign}(I_{21})}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{I_{21}}{I_{22}}\right)^2}.$$
 (2.55)

Если в момент времени  $t_1$  МгЗТ  $I_{21} = 0$ , то это означает, что  $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ .

В этом случае определение угла сдвига фаз производится следующим образом. Если измерение МгЗН  $U_{21}$  произошло раньше, чем МгЗТ  $I_{22}$ , и знаки одинаковые, т.е.  $sign(U_{21}) = sign(I_{22})$ , то  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ . Если измерение  $U_{21}$  произошло раньше, чем  $I_{22}$ , и знаки разные, то  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , т.е.  $\varphi = sign(U_{21})sign(I_{22})\left(-\frac{\pi}{2}\right)$ . Если измерение мгновенного значения первого ДопС тока произошло раньше, чем мгновенного значения первого дополнительного напряжения и знаки одинаковые, то  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . Если измерение знаки разные, то  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ , т.е.  $\varphi = \text{sign}(U_{21})\text{sign}(I_{22})\frac{\pi}{2}$ .

При углах сдвига фаз между напряжением и током  $\phi > \Delta \alpha$  рассматриваемый метод обеспечивает время измерения  $\Delta t_H = \Delta t_H + \Delta t_{\phi}$ ,

где  $\Delta t_{\varphi} = \frac{\varphi}{\omega}$ ;  $\Delta t_H$  – промежуток времени с момента начала измерения до момента равенства входного и сдвинутого относительно него на 2 $\Delta \alpha$  дополнительного напряжения.

Используя методику определения погрешности из-за искажения формы PeC, можно найти предельные АбсП аргументов, соответствующие наибольшему отклонению моделей от реального сигнала. В этом случае предельные значения абсолютных погрешностей определения ИХГС в соответствии с (2.56) – (2.59) будут равны:

$$\Delta U_{CK3} = \left| \left( U_{CK3} \right)'_{U_{21}} \right| \Delta U_{\max}; \qquad (2.56)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left| \left( I_{CK3} \right)'_{I_{22}} \right| \Delta I_{\max}; \qquad (2.57)$$

$$\Delta P = |(P)'_{I_{21}}| \Delta I_{\max} + |(P)'_{U_{21}}| \Delta U_{\max}; \qquad (2.58)$$

$$\Delta Q = |(Q)'_{U_{21}}| \Delta U_{\max} + \left[ |(Q)'_{I_{21}}| + |(Q)'_{I_{22}}| \right] \Delta I_{\max}.$$
(2.59)

Используя выражения (2.52) – (2.55) с учетом предельных значений АбсП (2.56) – (2.59), можно определить ОтнП определения СКЗ напряжения и тока и ПрП определения активной и реактивной мощностей [86]:

$$\delta_{U_{\rm CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}};$$
(2.60)

$$\delta_{I_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}};$$
(2.61)

$$\gamma_{P} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\cos \varphi|}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}};$$
(2.62)

$$\gamma_{Q} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \sin^{2} \varphi + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left( 1 + |\cos \varphi| \right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2} |\sin \varphi|}}.$$
(2.63)

Анализ (2.60) и (2.61) показывает, что ОтнП определения СКЗ сигналов не зависят от угла сдвига фаз между напряжением и током  $\phi$  и определяются только их гармоническим составом.

Погрешности измерения активной и реактивной мощностей зависят не только от гармонического состава сигналов, но и от  $\varphi$ .

На рисунках 2.24 и 2.25 приведены графики зависимости ПрП определения АкМ и РеМ от угла  $\varphi$  при наличии в сигналах напряжения и тока первой и третьей гармоник с коэффициентами  $h_{uk} = h_{ik} = 1\%$  в соответствии с (2.62) и (2.63).



Рисунок - 2.24 График зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\phi$  при  $h_{u3}=h_{i3}=0,01$ 



Рисунок 2.25 График зависимости по-

грешности  $\gamma_Q$  от  $h_{u3}=h_{i3}=0,01$ 

Анализ графиков показывает уменьшение погрешности с ростом угла сдвига фаз между сигналами напряжения и тока *φ*.

Полученные результаты показывают, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения интегральных характеристик. Поэтому, рассматриваемый метод следует использовать в цепях, в которых сигналы напряжения и тока близки к гармоническим [87].

Недостатком данного метода, реализующей его, ИИС является возможность возникновения погрешности, обусловленной отличием углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока.

# 2.2.5 Метод измерения интегральных характеристик, основанный на сравнении основного и дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на угол 90 °, начиная с произвольного момента времени без разделения во времени

Метод основан на формировании ДопС напряжения, сдвинутого относительно входного на 90°; в произвольный МВ измеряют мгновенные значения входного и ДопС напряжения и тока; в момент равенства ортогональных составляющих напряжения измеряют МгЗ входного напряжения и тока. Информативные параметры определяют по измеренным мгновенным значениям.

Для пояснения метода могут быть использованы следующие ГП.



Рисунок 2.26 - Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.5

Если считать, что входное и сдвинутое относительно него на 90° ДопС напряжения, а также ток имеют МГС, то они принимают следующий вид:  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ ;  $u_2(t) = U_m \cos \omega t$ ;  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ ,

где  $U_m$ ,  $I_m$  - амплитуды напряжения и тока; φ - угол сдвига фаз между напряжением и током; ω - угловая частота BxC [88].

В произвольный MB  $t_1$  после начала измерения мгновенные значения сигналов равны:  $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$ ;  $U_{21} = U_m \cos \alpha_1$ ;  $I_{11} = I_m \sin (\alpha_1 + \phi)$ ,

где α<sub>1</sub> - начальная фаза входного напряжения в момент времени *t*<sub>1</sub>.

В момент равенства ОртС напряжения (момент времени  $t_2$ ) МгЗ сигналов примут вид:  $U_{12} = U_m \sin \alpha_2$ ;  $U_{22} = U_m \cos \alpha_2$ ;  $I_{12} = I_m \sin (\alpha_2 + \varphi)$ ,

где  $\alpha_2$  - фаза входного напряжения в момент времени  $t_2$  [89].

Равенство МгЗН  $U_{12}$  и  $U_{22}$  имеет место при угле  $\alpha_2 = \frac{\pi}{4} + \pi l$ , где l = 0,1. При

этом МгЗ сигналов примут следующий вид:  $U_{12} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; I_{12} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right).$ 

Произведя соответствующие преобразования, можно найти выражения для определения основных ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока

$$U_{\rm CK3} = |U_{12}|; \tag{2.64}$$

$$I_{\rm CK3} = \frac{\sqrt{\left(I_{11}|U_{12}| - I_{12}U_{21}\right)^2 + \left(I_{12}U_{11} - I_{11}|U_{12}|\right)^2}}{|U_{11} - U_{21}|};$$
(2.65)

- активная и реактивная мощности

$$P = \frac{|U_{12}|(I_{11}|U_{12}| - I_{12}U_{21})}{U_{11} - U_{21}};$$
(2.66)

$$Q = \frac{|U_{12}|(I_{12}U_{11} - I_{11}|U_{12}|)}{U_{11} - U_{21}}.$$
(2.67)

При использовании выражений (2.64) – (2.67) предельные значения АбсП определения ИХГС принимают вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \Delta U_{\max}; \qquad (2.68)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (2.69)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (2.70)$$

$$\Delta Q = \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}. \quad (2.71)$$

Абсолютные погрешности аргументов в выражениях (2.68) – (2.71) значения  $\Delta U_{\text{max}}$  и  $\Delta I_{\text{max}}$  соответствуют максимальным отклонениям мгновенных значений реальных сигналов от соответствующих значений МГС и в предельном случае равны:  $\Delta U_{\text{max}} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$  и  $\Delta I_{\text{max}} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$ , где  $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$  и  $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$ - коэффициенты ВГС напряжения и тока порядка k;  $U_{1m}$  и  $I_{1m}$  - амплитуды первых гармоник сигналов;  $U_{km}$  и  $I_{km}$  - амплитуды ВГС напряжения и тока порядка k.

Из выражений (2.68) – (2.71) и (2.64) – (2.67) можно найти относительные погрешности измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности определения АкМ и РкМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}}};$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} |\sin \alpha_{1} - \cos \alpha_{1}|} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \phi - \cos \phi| [\sin \phi| + |\cos \phi| + \log \phi] \right\}$$
(2.72)

$$+ \sqrt{2} |\sin(\alpha_{1} + \varphi)| + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ |\sin \varphi - \cos \varphi| + \sqrt{2} |\cos(\alpha_{1} + \varphi)| \right] ;$$
(2.73)  

$$\gamma_{P} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} |\sin \alpha_{1} - \cos \alpha_{1}|} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ |\sin \varphi| + |\cos \varphi| + |2\sin(\alpha_{1} + \varphi) + \cos \varphi (\sin \alpha_{1} - \cos \alpha_{1})| \right] + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (1 + \sqrt{2} |\cos \alpha_{1}|) \right\} ;$$
(2.74)  

$$\gamma_{Q} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} |\sin \alpha_{1} - \cos \alpha_{1}|} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[ |\sin \varphi| + |\cos \varphi| + \sqrt{2} |\sin \varphi| + |\cos \varphi| + \sqrt{2} |\sin \varphi| - \cos \alpha_{1} \right] - \sin(\alpha_{1} + \varphi) \right\} .$$
(2.75)

Из анализа выражений (2.72) - (2.75) следует, что относительная погрешность измерения СКЗ напряжения зависит только от гармонического состава сигнала напряжения. Относительные погрешности определения СКЗ тока и приведенные погрешности измерения АкМ и РеМ зависят еще и от угла сдвига фаз между напряжением и током о и момента начала измерения, характеризуемого начальной фазой  $\alpha_1$  [90].

Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ тока и приведенных погрешностей определения AкM и PeM от  $\phi$  и  $\alpha_1$  при наличии в сигналах первой и третьей гармоники с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$ , построенные на основе выражений (2.73) – (2.75), представлены на рисунках 2.27 – 2.29.

 $\infty$ 





Рисунок 2.29 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\phi$  и  $\alpha_1$ 

Анализ показывает, что при угле  $\alpha_1 = 45^\circ$  знаменатели выражений (2.73) – (2.75) обращаются в ноль. Этим объясняется резкое увеличение погрешностей в окрестностях угла 45° (начальные фазы, равные 40° и 50° на рисунках 2.27 – 2.29).

### 2.2.6 Метод с использованием дополнительных сигналов напряжения и тока с разными углами сдвига и перехода входного напряжения через ноль

Метод заключается в том, что в момент перехода ВхС напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta \alpha_1$ , и первые МгЗ входного тока и сдвинутого относительно него по фазе на угол  $\Delta \alpha_2$  дополнительного сигнала тока; через произвольный (в общем случае) интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют вторые МгЗ входного и дополнительного напряжений и второе мгновенное значение дополнительного тока. ИХГС определяют по измеренным МгЗ сигналов [91].

ГП, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.30.



Рисунок. 2.30 Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.6

При входных гармонических сигналах  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  ДопС напряжения и тока имеют вид:  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta \alpha_1)$ и  $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta \alpha_2)$ .

В момент перехода ВхС напряжения через ноль (момент времени  $t_1$ ) МгЗ дополнительного напряжения, входного и дополнительного сигналов тока соответственно равны:  $U_{21} = U_m \sin \Delta \alpha_1$ ;  $I_{11} = I_m \sin \varphi$ ;  $I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta \alpha_2)$ . Через интервал времени  $\Delta t$  в момент времени  $t_2$  мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и второе МгЗ дополнительного тока примут вид:  $U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t$ ;  $U_{22} = U_m \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)$ ;  $I_{22} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t + \Delta \alpha_2)$ .

Используя МгЗ сигналов, можно получить выражения для определения основных ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока

$$U_{CK3} = \frac{|U_{12}U_{22}U_{21}|}{\sqrt{2\left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right]}};$$
(2.76)

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ I_{21}^2 + \frac{\left[ 2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21}\left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)\right]^2}{4U_{22}^2 U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2} \right\}};$$
(2.77)

- активной и реактивной мощностей:

$$P = \frac{|U_{12}U_{22}U_{21}|}{4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2} \left\{ \left(I_{21}^2 - I_{11}^2\right) \left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right] + \frac{1}{4U_{22}^2} \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2 \right\} + \frac{1}{4U_{22}^2} \left[U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right]^2 \left\{ \left(I_{21}^2 - I_{11}^2\right) \left[4U_{22}^2U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2\right)^2\right] + \frac{1}{4U_{22}^2} \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2 \right\} \right\}$$

$$+ \left[ 2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21} \left( U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2 \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \qquad (2.78)$$

$$Q = \frac{I_{11} |U_{12} U_{22} U_{21}|}{2 \sqrt{\left[4U_{22}^2 U_{21}^2 - \left(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2\right)^2\right]}}.$$
(2.79)

Анализ выражений (2.76) – (2.79) показывает, что выражения для определения СКЗ тока, АкМ и РеМ инварианты к значениям углов сдвига фаз ФБ, при этом углы Δα<sub>1</sub> и Δα<sub>2</sub> могут отличаться друг от друга.

Метод может быть реализован с помощью ИИС, приведенной на рисунке 2.31.



Рисунок 2.31 - ИИС, реализующая метод по п. 2.2.6

Однако, при реализации метода возможно возникновение погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФБ. Наличие данного вида погрешности приводит к тому, что амплитудное значение входного сигнала будет отличаться от амплитуды BxC фазосдвигающего блока.

Если амплитудное значение напряжения на выходе ФБ1 отличается от амплитуды входного на величину  $\Delta U_m$ , то мгновенные значения дополнительного напряжения примут вид:  $U'_{21} = (U_m + \Delta U_m) \sin \Delta \alpha$  и  $U'_{22} = (U_m + \Delta U_m) \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)$ . Так же, при отличии дополнительного тока от ВхС на величину  $\Delta I_m$ , мгновенные значения дополнительного сигнала тока будут равны:  $I'_{21} = (I_m + \Delta I_m) \sin(\varphi + \Delta \alpha)$  и  $I'_{22} = (I_m + \Delta I_m) \sin(\varphi + \Delta \alpha)$ .

Выражения для определения ИХГС (2.76 - 2.79) преобразуются к виду:

$$U_{CK3} = \frac{|U_{12}U'_{22}U'_{21}|}{\sqrt{2\left[4U'_{22}U'_{21}^2 - \left(U'_{21}^2 - U_{12}^2 + U'_{22}^2\right)^2\right]}};$$

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2}\left\{I'_{21}^2 + \frac{\left[2I'_{22}U'_{22}U'_{21} - I'_{21}\left(U'_{21}^2 - U_{12}^2 + U'_{22}^2\right)^2\right]}{4U'_{22}U'_{21}^2 - \left(U'_{21}^2 - U_{12}^2 + U'_{22}^2\right)^2}\right\}};$$
(2.80)
$$(2.81)$$

60

$$P = \frac{|U_{12}U'_{22}U'_{21}|}{4U'_{22}U'_{21}^2 - (U'_{21}^2 - U_{12}^2 + U'_{22}^2)^2} \left\{ \left(I'_{21}^2 - I_{11}^2\right) \left[ 4U'_{22}U'_{21}^2 - (U'_{21}^2 - U_{12}^2 + U'_{22}^2)^2 \right] + \left[ 2I'_{22}U'_{21} - U'_{12}^2 + U'_{22}^2 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \qquad (2.82)$$

$$Q = \frac{I_{11}|U_{12}U_{22}U_{21}'|}{2\sqrt{\left[4U_{22}'^2U_{21}'^2 - \left(U_{21}'^2 - U_{12}^2 + U_{22}'^2\right)^2\right]}}.$$
(2.83)

Для оценки данного вида погрешности можно воспользоваться методикой оценки погрешности результата измерения ИХГС, как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от PeC [92].

Если считать, что АбсП аргументов соответствуют отклонению МгЗ дополнительного напряжения и тока на  $\Delta U_m$  и  $\Delta I_m$  то, при условии, что мгновенные значения ВхС были измерены без погрешности, можно найти предельные значения абсолютных погрешностей измерения ИХГС:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \qquad (2.84)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I_m + \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (2.85)$$

$$\Delta P = \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I_m + \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (2.86)$$

$$\Delta Q = \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m.$$
 (2.87)

С учетом абсолютных погрешностей (2.84) – (2.87) и выражений для ИХГС (2.76) – (2.79) можно найти ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности измерения АкМ и РеМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{h_U |\cos \omega \Delta t| ||\cos \Delta \alpha_1| + |\cos (\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)||}{|\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin (\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)|}; \quad (2.88)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{h_I \left[ \left| \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \right| \right]}{\left| \sin \omega \Delta t \right|} + \frac{h_U}{\left| \sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \right|} \times \\ \times \left| \cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t) \right| \left[ \left| \cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \Delta \alpha_1 \right| \right] \right]; \quad (2.89)$$

$$\gamma_P = \frac{h_I \left[ \left| \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \right| \right]}{\left| \cos \varphi \sin \omega \Delta t \right|} + \frac{h_U}{\left| \sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \cos \varphi \right|} \times \\ \left\{ \left[ \cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \right] + \left| \cos \Delta \alpha_1 \right| \right] 2 \cos \omega \Delta t \cos^2 \varphi + \cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t) \right\}; \quad (2.90)$$

$$\gamma_Q = \frac{2h_U \left[ \left| \cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \Delta \alpha_1 \right| \right] \left| \left| \sin \varphi \cos \omega \Delta t \right| \right|}{\left| \sin \Delta \alpha_1 \sin \omega \Delta t \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \right|}, \quad (2.91)$$

где 
$$h_U = \Delta U_M / U_m$$
;  $h_I = \Delta I_M / I_m$ .

Погрешности измерения СКЗ напряжения и РеМ, определяемые в соответствии с (2.88) и (2.91), зависят от коэффициента  $h_U$ , угла сдвига фазы ФБ1  $\Delta \alpha_1$  и интервала времени  $\Delta t$ . Погрешности измерения СКЗ тока и активной мощности, которые определяются согласно выражениям (2.89) и (2.90), кроме этого, зависят от угла сдвига фазы ФБ2  $\Delta \alpha_2$  и угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ .

На рисунке 2.32 приведены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения от угла  $\Delta \alpha_1$  и интервал времени  $\Delta t$  в соответствии с (2.88) при  $h_U = 0.1\%$ .



Рисунке 2.32 - Зависимость погрешности  $\delta_U$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

На рисунках 2.33 и 2.34 графики зависимости погрешностей измерения СКЗ тока и активной мощности для угла сдвига фаз между напряжением и током  $\phi=0^{\circ}$ .





Рисунок. 2.33 - Зависимость погрешности  $\delta_t$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi=0^\circ$ 

Рисунок 2.34 - Зависимость погрешности  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi = 0^\circ$ 

Из выражения (2.91) следует, что при  $\phi=0^{\circ}$  погрешность измерения PeM равна нулю.

На рисунках 2.35 и 2.36 приведены графики зависимости погрешностей измерения СКЗ тока и реактивной мощности при угле сдвига фаз между напряжением и током φ=90°.



 $\begin{array}{c} & \gamma_{\mathcal{Q}_{M}}, \% \\ & & & & \\ &$ 

Рисунок. 2.35 - Зависимость погрешности  $\delta_I$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi=90^{\circ}$ 

Рисунок 2.36 - Зависимость погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi=90^{\circ}$ 

Анализ рисунков 2.32 – 2.36 показывает, что для уменьшения погрешности определения СКЗ напряжения нужно выбирать  $\Delta \alpha_1$  в диапазоне 50÷80°, а  $\omega \Delta t$  - в пределах 60÷90° [93].

2.2.7 Метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям напряжения и тока, связанных с переходом сигнала напряжения через ноль и сравнением основного и дополнительного сигналов напряжения

В соответствии с методом в момент перехода ВхС напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол Δα, и первое МгЗ тока; в момент равенства входного и дополнительного напряжений одновременно измеряют вторые МгЗ дополнительного напряжения и тока и определяют ИХГС по измеренным значениям [94].

ГП, поясняющие метод, представлены на рисунке 2.37.



Рисунок 2.37 – Графики процессов, поясняющие метод по п. 2.2.7

Входные напряжение и ток имеют вид:  $u_1(t) = U_m \sin\omega t$ ,  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ . В этом случае ДопС напряжение будет равно:  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta \alpha)$ . Мгновенные значения дополнительного напряжения и тока при переходе входного напряжения через ноль (MB  $t_1$ ) равны:  $U_{21} = U_m \sin \Delta \alpha$  и  $I_{11} = I_m \sin \varphi$ , где  $U_m$ ,  $I_m$  - амплитудные значения напряжения и тока;  $\varphi$  - угол сдвига фаз между напряжением и током;  $\omega$  - угловая частота входного сигнала.

В момент времени  $t_2$ , когда МгЗ входного  $U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t$  и дополнительного напряжений  $U_{22} = \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)$  будут равны, МгЗ тока принимает вид  $I_{12} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t)$ ,

где  $\Delta t$  – интервал времени между моментом перехода входного напряжения через ноль и моментом равенства входного и дополнительного напряжений [95].

Так как  $U_{12} = U_{22}$ , то  $\sin \omega \Delta t = \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)$ . Это равенство выполняется, ес-

ли 
$$\Delta \alpha = \pi - 2\omega \Delta t$$
. Отсюда  $\omega \Delta t = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2} + \pi l$ , где  $l=0$ ; 1. Тогда  $U_{22} = U_m \cos \frac{\Delta \alpha}{2}$ , а  
 $I_{12} = I_m \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right).$ 

С учетом выражений для МгЗ сигналов можно определить основные ИХГС: - СКЗ напряжения и тока

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}U_{22}^2}{\sqrt{4}U_{22}^2 - U_{21}^2};$$
(2.92)

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ I_{11}^2 + \frac{\left(2U_{22}I_{12} - I_{11}U_{21}\right)^2}{4U_{22}^2 - U_{21}^2} \right]};$$
(2.93)

- активная и реактивная мощности

$$P = \frac{2U_{22}^2 (2U_{22}I_{12} - I_{11}U_{21})}{4U_{22}^2 - U_{21}^2};$$
(2.94)

$$Q = \frac{U_{22}^2 I_{11}}{\sqrt{4U_{22}^2 - U_{21}^2}} \,. \tag{2.95}$$

Схема ИИС, реализующей данный метод, представлена на рисунке 2.38



Рисунок 2.38 - Схема ИИС, реализующей метод по п. 2.2.7

Если считать, что при амплитудном значении напряжения  $U_m$  МгЗ напряжений  $U_{21}$  и  $U_{22}$  измеряются с погрешностью преобразования АЦП и предельные абсолютные погрешности измерений равны  $\Delta U_{21} = \Delta U_{22} = \Delta U$ , то выражения для предельной АбсП вычисления СКЗ напряжения согласно (2.92) с учетом погрешности квантования АЦП1 преобразуется к виду:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \left( U_{CK3} \right)'_{U_{21}} \right| + \left| \left( U_{CK3} \right)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U.$$
(2.96)

В этом случае выражение для Отн<br/>П вычисления  $U_{\mathit{CK3}}$  в соответствии с (2.96) равна

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\left| \frac{\sin \frac{\Delta \alpha}{2} + 4 |\cos \Delta \alpha|}{2} + 2^{n+1} |\cos^3 \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}{2^{n+1} |\cos^3 \frac{\Delta \alpha}{2}|},$$
(2.97)

где *п* – разрядность АЦП.

Если считать, что при преобразовании напряжений, пропорциональных  $I_{11}$  и  $I_{12}$ , абсолютные погрешности АЦП пропорциональны  $\Delta I_{11} = \Delta I_{12} = \Delta I$ , то в соответствии с (2.93) предельная абсолютная погрешность вычисления СКЗ тока с учетом погрешности квантования АЦП1 и АЦП2:

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \left( I_{CK3} \right)'_{I_{11}} \right| + \left| \left( I_{CK3} \right)'_{I_{12}} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| \left( I_{CK3} \right)'_{U_{21}} \right| + \left| \left( I_{CK3} \right)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U$$
(2.98)

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\left| \frac{\sin\left(\varphi - \frac{\Delta \alpha}{2}\right) \right| + \left| \cos \Delta \alpha \right|}{2^{n} \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right|} + \frac{\left| \cos \varphi \right| \left[ \left| \cos \varphi \sin\left(\varphi + \frac{\Delta \alpha}{2}\right) \right| + \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \cos\left(\varphi - \frac{\Delta \alpha}{2}\right) - \cos \varphi \right| \right]}{2^{n+1} \left| \cos^{3} \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}.$$
(2.99)

Аналогично, в соответствии с выражениями (2.94) и (2.95) определяются предельные АбсП вычисления активной и реактивной мощностей:

$$\Delta P = \left[ \left| \left( P \right)'_{I_{11}} \right| + \left| \left( P \right)'_{I_{12}} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| \left( P \right)'_{U_{21}} \right| + \left| \left( P \right)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U; \qquad (2.100)$$

$$\Delta Q = \left| (Q)'_{I_{11}} \right| \Delta I + \left[ \left| (Q)'_{U_{21}} \right| + \left| (Q)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U.$$
 (2.101)

Используя (2.100) и (2.101) можно определить предельные погрешности измерения АкМ и РеМ:

$$\gamma_{P} = \frac{\left| \frac{\sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + 1}{2^{n} \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right|} + \frac{\left| \cos \varphi \sin \frac{\Delta \alpha}{2} - \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| + 2 \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) - 2 \cos \varphi \sin^{2} \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}{2^{n+1} \left| \cos^{3} \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}; \quad (2.102)$$

$$\gamma_{Q} = \frac{1}{2^{n}} + \frac{\left| \sin \varphi \right| \left( \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| \right)}{2^{n+1} \left| \cos^{3} \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}. \quad (2.103)$$

Анализ выражений (2.97), (2.99), (2.102) и (2.103) показывает, что результирующие погрешности определения ИХГС зависят от Δα. Погрешность можно существенно снизить за счет соответствующего выбора угла сдвига Δα.

На рисунке 2.39 представлен график зависимости ОтнП измерения СКЗ напряжения от Δα.



Рисунок 2.39 - График зависимости погрешности  $\delta_U$  от  $\Delta \alpha$ 

Из рассмотрения рисунке 2.39 следует, что погрешность определения СКЗ напряжения уменьшается с увеличением угла сдвига фазы  $\Phi E \Delta \alpha$  и в диапазоне изменения угла от 0 до 90° принимает минимальное значение при угле  $\Delta \alpha$ =90°.

На рисунках 2.40 – 2.42 приведены графики зависимости относительных погрешностей измерения СКЗ тока и приведенных погрешностей определения АкМ и РеМ от углов Δα и φ.







Рисунок 2.41 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\phi$  и  $\Delta \alpha$ 



Рисунок 2.42 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\varphi$  и  $\Delta \alpha$ 

Анализ рисунков 2.40 – 2.44 показывает, что для уменьшения погрешности при измерении СКЗ тока и активная мощность следует выбирать Δα в пределах 40÷70° не зависимо от угла сдвига фазы φ [96].

При измерении PeM погрешность меньше при малых значениях угла  $\Delta \alpha$ 

#### 2.3 Основные результаты и выводы

1. Проведенный анализ показал, что погрешности измерения интегральных характеристик зависят от гармонического состава сигналов.

2. При использовании аппроксимационного подхода в взадачах контроля, измерения и испытаний электросилового оборудования возникает погрешность из-за несоответствия реального сигнала и гармонической модели. Методы 2.2.4 и 2.2.5 имеют существенную погрешность, определяющуюся гармоническим составом синала.

3. Использование фазосдвигающих блоков для реализации дополнительного сигнала приводит к погрешности, зависящей от угла сдвига фаз между напряжением и током.

4. Анализ методов показал, что всем методам присуща погрешность угла сдвига фаз между напряжением и током при применении фазосдвигающих бло-ков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов.

5. Для построения ИИС оперативного измерения интегральных характеристикнеобходимо разработать новые методы и системы с улучшенными характеристики и высоким быстродействием.

#### 3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ИНВАРИАНТНЫХ К ПОГРЕШНОСТЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

Одним из направлений, используемых для реализации методов измерения параметров гармонических сигналов, является, как уже было отмечено выше, разделение МгЗ сигналов в пространстве за счет формирования ДопС напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных. Это обеспечивает существенное сокращение времени определения ИХГС [75].

Одним из основных факторов, ограничивающих точность ИИС, использующих формирование ДопС является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФБ. Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов [97]. Другим фактором, оказывающим существенное влияние на погрешности определения информативных параметров сигналов, является возможность возникновения частотной погрешности ФБ (при применении ОртС сигналов), а также угловой погрешности фазосдвигающих блоков при формировании нескольких ДопС.

В третьей главе предлагаются и анализируются новые методы и системы измерения ИХГС, предполагающие частичное или полное исключение погрешностей, возникающих при формировании ДопС.

Все разработанные методы, инвариантные к погрешностям формирования ДопС, можно условно разделить на методы с коррекцией и без последующей коррекции МгЗ сигналов [98].

На рисунке 3.1 представлена разработанная классификация предлагаемых методов, основанная на использовании одного и более дополнительных сигналов.

В результате предложенной классификации разработаны пять новых методов измерения ИХГС, разделенных в пространстве (таблица 3.1).



Рисунок 3.1 - Классификация методов измерения ИХГС с использованием дополнительных сигналов

АВД	ABE	БВЕ	ΑΓΕ	БГЖ
Метод	Метод	Метод	Метод	Метод
определения	определения	определения	определения	определения
параметров по	параметров по	параметров по	параметров по	параметров по
мгновенным	мгновенным	мгновенным	мгновенным	мгновенным
значениям	значениям	значениям	значениям	значениям
входных	входных	входных	входных	сигналов
сигналов и	сигналов,	сигналов с	сигналов на	на основе
дополнительного	измеренным в	использованием	основе	сравнения
напряжения,	моменты	переходов	формирования	мгновенных
измеренным в	переходов	ортогональных	дополнительных	значений
моменты	входного и	составляющих	сигналов	гармонических
переходов	дополнительного	напряжения че-	напряжения и	сигналов,
сигналов	напряжений и	рез ноль	использования	разделенных в
напряжения	тока через ноль		их характерных	пространстве
через ноль и			точек	
через				
произвольный				
интервал				
времени				

Таблица 3.1	– Новые методы	измерения ИХГС
-------------	----------------	----------------

На основе разработанных методов синтезирована обобщенная структурная схема ИИС измерения ИХГС. Структурная схема ИИС приведена на рисунке 3.2.


Рисунок 3.2 - Обобщенная структурная схема ИИС

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН1 – ППН3; первичные преобразователи тока ППТ1 – ППТ3; нуль-органы H-O1 – H-O3; аналого-цифровые преобразователи АЦП1 – АЦП10; фазосдвигающие блоки ФБ1 – ФБ3; блок управления БУ; микроконтроллер МК; автоматизированное рабочее место оператора АМР. ИИС имеет перестраиваемую структуру в зависимости от типа оборудования и его режимов эксплуатации. Блок управления формирует измерительные каналы в зависимости от выбранного метода измерений (таблица 3.1). Это позволяет оперативно реагировать на изменения параметров измеряемых сигналов электрооборудования, в частности, при появлении предаварийной ситуации. 3.1 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов и дополнительного напряжения, измеренным в моменты переходов сигналов напряжения через ноль и через произвольный интервал времени

Разработанный метод (АВД) измерения ИХГС обеспечивает исключение как угловой погрешности, поскольку использует формирование только одного ДопС напряжения, так и погрешности по модулю ФБ за счет коррекции мгновенныз значений ДопС.

Сущность метода основана на том, что в MB, когда дополнительный сигнал напряжения, сдвинутый по фазе относительно входного на угол  $\Delta \alpha$ , переходит через ноль производят измерение Mr3 входного напряжения; в момент времени, когда BxC напряжения переходит через ноль, одновременно измеряют Mr3 дополнительного напряжения и тока; через ИнтВ  $\Delta t$  осуществляют одновременное измерение Mr3 входного и ДопС напряжения и тока. Искомые информативные параметры вычисляют по измеренным значениям [99].

ГП, поясняющие метод, приведены на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Графики процессов, поясняющие метод АВД

Для входных гармонических сигналов напряжения  $u_1(t) = U_{m1}\sin\omega t$  и тока  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  ДопС напряжения примет вид:  $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta \alpha)$ , где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  - амплитудные значения входного и дополнительного напряжений.

В момент перехода ДопС напряжения через ноль (МВ  $t_1$ ) выражение для МгЗН примет вид:  $U_{11} = U_{m1} \sin(-\Delta \alpha)$ .

В момент времени  $t_2$ , когда BxC напряжения переходит через ноль, Mr3 сигналов будут равны:  $U_{22} = U_{m2} \sin \Delta \alpha$ ;  $I_{12} = I_m \sin \varphi$ .

Через ИнтВ  $\Delta t$  (в момент времени  $t_3$ ) МгЗН и МгЗТ будут определяться выражениями:  $U_{13} = U_{m1} \sin \omega \Delta t$ ;  $U_{23} = U_{m2} \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)$ ;  $I_{13} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t)$  [100].

Погрешность по модулю ФБ можно оценить следующим коэффициентом

$$k_m = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \left| \frac{U_{11}}{U_{22}} \right|.$$

За счет использования данного коэффициента, можно произвести корректировку МгЗ дополнительного напряжения:  $U'_{22} = k_m U_{22} = U_{m1} \sin \Delta \alpha$ ;  $U'_{23} = k_m U_{23} = U_{m1} \sin (\Delta \alpha + \omega \Delta t)$ .

С учетом скорректированных МгЗ сигналов можно найти выражения для определения информативных параметров для случая, когда  $\Delta \alpha \leq 90^{\circ}$ :

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2} |U_{13}U_{22}'U_{23}'|}{\sqrt{\left[4U_{22}'^2U_{23}'^2 - \left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2\right)^2\right]}};$$
(3.1)

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{U_{22}'U_{23}'\left[2U_{22}'U_{23}'\left(I_{12}^2 + I_{13}^2\right) - I_{12}I_{13}\left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2\right)\right]}{4U_{22}'U_{23}'^2 - \left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2\right)^2}};$$
(3.2)

$$P = \frac{|U_{13}U'_{22}U'_{23}| \left[2I_{13}U'_{22}U'_{23} - I_{12}\left(U'_{22}^2 - U_{13}^2 + U'_{23}^2\right)\right]}{\left[4U'_{22}U'_{23}^2 - \left(U'_{22}^2 - U_{13}^2 + U'_{23}^2\right)^2\right]};$$
(3.3)

$$Q = \frac{I_{12} |U_{13} U_{22}' U_{23}'|}{\sqrt{4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)^2}}.$$
(3.4)

При отклонении PeC от МГС предельные значения АбсП определения параметров сигналов в соответствии с (3.1) – (3.4) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{13}} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (3.6)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{13}} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (3.7)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}.$$
(3.8)

При использовании (3.1) – (3.4) с учетом (3.5) – (3.8) можно найти ОтнП определения СКЗ сигналов и ПрП измерения АкМ и РеМ:

$$\begin{split} \delta_{U_{CK3}} &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{2\left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2\right)} |\sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|}} \left\{ \sin \Delta \alpha \left[ \sin \Delta \alpha - \sin(\Delta \alpha + 2\omega \Delta t) \right] + 2|\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\cos(\omega \Delta t + 2\Delta \alpha)| \right\}; \quad (3.9) \\ \delta_{I_{CK3}} &= \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \cos \varphi \right] + |\cos(\varphi - \omega \Delta t)| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin \omega \Delta t|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sin^2 \omega \Delta t |\sin \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)|} \times \left[ |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha| |\cos \omega \Delta t + \cos(2\omega \Delta t + \varphi)| + |\sin \omega \Delta t \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t|| 2 \sin \varphi \sin(\omega \Delta t + \varphi) - 1| \right]; \quad (3.10) \\ \gamma_P &= \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin \omega \Delta t|} \left[ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} (|\cos \omega \Delta t| + 1) + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin \omega \Delta t| |\cos \varphi \cos \Delta \alpha \cos(\omega \Delta t + \Delta \alpha) + \cos(\omega \Delta t + \varphi)| + |\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \right] \right\}$$

$$\gamma_{Q} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \phi|}{2 |\sin \Delta \alpha \sin \omega \Delta t \sin (\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \times \left[ 2 \sin^{2} \omega \Delta t |\cos \Delta \alpha \cos \omega \Delta t| + |\cos \omega \Delta t + \cos (\omega \Delta t + 2\Delta \alpha)| + |\cos \omega \Delta t \sin \omega \Delta t| |\sin \Delta \alpha - \sin (2\omega \Delta t + \Delta \alpha)| \right] \right\}.$$

$$(3.12)$$

Из анализа (3.9) – (3.12) следует, что погрешности измерения информативных параметров зависят от спектра сигналов, угла сдвига фазы ΦБ и интервала  $ω\Delta t$ .

Кроме этого, погрешности измерения СКЗ тока, АкМ и РеМ определяются также и углом сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока  $\phi$ .

Анализ (3.12) показывает, что при  $\phi=0^{\circ}$  ПрП измерения РеМ не зависит от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  и является постоянной величиной.

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ напряжения от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при наличии в сигналах 1-ой и 3-й гармоник с  $h_{u3}$ =0,1%, построенные согласно (3.9), показаны на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Графики зависимости  $\delta_{UCK3}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

В соответствии с (3.10) и (3.11) были построены графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения АкМ от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при наличии в сигналах 1-ой и 3-й ВГС с  $h_{u3}=h_{i3}=0,1\%$  для  $\varphi=0^{\circ}$ , которые показаны на рисунках 3.5 и 3.6.



Рисунок 3.5 - Графики зависимости погрешности

 $\delta_{ICK3}$  от Δα и ωΔ*t* при φ=0°



Рисунок 3.6 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi = 0^\circ$ 

Проведенный дополнительный анализ показал, что с увеличением угла сдвига фаз между BxC напряжения и тока погрешности измерения CK3 тока и AkM снижаются. Графики зависимости ПрП измерения РеМ от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при наличии в сигналах 1-ой и 3-й гармоник с  $h_{u3}=h_{i3}=0,1\%$  для  $\varphi=90^{\circ}$ , построенные согласно (3.12), показаны на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при  $\phi=90^{\circ}$ 

Схема ИИС, с помощью которой может быть реализован рассматриваемый метод, показана на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Схема ИИС, реализующей метод АВД

При использовании в ИИС аналого-цифрового преобразования МгЗ сигналов неизбежно возникает погрешность квантования. Если считать, что предельные АбсП измерения МгЗ сигналов соответствуют погрешностям квантования, то АбсП определения ИХГС с учетом (3.1) – (3.4) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{23}} \right| \right] \Delta U; \qquad (3.13)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{13}} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U'_{23}} \right| \right] \Delta U; \qquad (3.14)$$

$$\Delta P = \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{13}} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{23}} \right| \right] \Delta U; \qquad (3.15)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{12}} \right| \Delta I + \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U'_{23}} \right| \right] \Delta U.$$
(3.16)

Учитывая выражения (3.1) – (3.4) и (3.13) – (3.16) и считая, что погрешности всех АЦП равны между собой, можно определить ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и ПрП измерения активной и реактивной мощностей:

$$\begin{split} \delta_{U_{CK3}} &= \frac{1}{2^{n} |\sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \left\{ \sin \Delta \alpha [\sin \Delta \alpha - \sin(\Delta \alpha + 2\omega \Delta t)] \right\} + \\ &+ 2 |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\cos(\omega \Delta t + 2\Delta \alpha)| \right\}; \quad (3.17) \\ \delta_{I_{CK3}} &= \frac{|\cos \varphi| + |\cos(\varphi - \omega \Delta t)|}{2^{n} |\sin \omega \Delta t|} + \frac{1}{2^{n+1} \sin^{2} \omega \Delta t |\sin \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)|} \times \\ &\times [|\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha ||\cos \omega \Delta t + \cos(2\omega \Delta t + \varphi)| + \\ &+ |\sin \Delta \alpha + \sin(2\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t|| 2 \sin \varphi \sin(\omega \Delta t + \varphi) - 1|]; \quad (3.18) \\ &\gamma_{P} &= \frac{|\cos \omega \Delta t| + 1}{2^{n} |\sin \omega \Delta t|} + \frac{1}{2^{n} |\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \times \\ &\times \{|\sin \omega \Delta t||\cos \varphi \cos \Delta \alpha \cos(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha + \varphi|\} + \\ &+ |\cos(\omega \Delta t + \varphi)| + \cos \omega \Delta t \cos \varphi| [|\sin \Delta \alpha - \sin(2\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha|] \}; \quad (3.19) \end{split}$$

$$\gamma_{Q} = \frac{1}{2^{n}} + \frac{|\sin \varphi|}{2^{n+1} |\sin \Delta \alpha \sin \omega \Delta t \sin (\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \times \\ \times \left[ 2\sin^{2} \omega \Delta t |\cos \Delta \alpha \cos \omega \Delta t| + |\cos \omega \Delta t + \cos (\omega \Delta t + 2\Delta \alpha)| + |\cos \omega \Delta t \sin \omega \Delta t| |\sin \Delta \alpha - \sin (2\omega \Delta t + \Delta \alpha)| \right].$$
(3.20)

Из анализа выражений (3.17) – (3.20) видно, что погрешности измерения информативных параметров зависят от числа разрядов АЦП *n*, угла сдвига фазы ФБ  $\Delta \alpha$  и интервала  $\omega \Delta t$ . Кроме этого, погрешности определения СКЗ тока, АкМ и РеМ также характеризуются углом сдвига фаз между ВхС напряжения и тока  $\varphi$ .

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ напряжения от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при *n*=12, построенные согласно (3.17), приведены на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 - Графики зависимости  $\delta_{UCK3}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

В соответствии с (3.18) – (3.20) были построены графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения активной и реактивной мощностей от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при 12-разрядных АЦП и  $\varphi$ =0° (для СКЗ тока и АкМ) или  $\varphi$ =90° (для РеМ), которые показаны на рисунках 3.10 – 3.12.

Анализ рисунков 3.9 – 3.12 показывает, что погрешности измерения ИХГС могут быть значительно снижены за счет соответствующего выбора угла сдвига ФБ Δα и интервала ωΔ*t*.

Большим достоинством рассматриваемого метода является возможность сокращения погрешности по модулю и отсутствие угловой погрешности ФБ.

Время измерения ИХГС при реализации данного метода во многом зависит от угла сдвига фазы ФБ и длительности интервала  $\omega \Delta t$ . Поскольку метод предусматривает возможность начала измерения как при переходе ДопС, так и ВхС напряжений через ноль, то, при соответствующем выборе  $\omega \Delta t$ , время определения параметров может составлять менее половины периода ВхС.



Рисунок 3.10 - Графики зависимости  $\delta_{ICK3}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 



Рисунок 3.11 - Графики зависимости  $\gamma_P$  от от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 



Рисунок 3.12 - Графики зависимости  $\gamma_Q$  от от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

Время измерения ИХГС при реализации данного метода во многом зависит от угла сдвига фазы ФБ и длительности интервала  $\omega \Delta t$ . Поскольку метод предусматривает возможность начала измерения как при переходе ДопС, так и ВхС напряжений через ноль, то, при соответствующем выборе  $\omega \Delta t$ , время определения параметров может составлять менее половины периода ВхС.

## 3.2 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов, измеренным в моменты переходов входного и дополнительного напряжений и тока через ноль

Следующий разработанный метод (ABE) исключает погрешность по модулю ФБ, поскольку при его реализации используются только МгЗ входных сигналов, и не предусматривает формирование дополнительных ИнтВ [101].

Метод основан на том, что в момент перехода BxC тока через ноль измеряют первое Mr3 входного напряжения; в момент перехода дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на произвольный угол Δα, через ноль, одновременно измеряют второе Mr3 входного напряжения и первое Mr3T; в момент перехода BxC напряжения через ноль измеряют второе Mr3T. ИXГC определяют по измеренным Mr3 сигналов.

ГП, поясняющие метод, приведены на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Графики процессов, поясняющие метод АВЕ

Входное и дополнительное напряжения и ток, имеющие МГС, соответствуют выражениям, аналогичным тем, что приведены в предыдущем методе.

В момент времени  $t_1$  перехода тока через ноль, МгЗ входной сигнал напряжения  $U_{11} = U_{m1} \sin(-\phi)$ .

В момент времени  $t_2$  перехода ДопС напряжения через ноль, МгЗ входного напряжения и тока соответственно равны:  $U_{12} = U_{m1} \sin(-\Delta \alpha)$ ;  $I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta \alpha)$ .

В момент времени  $t_3$  перехода BxC напряжения через ноль, Mr3T равно:  $I_3 = I_m \sin \varphi$ .

Определим следующий коэффициент  $l = \left| \frac{U_{11}}{I_3} \right| = \frac{U_{m1}}{I_m}$ , отражающий соотноше-

ние между амплитудными значениями напряжения и тока. С помощью данного коэффициента можно вычислить значение напряжения  $U'_{14} = l|I_2| = U_{m1}|\sin(\varphi - \Delta \alpha)|$ [87].

Используя МгЗ и выбирая угол сдвига фазы ДопС Δα<90°, можно получить выражения для определения основных ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока:

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|U_{11}U_{12}U_{14}'|}{\sqrt{4U_{14}'^2U_{11}^2 - (U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2)^2}};$$
(3.21)

$$I_{CK3} = \frac{\sqrt{2} |I_3 U_{12} U_{14}'|}{\sqrt{4U_{14}'^2 U_{12}^2 - (U_{14}'^2 + U_{12}^2 - U_{11}^2)^2}};$$
(3.22)

- активная и реактивная мощности:

$$P = \frac{|U_{11}U_{12}U'_{14}| \left[ I_3 \left( U'_{14}^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2 \right) - 2I_2 U'_{14} | U_{11} | \right]}{\sqrt{4U'_{14}^2 U_{11}^2 - \left( U'_{14}^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2 \right)^2}};$$
(3.23)

$$Q = \frac{I_3 |U_{11} U_{12} U_{14}'|}{\sqrt{4U_{14}'^2 U_{11}^2 - (U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2)^2}}.$$
(3.24)

Определение ИХГС в соответствии с (3.21) – (3.24) справедливо только в том случае, когда  $\phi \neq \pi p$ , где p=0; 1.

В случае если  $\phi = \pi p$ , измерение информативных параметров производится иным образом, что иллюстрируется ГП, приведены на рисунке 3.14.

Если в MB  $t_1$  входные сигналы напряжения и тока одновременно переходят через ноль, то производится измерение Mr3 через произвольный (в общем случае) ИнтВ  $\Delta t$ .



Рисунок 3.14 – Графики процессов, поясняющие метод ABE при  $\phi = \pi p$ 

Через ИнтВ  $\Delta t$  (в момент времени $t_2$ ) мгновенные значения ВхС напряжения и тока будут равны:  $U'_{12} = U_m \sin \omega t$ ;  $I'_2 = I_m \sin \omega t$ .

Через ИнтВ 2 $\Delta t$  (в момент времени  $t_3$ ) МгЗ сигналов примут вид:  $U'_{13} = U_m \sin 2\omega t$ ;  $I'_3 = I_m \sin 2\omega t$ .

Используя МгЗ сигналов, можно определить СКЗ напряжения и тока:

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}U_{12}'^2}{\sqrt{4}U_{12}'^2 - U_{13}'^2}; \ I_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|I_2'U_{12}'|}{\sqrt{4}U_{12}'^2 - U_{13}'^2}.$$

Если знаки вторых МгЗ входных сигналов напряжения и тока совпадают  $(signU_{12} = signI_2)$ , то  $\phi=0$ . При этом АкМ  $P = U_{CK3}I_{CK3}$ , а PeM Q=0.

Если вторые МгЗ входных сигналов напряжения и тока имеют противоположные знаки ( $signU_{12} \neq signI_2$ ), то  $\varphi = \pi$ . При этом АкМ  $P = -U_{CK3}I_{CK3}$ , а РеМ Q=0.

Проведем оценку предельного значения методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от МГС.

Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от PeC, то предельные значения АбсП определения информативных параметров сигналов в соответствии с (3.21) – (3.24) будут равны:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.25)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_3} \right| \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{14}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.26)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_3} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{14}'} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (3.27)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial Q}{\partial I_3} \right| \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{14}'} \right| \right) \Delta U_{\max} .$$
(3.28)

Используя предельные значения АбсП (3.25) – (3.28) и выражения (3.21) – (3.24), можно найти ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и ПрП определения активной и реактивной мощности:

$$\delta_{U_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \left| \sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi \sin \Delta \alpha} \right| + \left| \sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi - \cos \Delta \alpha \right| + \left| \sin \varphi \sin \Delta \alpha - \cos(\varphi - \Delta \alpha) \right| \right]}; \quad (3.29)$$

$$\delta_{I_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin \varphi|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi \sin \Delta \alpha|} ||\cos \varphi| + |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi - \cos \Delta \alpha| + |\cos \varphi \cos \Delta \alpha|]; \qquad (3.30)$$

$$\gamma_{P} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left| 1 + \cos \Delta \alpha \right|}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \left| \sin \varphi \right|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \left| \sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi \sin \Delta \alpha \right|} \times \left\{ \sin(\varphi - \Delta \alpha) \left[ \sin(\varphi - \Delta \alpha) + \cos \varphi \sin \Delta \alpha \right] - 1 - \cos^{2} \varphi \right] + \left| \cos^{3} \varphi \cos \Delta \alpha + \cos(\varphi - \Delta \alpha) \right| + \left| \cos \varphi \left[ 2 \cos \varphi \cos \Delta \alpha - \sin \varphi \sin \Delta \alpha \right] \right\};$$
(3.31)

$$\gamma_{Q} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \Delta \alpha|} \times [|\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \Delta \alpha - \cos \varphi| + |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi - \cos \Delta \alpha| + |\sin \varphi \sin \Delta \alpha - \cos(\varphi - \Delta \alpha)|].$$
(3.32)

Из выражений (3.29) – (3.32) следует, что погрешности определения ИХГС зависят не только от гармонического состава сигналов, но и от угла сдвига фаз между BxC напряжения и тока φ и угла сдвига фазы ΦБ Δα.

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ сигналов и ПрП определения мощностей активной и реактивной от  $\Delta \alpha$  и  $\varphi$  при наличии в сигналах 1-ой и 3-й гармоник с  $h_{u3}=h_{i3}=0,1\%$ , построенные согласно (3.29) – (3.32), показаны на рисунках 3.15 – 3.18.











Рисунок 3.16 - Графики зависимости погрешности δ<sub>ICK3</sub> от Δα и φ



Рисунок 3.18 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 

Анализ рисунков 3.15 – 3.18 показывает существенную зависимость погрешностей как от угла сдвига фаз между напряжением и током ф, так и от угла сдвига фазы ФБ [102].

При этом меньшие значения погрешностей имеют место для  $\Delta \alpha$ , соответствующих 70 - 90° (при  $\phi \neq \Delta \alpha$ ). В случае, если  $\phi = \Delta \alpha$ , знаменатели выражений (3.29) - (3.32) обращаются в ноль, что соответствует разрывам графиков на рисунках 3.15 – 3.18.

Анализ показывает, что, выбирая соответствующие значения угла Δα, можно значительно снизить погрешность, обусловленную отклонением PeC от MГC.

Схема ИИС, с помощью которой может быть реализован рассматриваемый метод, показана на рисунке 3.19.



Рисунок 3.19 – Схема ИИС, реализующей метод АВЕ

Использование аналого-цифрового преобразования МгЗ сигналов неизбежно приводит к погрешности квантования. Если считать, что при амплитудном значении напряжения  $U_{m1}$  МгЗН измеряется с погрешностью преобразования АЦП1, а при амплитудном значении тока  $I_m$  МгЗТ измеряются с погрешностью преобразования АЦП2, то абсолютная погрешность вычисления СКЗ сигналов и приведенных погрешностей АкМ и РеМ примут вид :

$$\delta_{U_{\text{CK3}}} = \frac{1}{2^{n} |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi \sin \Delta \alpha|} [|\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \Delta \alpha - \cos \varphi| + |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi - \cos \Delta \alpha| + |\sin \varphi \sin \Delta \alpha - \cos(\varphi - \Delta \alpha)]; \quad (3.33)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{1}{2^{n} |\sin \phi|} + \frac{\left[ |\cos \phi| + |\sin(\phi - \Delta \alpha) \sin \phi - \cos \Delta \alpha| + |\cos \phi \cos \Delta \alpha| \right]}{2^{n} |\sin(\phi - \Delta \alpha) \sin \phi \sin \Delta \alpha|}; \quad (3.34)$$

$$\gamma_{P} = \frac{|1 + \cos \Delta \alpha|}{2^{n} |\sin \phi|} + \frac{1}{2^{n} |\sin(\phi - \Delta \alpha) \sin \phi \sin \Delta \alpha|} \{ \sin(\phi - \Delta \alpha) [\sin(\phi - \Delta \alpha) + \cos(\phi - \Delta \alpha) ] \}$$

$$+\cos\varphi\sin\Delta\alpha] - 1 - \cos^{2}\varphi| + \left|\cos^{3}\varphi\cos\Delta\alpha + \cos(\varphi - \Delta\alpha)\right| + \left|\cos\varphi[2\cos\varphi\cos\Delta\alpha - \sin\varphi\sin\Delta\alpha]\right|; \qquad (3.35)$$
$$\gamma_{Q} = \frac{1}{2^{n}} + \frac{1}{2^{n+1}} \left[\left|\sin(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha - \cos\varphi\right| + \left|\sin(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha - \cos\varphi\right| + \left|\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha - \cos\varphi\right| + \left|\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha - \cos\varphi\right| + \left|\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha - \cos\varphi\right| + \left|\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)\cos\varphi(\varphi - \Delta\alpha)$$

$$+ |\sin(\varphi - \Delta \alpha) \sin \varphi - \cos \Delta \alpha| + |\sin \varphi \sin \Delta \alpha - \cos(\varphi - \Delta \alpha)|].$$
(3.36)

На рисунках 3.20 – 3.23 представлены графики зависимости погрешностей определения СКЗ сигналов, АкМ и РеМ согласно выражениям (3.33) - (3.36).





Рисунок 3.20 - Графики зависимости  $\delta_{\textit{UCK3}} \text{ от } \Delta \alpha \text{ и } \phi$ 

Рисунок 3.21 - Графики зависимости  $\delta_{\it ICK3}$  от  $\Delta \alpha$  и ф

Анализ рисунков 3.20 – 3.23 также показывает существенную зависимость погрешностей как от угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ , так и от угла сдвига фазы ФБ.

К существенным недостаткам метода можно отнести невозможность определения СКЗ напряжения при отсутствии тока в измерительной цепи.





Рисунок 3.22 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

Рисунок 3.23 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_0$  от от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$ 

Кроме того, при реализации метода при углах сдвига фазы между BxC напряжения и тока, близких к 0° (а такие углы, в большинстве случаев, являются наиболее часто встречающимися на практике), приводит к достаточно большим погрешностям измерения информативных параметров.

В данном методе не используются Mr3 дополнительного напряжения, а только его переходы через ноль, что устраняет погрешность по модулю ФБ. Кроме того, угол сдвига фазы ФБ  $\Delta \alpha$  может быть выбран произвольным 0< $\Delta \alpha$ <90°, что не приводит к угловой погрешности ФБ.

## 3.3 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов с использованием переходов ортогональных составляющих напряжения через ноль

Следующий разработанный метод (БВЕ) измерения ИХГС, в котором также используются только мгновенные значения ВхС напряжения и тока, предусматривает, в отличие от предыдущих, формирование ОртС напряжения.

91

Использование в качестве дополнительных сигналов ОртС обеспечивает простоту аппаратной реализации метода и дальнейшее сокращение времени измерения [103].

В соответствии с методом формируется ДопС напряжения, сдвинутый относительно входного на 90°; в момент перехода данного сигнала через ноль производится измерение МгЗ входного напряжения и тока; в момент перехода ВхС напряжения через ноль измеряется МгЗТ. Определение информативных параметров осуществляется по измеренным МгЗ.

Графики процессов, поясняющие метод, приведены на рисунке 3.24.



Рисунок 3.24 – Графики процессов, поясняющие метод БВЕ

В момент времени t<sub>1</sub>, когда ДопС напряжения переходит через ноль, МгЗН и

МгЗТ равны: 
$$U_{11} = U_m \sin\left(\pi l - \frac{\pi}{2}\right); I_1 = I_m \sin\left(\phi - \frac{\pi}{2} + \pi l\right)$$

Параметр *l* принимает значение 0 или 1 в зависимости от того, как осуществлялся переход через ноль дополнительного напряжения.

Если сначала ДопС  $u_2(t)$  переходил через ноль из отрицательной полуволны в положительную, то  $l=0, U_{11}=-U_m$  и  $I_1=-I_m\cos \varphi$ .

В случае, если сначала прозводился переход через ноль сигнала  $u_2(t)$  из положительной полуволны в отрицательную, то  $l=1, U_{11} = U_m$  и  $I_1 = I_m \cos \varphi$ .

 $I_2 = I_m \sin(\varphi + \pi l)$ . Для l=0  $I_2 = I_m \sin \varphi$ , а для l=1  $I_2 = -I_m \sin \varphi$ .

Учитывая полученные МгЗ сигналов, ИХГС будут определяться следующим образом:

$$U_{CK3} = \frac{|U_{11}|}{\sqrt{2}}; \tag{3.37}$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}}; \qquad (3.38)$$

$$P = \frac{U_{11}I_1}{2}; (3.39)$$

$$Q = -\frac{U_{11}I_2}{2}.$$
 (3.40)

Из выражений (3.37) – (3.40) видно, что для определения ИХГС используются достаточно простые арифметические операции.

При отклонении реального сигнала от МГС предельные АбсП определения параметров в соответствии с (3.37) – (3.40) будут принимать вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \qquad (3.41)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \qquad (3.42)$$

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| \Delta U_{\text{max}} + \left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| \Delta I_{\text{max}}; \qquad (3.43)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| \Delta U_{\text{max}} + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \Delta I_{\text{max}} \,. \tag{3.44}$$

Если учесть (3.41) – (3.44), то, используя (3.37) – (3.40), можно найти ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и ПрП определения АкМ и РеМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}};$$
(3.45)

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (|\cos \varphi| + |\sin \varphi|)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}}; \qquad (3.46)$$

$$\gamma_{P} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} |\cos \varphi|}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}}; \qquad (3.47)$$

$$\gamma_{Q} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} |\sin \varphi|}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}}. \qquad (3.48)$$

Из (3.45) видно, что ОтнП определения СКЗ напряжения зависит только от спектра BxC.

Остальные информативные параметры находятся с погрешностями, которые зависят еще и от угла сдвига фаз между входными напряжением и током  $\phi$ .

На рисунках 3.25. - 3.27 показаны графики зависимости ОтнП определения СКЗ тока и ПрП измерения АкМ и РеМ от  $\varphi$  при наличие в РеС 1-ой и 3-ей гармоник с коэффициентами  $h_{i3} = h_{u3} = 0,1\%$ , построенные согасно (3.46) - (3.48).



Рисунок 3.25 - График зависимости погрешности  $\delta_{I_{CK3}}$  от  $\phi$ 



Рисунок 3.26 - График зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\phi$ 



Рисунок 3.27 - График зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\varphi$ 

Из анализа рисунков 3.25 - 3.27 видно, что имеется существенная зависимость погрешностей определения параметров от угла  $\varphi$ . При этом погрешности измерения СКЗ тока и РеМ имеют меньшие значения в случае, если  $\varphi$  близко к  $\pi l/2$  и  $\pi l$  соответственно.

ПрП определения АкМ будет иметь меньшие значения при угле  $\phi$ , близком к $\frac{\pi}{2} + \pi l$ .

Разработанный метод может быть реализован с помощью следующей ИИС (рисунок 3.28).



Рисунок 3.28 – Схема ИИС, реализующей метод БВЕ

Используя выражения (3.37) – (3.40), можно определить ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и ПрП измерения AкM и PeM, обусловленные влиянием квантования Mr3 сигналов [104]:

$$\delta_{U_{\rm CK3}} = \frac{1}{2^n}; \tag{3.49}$$

$$\delta_{I_{\text{CK3}}} = \frac{|\cos \varphi| + |\sin \varphi|}{2^n}; \qquad (3.50)$$

$$\gamma_P = \frac{1 + \left|\cos\phi\right|}{2^n}; \tag{3.51}$$

$$\gamma_Q = \frac{1 + |\sin \varphi|}{2^n}.\tag{3.52}$$

Из выражения (3.49) видно, что погрешность определения СКЗ напряжения зависит только от разрядности АЦП *n*.

Остальные погрешности измерения ИХГС зависят еще и от угла сдвига фаз между BxC напряжения и тока  $\phi$ .

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения АкМ и РеМ от ф при при 12-разрядном АЦП, построенные с использованием выражений (3.50) - (3.52), приведены на рисунках 3.29 - 3.31.



Рисунок 3.29 – График зависимости погрешности определения СКЗ тока от ф



Рисунок 3.30 – График зависимости погрешности определения АкМ от ф



определения РеМ от ф

Из анализа рисунков 3.29 - 3.31 видно, что погрешности измерения ИХГС достаточно малы и не превышают 0,05% при 12-разрядном АЦП. Поэтому данным видом погрешности в общем случае можно пренебречь.

При реализации метода исключаются погрешности ФБ по напряжению, поскольку ДопС напряжения применяется только для определения перехода через ноль.

При реализации метода возможно возникновение частотной погрешности блока сдвига фазы, которую можно охарактеризовать отклонением угла сдвига фазы ФБ от 90°.

Пусть угол сдвига фазы ФБ будет отличаться от номинального на угол  $\Delta\beta$ . В этом случае выражения для МгЗ сигналов примут вид:  $U'_{11} = -U_m \cos \Delta\beta$  и  $I'_1 = -I_m \cos(\varphi + \Delta\beta)$ .

Используя данные МгЗН и МгЗТ и выражения (3.37) – (3.40), можно найти ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения АкМ и РеМ:

$$\delta_{U\beta} = |\cos \Delta\beta| - 1; \qquad (3.53)$$

$$\delta_{I\beta} = \sqrt{\sin^2 \varphi + \cos^2(\varphi + \Delta\beta)} - 1; \qquad (3.54)$$

$$\gamma_{P\beta} = \cos \Delta\beta \cos(\varphi + \Delta\beta) - \cos \varphi; \qquad (3.55)$$

$$\gamma_{O\beta} = \sin \varphi (\cos \Delta \beta - 1). \tag{3.56}$$

Выражение (3.53) указывает на то, что погрешность измерения СКЗ напряжения зависит только от Δβ.

График зависимости  $\delta_{U\beta}$  от  $\Delta\beta$ , построенный согласно (3.53), показан на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 - График зависимости погрешности  $\delta_{U\beta}$  от  $\Delta\beta$ 

Погрешности определения других ИХГС зависят еще и от угла сдвига фаз между BxC напряжения и тока ф.

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения АкМ и РеМ от φ и Δβ, построенные с использованием выражений (3.54) - (3.56), приведены на рисунках 3.33 - 3.35.

Анализ графиков, приведенных на рисунках 3.33 - 3.35, показывает, что при Δβ=0,1° погрешности не превышают 0,18%. При этом в окрестностях угла сдвига фазы φ=0° погрешности пренебрежимо малы.



Рисунок 3.33 – Зависимость погрешности  $\delta_{I\beta}$  от  $\Delta\beta$  и  $\phi$ 



Рисунок 3.34 - Зависимость погрешности  $\gamma_{P\beta}$  от  $\Delta\beta$  и  $\phi$ 

100



Рисунок 3.35 – Зависимость погрешности  $\gamma_{O\beta}$  от  $\Delta\beta$  и  $\phi$ 

При реализации данного метода время измерения достаточно мало и равно  $T_u = T_{_H} + T/4$  (где  $T_{_H}$  - ИнтВ с момента начала измертельного процесса до перехода ДопС или ВхС напряжения через ноль). Максимальное время измерения не првышает половины периода.

## 3.4 Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов на основе формирования дополнительных сигналов напряжения и использования их характерных точек

Следующий разработанный метод (АГЕ), как и метод АВЕ, также исключает погрешность по модулю ФБ, поскольку при его реализации используются только МгЗ входных сигналов, и не предусматривает формирование дополнительных ИнтВ. Однако не требует введения коэффициента, отражающего соотношение между амплитудными значениями напряжения и тока.

Метод основан на том, что формируют первый и второй ДопС напряжения, которые сдвинуты относительно входного по фазе на углы Δα и 2Δα соответственно в сторону опережения [105]. В MB, когда происходит переход второго дополнительного напряжения через ноль, измеряют первые Mr3 входного

напряжения и тока. В момент перехода первого ДопС напряжения через ноль измеряют вторые МгЗ входного напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным МгЗ входного напряжения и тока.

Графики процессов, поясняющие метод, приведены на рисунке 3.36.



Рисунок 3.36 – Графики процессов, поясняющие метод АГЕ

Если ВхС напряжения и тока соответствуют МГС  $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$  и  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), [106]$  то ДопС напряжения примут вид:  $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta \alpha),$  $u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + 2\Delta \alpha),$ 

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  и  $U_{m3}$ , – амплитудные значения входного и дополнительных напряжений.

В момент времени  $t_1$ , когда второе дополнительное напряжение переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, МгЗ напряжения и тока будут равны:  $U_1 = U_{m1} \sin(-2\Delta \alpha)$  и  $I_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta \alpha)$ .

В момент времени  $t_2$ , когда первый ДопС напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, МгЗ напряжения и тока принимают вид:  $U_2 = U_{m1} \sin(-\Delta \alpha)$  и  $I_2 = I_m \sin(\phi - \Delta \alpha)$ . Если использовать Mr3 сигналов при угле сдвига  $\Phi E \Delta \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ , то после преобразований получим выражения для определения основных ИХГС:

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2U_2^2}}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}};$$
(3.57)

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ I_2^2 + \frac{\left(2I_1U_2 - I_2U_1\right)^2}{4U_2^2 - U_1^2} \right]};$$
(3.58)

$$P = \frac{U_2 \left[ (I_2 U_1 - I_1 U_2) U_1 - 2U_2^2 I_2 \right]}{4U_2^2 - U_1^2};$$
(3.59)

$$Q = \frac{(I_2 U_1 - I_1 U_2)U_2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}.$$
(3.60)

Проведем оценку методической погрешности измерения ИХГС, обусловленной отклонением реального сигнала от МГС.

Предельные значения АбсП определения параметров сигналов будут равны:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_2} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.61)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_2} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (3.62)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_2} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.63)$$

$$\Delta Q = \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_2} \right| \right) \Delta U_{\max}.$$
(3.64)

Используя предельные значения АбсП (3.61) – (3.64) и выражения (3.57) – (3.60), можно определить ОтнП [14] определения СКЗ напряжения и тока и ПрП измерения АкМ и РеМ [107]:

$$\delta_{U_{\text{CK3}}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left( 2|\cos 2\Delta \alpha| + |\cos \Delta \alpha| \right)}{\left| \sin^3 \Delta \alpha \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \qquad (3.65)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left[ \cos(\varphi - \Delta \alpha) \right] + \left| \cos \varphi \right] \right]}{2 \left| \sin \Delta \alpha \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \left| \sin^3 \Delta \alpha \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left\{ \cos(\varphi - \Delta \alpha) \right] \left[ \cos(\varphi - 2\Delta \alpha) \right] + 2 \left| \sin \Delta \alpha \sin(\varphi - 2\Delta \alpha) + \cos(\varphi - \Delta \alpha) \right] + \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \sin^2 \Delta \alpha + 2 \left| \cos \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left| \sin^2 \varphi \right| \cos^2 \Delta \alpha + 2 \left|$$

$$\gamma_{Q} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left(1 + 2|\cos \Delta \alpha|\right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2|\sin^{3} \Delta \alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}}} \times \left[2\sin^{2} \Delta \alpha \sin(\varphi - \Delta \alpha) + \cos \Delta \alpha \sin \varphi\right] + 2|\sin \varphi - 2\sin^{3} \Delta \alpha \cos(\varphi - \Delta \alpha)|]. \quad (3.68)$$

Анализ (3.65) показывает, что погрешность определения СКЗ напряжения зависит от спектра сигнала и угла сдвига фазы ΦБ Δα.

График зависимости ОтнП измерения СКЗ напряжения от  $\Delta \alpha$  при наличии в сигналах 1-ой и 3-й гармоник с  $h_{u3}$ =0,1%, построенный согласно (3.65), показан на рисунке 3.37.

Из выражений (3.66) – (3.68) следует, что погрешности определения СКЗ тока, АкМ и РеМ зависят не только от гармонического состава сигналов и угла сдвига фазы ФБ Δα, но и от угла сдвига фаз между ВхС напряжения и тока φ.

На рисунках 3.38 – 3.40 показаны графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения мощностей активной и реактивной от  $\Delta \alpha$  и  $\varphi$  при наличии в сигналах напряжения и тока 1-ой и 3-ей гармоник с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$ , полученные согласно (3.66) – (3.68).











Рисунок 3.39 - Графики зависимости Рисунок 3.40 - Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$  погрешности  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 

Анализ рисунков 3.37 – 3.39 показывает, что, выбирая соответствующие значения угла Δα, можно значительно снизить погрешность, обусловленную отклонением PeC от MГС. При этом меньшие значения погрешностей имеют место при Δα=90°. Однако это увеличивает общее время измерения параметров.

Кроме того, погрешности измерения СКЗ тока, АкМ и РеМ зависят от угла сдвига фаз между ВхС напряжения и тока. В общем случае при измерении всего комплекса ИХГС (кроме СКЗ напряжения) погрешности уменьшаются в наиболее

105

важной для практического применения области значений угла сдвига фаз ф, близких к 0°.

Схема ИИС, с помощью которой может быть реализован рассматриваемый метод, показана на рисунке 3.41.



Рисунок 3.41 – Схема ИИС, реализующей четвертый метод АВЕ

Использование аналого-цифрового преобразования МгЗ сигналов приводит к погрешности квантования. Если считать, что при амплитудном значении напряжения  $U_{m1}$  МгЗН измеряется с погрешностью преобразования АЦП1, а при амплитудном значении тока  $I_m$  МгЗТ измеряются с погрешностью преобразования АЦП2, то АбсП вычисления СКЗ сигналов и ПрП определения АкМ и РеМ примут вид:

$$\delta_{U_{\text{CK3}}} = \frac{2|\cos 2\Delta\alpha| + |\cos \Delta\alpha|}{|\sin^3 \Delta\alpha| 2^n}; \qquad (3.69)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{|\cos(\varphi - \Delta \alpha)| + |\cos\varphi|}{|\sin\Delta\alpha|2^{n+1}} + \frac{1}{|\sin^{3}\Delta\alpha|2^{n+1}} \{\cos(\varphi - \Delta\alpha) | [\cos(\varphi - 2\Delta\alpha)] + 2|\sin\Delta\alpha\sin(\varphi - 2\Delta\alpha)] + \cos(\varphi - \Delta\alpha)] + \sin^{2}\Delta\alpha] + 2|\cos\varphi|\sin^{2}\Delta\alpha\}; \quad (3.70)$$

$$\gamma_{P} = \frac{|\cos\Delta\alpha| + 2|\cos\Delta\alpha|}{|\sin\Delta\alpha|2^{n}} + \frac{1}{|\sin^{5}\Delta\alpha|2^{n+1}} \{\sin^{2}\Delta\alpha|2\cos^{2}\Delta\alpha\times$$

$$\times \cos(\varphi - \Delta\alpha) + \sin\varphi\sin\Delta\alpha| + |2\cos\Delta\alpha[\cos(\varphi - \Delta\alpha)\sin^{4}\Delta\alpha - \sin\varphi] + \frac{1}{|\sin(\varphi - \Delta\alpha)\sin\Delta\alpha(2 - 3\sin^{2}\Delta\alpha)]}; \quad (3.71)$$

$$\gamma_{Q} = \frac{1 + 2|\cos\Delta\alpha|}{2^{n}} + \frac{1}{2^{n+1}|\sin^{3}\Delta\alpha|} \times \left[ 2\sin^{2}\Delta\alpha\sin(\varphi - \Delta\alpha) + \cos\Delta\alpha\sin\varphi \right] + 2|\sin\varphi - 2\sin^{3}\Delta\alpha\cos(\varphi - \Delta\alpha)| \right]. \quad (3.72)$$

На рисунках 3.42 – 3.45 представлены графики зависимости погрешностей определения СКЗ сигналов, АкМ и РеМ согласно выражениям (3.69) - (3.72) при 12-разрядном АЦП.



Рисунок 3.42 - График зависимости  $\delta_{UCK3}$  от  $\Delta \alpha$  при n=12



Рисунок 3.43 - Графики зависимости  $\delta_{ICK3}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$  при n=12



Рисунок 3.44 - Графики зависимости  $\gamma_P$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$  при *n*=12



Рисунок 3.45 - Графики зависимости  $\gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\varphi$  при *n*=12

Анализ графиков, представленных на рисунках 3.42 – 3.45, показывает, что их форма соответствует графикам, приведенным на рисунках 3.37 – 3.40, а погрешности отличаются только своими величинами.

При отличии углов сдвига фаз первого и второго ФБ моменты переходов второго и первого ДопС напряжений будут смещены, что приведет к возникновению погрешности измерения ИХГС.
Если считать, что угол сдвига фазы ФБ1 равен Δα, а ФБ2 - Δα+Δβ, то первые МгЗН и МгЗТ примут следующий вид:

$$U'_{1} = U_{m} \sin(-2\Delta\alpha - \Delta\beta); \ I'_{1} = I_{m} \sin(\varphi - 2\Delta\alpha - \Delta\beta)$$

При этом вторые МгЗН и МгЗТ останутся без изменения.

Используя МгЗ сигналов, можно найти погрешности определения ИХГС:

$$\delta_{U\beta} = \frac{2\sin^2 \Delta \alpha}{\sqrt{4\sin^2 \Delta \alpha - \sin^2 (2\Delta \alpha + \Delta \beta)}} - 1; \qquad (3.73)$$

$$\delta_{I\beta} = \left\{ \sin^2(\varphi - \Delta \alpha) + \frac{\left[ \cos(\Delta \alpha + \Delta \beta - \varphi) - \cos(\varphi - \Delta \alpha) \cos(2\Delta \alpha + \Delta \beta) \right]^2}{4\sin^2 \Delta \alpha - \sin^2(2\Delta \alpha + \Delta \beta)} \right\}^{\frac{1}{2}} - 1; \quad (3.74)$$

$$\gamma_{P\beta} = \frac{2\sin\Delta\alpha \left[2\sin^2\Delta\alpha\sin(\varphi - \Delta\alpha) - \sin\varphi\sin(\Delta\alpha + \Delta\beta)\sin(2\Delta\alpha + \Delta\beta)\right]}{4\sin^2\Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)} - \cos\varphi; \quad (3.75)$$

$$\gamma_{Q\beta} = \frac{2\sin\Delta\alpha\sin\phi\sin(\Delta\alpha + \Delta\beta)}{\sqrt{4\sin^2\Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} - \sin\phi.$$
(3.76)

Из анализа полученных выражений (3.73) - (3.76) видно, что погрешности определения ИХГС зависят от угла сдвига фазы ΦБ Δα и Δβ. Кроме того, ОтнП определения СКЗ тока и ПрП измерения АкМ и РеМ зависят еще и от угла сдвига фаз φ.

График зависимости ОтнП определения СКЗ напряжения от Δα при Δβ=0,1°, построенный согласно (3.73), приведен на рисунке 3.46.



Рисунок 3.46 - График зависимости  $\delta_{U\beta}$  от  $\Delta \alpha$ 

Графики зависимости ОтнП измерения СКЗ тока и ПрП определения АкМ и РеМ от φ и Δα при Δβ=0,1°, полученные согласно (3.74) - (3.76), показаны на рисунках 3.47 - 3.49.



Рисунок 3.47 - Графики зависимости  $\delta_{I\beta}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 

Рисунок 3.48 - Графики зависимости  $\gamma_{P\beta}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 



Рисунок 3.49 - Графики зависимости  $\gamma_{O\beta}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 

Из анализа рисунков 3.46 - 3.49 видно, что за счет соответствующего выбора угла сдвига фазы ФБ можно существенно уменьшить погрешности. При этом

меньшее значение погрешности имеет место при Δα=40÷90°, однако это приводит к увеличению общего времени измерения.

В случае, когда значения Δβ достаточно малы, при соответствующем выборе угла Δα данным видом погрешности можно пренебречь.

# 3.5 Метод определения параметров по мгновенным значениям сигналов на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов, разделенных в пространстве

Разработанный метод (БГЖ) измерения ИХГС основан на формировании двух ДопС напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол Δα.

Метод основан на том, что в момент равенства дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно BxC на угол Δα, и сигнала, инверсного входному, измеряют первые Mr3 входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного и входного напряжений измеряют вторые мгновенные значения BxC напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям.

ГП, поясняющие метод, приведены на рисунке 3.50.



Рисунок 3.50 – Графики процессов, поясняющие метод БГЖ

Если входные напряжение и ток имеют МГС:  $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ ;  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то ДопС напряжения примут вид:  $u_2(t) = -U_{m2} \sin \omega t$  и $u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + \Delta \alpha)$ .

Предположим, что амплитудные значения входного и дополнительных сигналов равны, то есть  $U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m$ . Тогда, в момент времени  $t_1$ , когда  $U_{21} = U_{31}$ , МгЗ сигналов примут вид:

 $U_{11} = U_m \sin \alpha_1; \ U_{21} = -U_m \sin \alpha_1; U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta \alpha); \ I_1 = I_m \sin(\alpha_1 + \phi),$ 

где  $\alpha_1$  - начальная фаза входного напряжения в MB  $t_1$ .

Равенство МгЗН  $U_{21} = U_{31}$  выполняется в том случае, если  $\alpha_1 = \alpha_1 + \Delta \alpha$ ( $\Delta \alpha \neq 0$ ), то есть, когда  $\Delta \alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$  или  $\alpha_1 = \pi l - \frac{\Delta \alpha}{2}$ , где l=0, 1.

Отсюда, при 
$$l=0$$
  $U_{11} = U_{m1} \sin\left(-\frac{\Delta\alpha}{2}\right)$ , а при  $l=1$   $U_{11} = U_m \sin\frac{\Delta\alpha}{2}$ , то есть

$$U_{11} = \pm U_m \sin \frac{\Delta \alpha}{2}$$
. В этом случае  $I_1 = I_m \sin \left( \pi l + \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right)$  или  $I_1 = \pm I_m \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right)$ .

В момент времени  $t_2$ , когда  $U_{12} = U_{32}$ , МгЗ сигналов будут равны:

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_2; U_{32} = U_m \sin(\alpha_2 + \Delta \alpha); I_2 = I_m \sin(\alpha_2 + \phi),$$

где  $\alpha_2$  - начальная фаза входного напряжения в MB  $t_2$ .

Равенство МгЗ сигналов  $U_{12} = U_{32}$  выполняется в том случае, если  $\alpha_2 = \alpha_2 + \Delta \alpha$ , то есть, когда  $\Delta \alpha = \pi + 2\pi l - 2\alpha_2$  или  $\alpha_2 = \frac{3\pi l}{2} - \frac{\Delta \alpha}{2}$ .

Отсюда, 
$$U_{12} = \pm U_m \cos \frac{\Delta \alpha}{2}$$
 и  $I_2 = \pm I_m \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right)$ .

Используя МгЗ сигналов, после преобразований получим выражения для определения ИХГС:

$$U_{CK3} = \sqrt{\frac{U_{11}^2 + U_{12}^2}{2}}; \qquad (3.77)$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}}; \qquad (3.78)$$

$$P = \frac{I_2 |U_{12}| - I_1 |U_{11}|}{2}; \qquad (3.79)$$

$$Q = \frac{I_1 |U_{12}| + I_2 |U_{11}|}{2}.$$
(3.80)

При отклонении PeC от МГС абсолютная погрешность определения характеристик сигналов в соответствии с (3.77) – (3.80) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.81)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \qquad (3.82)$$

$$\Delta P = \left( \left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \qquad (3.83)$$

$$\Delta Q = \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} .$$
(3.84)

Используя (3.77) – (3.84), можно определить ОтнП измерения СКЗ напряжения и тока и ПрП измерения АкМ и РеМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left( \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| \right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}};$$
(3.85)

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \sin\left(\varphi - \frac{\Delta \alpha}{2}\right) \right| + \left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta \alpha}{2}\right) \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}};$$
(3.86)

$$\gamma_{P} = \gamma_{Q} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left( \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| \right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[ \left| \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| + \left| \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^{2}} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^{2}}} \right|.$$
(3.87)

На рисунке 3.51 представлен график зависимости ОтнП измерения СКЗ напряжения от  $\Delta \alpha$  в соответствии с (3.85) при наличие в сигнале первой и третьей гармоник с  $h_{U3} = 0,1\%$ .



Рисунок 3.51. График зависимости погрешности  $\delta_{UCK3}$  от

На рисунках 3.52 и 3.53 представлены графики зависимости погрешности измерения СКЗ тока, АкМ и РеМ от  $\Delta \alpha$  и  $\varphi$  согласно (3.86) и (3.87) при наличие в сигналах первой и третьей гармоник с  $h_{U3} = h_{I3} = 0,1\%$ .





Рисунок 3.53 - Графики зависимости погрешностей γ<sub>P</sub>=γ<sub>Q</sub> от Δα и φ

Анализ выражений (3.85) – (3.87) и рисунков 3.51 - 3.53 показывает, что погрешности измерения ИХГС из-за отклонения РеС от модели гармонического сигнала зависят от спектра сигнала и угла сдвига фазы ФБ.

Кроме того, погрешности измерения СКЗ тока, АкМ и РеМ зависят также и от угла сдвига фаз между ВхС напряжения и тока.

Схема ИИС, с помощью которой может быть реализован рассматриваемый метод, показана на рисунке 3.54.



Рисунок 3.54 – Схема ИИС, реализующей метод БГЖ

В схему ИИС дополнительно добавлен инвертор ИНВ.

Использование аналого-цифрового преобразования МгЗ сигналов приводит к погрешности квантования. Если считать, что при амплитудном значении напряжения  $U_m$  МгЗН измеряется с погрешностью преобразования АЦП1, а при амплитудном значении тока  $I_m$  МгЗТ измеряются с погрешностью преобразования АЦП2 и погрешности обоих АЦП равны, то ОтнП вычисления СКЗ сигналов и ПрП определения АкМ и РеМ примут вид:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}{2^n}; \qquad (3.88)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\left|\sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right| + \left|\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right|}{2^{n}}; \qquad (3.89)$$

$$\gamma_{P} = \gamma_{Q} = \frac{\left|\sin\frac{\Delta\alpha}{2}\right| + \left|\cos\frac{\Delta\alpha}{2}\right|}{2^{n}} + \frac{\left|\sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right| + \left|\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)\right|}{2^{n}}. \qquad (3.90)$$

2<sup>*n*</sup>

116



Рисунок 3.55 - График зависимости  $\delta_{UCK3}$  от  $\Delta \alpha$  при n=12



Рисунок 3.56 - Графики зависимости  $\delta_{\mathit{ICK3}}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 



Рисунок 3.57 - Графики зависимости  $\gamma_P = \gamma_Q$  от  $\Delta \alpha$  и  $\phi$ 

Анализ графиков, представленных на рисунках 3.55 – 3.57, показывает, что их форма соответствует графикам, приведенным на рисунках 3.51 – 3.53, а погрешности отличаются только своими величинами. Кроме того, погрешности малы и при соответствующей разрядности АЦП ими можно пренебречь [108].

Анализ показывает, что в случае наличия погрешности по модулю ФБ ДопС напряжения примет вид  $u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + \Delta \alpha)$ .

В этом случае равенство МгЗ сигналов напряжения произойдет в MB  $t'_1$  и  $t'_2$ :

$$U'_{21} = U'_{31} = U_{m3} \sin(\alpha'_1 + \Delta \alpha)$$
 и  $U'_{12} = U'_{32} = U_{m3} \sin(\alpha'_2 + \Delta \alpha).$ 

Поскольку изначально считалось, угол сдвига Δα – произвольный, то это не приведет к погрешности, а сместит моменты равенства сигналов. Таким образом, метод и, реализующая его, ИИС инвариантны к погрешностям формирования ДопС.

Разработанный метод измерения ИХГС использует формирование ДопС напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного, и сигнала, инверсного входному. Поскольку инверторы, используемые для этих целей, могут обеспечивать погрешность в сотые доли процента, то это позволяет исключить угловую погрешность и погрешность по напряжению ИНВ.

### 3.6 Основные результаты и выводы

1. Доказано, что разделение МгЗ сигналов в пространстве за счет формирования ДопС напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных, обеспечивает, в ряде случаев, сокращение времени определения ИХГС.

2. Установлено, что все методы, инвариантные к погрешностям формирования дополнительных сигналов, можно условно разделить на методы с коррекцией и без последующей коррекции МгЗ сигналов.

3. Методы, использующие коррекцию МгЗ сигналов (методы ABД, ABE, AГE), требуют дополнительных вычислений и не могут полностью скорректировать погрешности по модулю ФБ. Кроме того, реализация методов ABE и AГE предусматривает обязательное наличие сигнала в канале тока.

4. В методах БВЕ и БГЖ используются только МгЗ входных сигналов, что автоматически исключают погрешности по модулю ФБ. Кроме того, методы АБЕ и БГЖ исключают угловую погрешность ФБ.

# 4 ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В четвертой главе проводится анализ основных контролируемых параметров электродвигателей и электронасосов, используемые при добыче нефти. Рассматриваются испытания погружных электродвигателей (ПЭД) в режиме холостого хода и короткого замыкания. Анализируется гармонический состав сигнала, формулируются требования к характеристикам ИИС.

Разработана ИИС стендовых испытаний ПЭД и проведен анализ ее работы в режимах холостого хода и короткого замыкания.

### 4.1 Работа асинхронных двигателей при отклонениях частоты, напряжения и нагрузки от нормальных значений

В практике эксплуатации достаточно часто встречаются длительные отклонения напряжения и частоты от номинальных значений. В некоторых случаях эти отклонения достигают значительных величин. Кроме того, встречается необходимость использования двигателей для работы в сети с напряжением и частотой, отличных от номинальных величин, указанных на щитке двигателя. Данный случай возможен:

- при использовании двигателей, рассчитанных на частоту 60 пер/сек,

- при работе двигателя с номинальным напряжением 3 кВ, имеющего соединение обмотки статора в звезду, в сети 2 кВ с переключением обмотки статора в треугольник,

- при работе незагруженных двигателей с переключением обмотки статора на звезду вместо нормального соединения треугольником и т.п.

В первую очередь рассмотрим ситуации, которые происходят в двигателе при отклонении напряжения и частоты от нормальных значений. При этом нас будут интересовать изменение AкM и PeM и тока статора, потребляемые двигателем из сети, тока ротора, потерь, числа оборотов ротора и нагрева активных частей двигателя.

### 4.1.1 Изменение частоты при нормальном напряжении

Анализ аварий показывает, что до сих пор имеют место массовые отключения асинхронных двигателей при снижениях напряжения, вызванных короткими замыканиями в сети. Эти отключения производятся защитой от понижения напряжения мгновенного действия и неправильно настроенной максимальной защитой двигателей, фидеров и др. Основная ошибка заключается в том, что в одной максимальной защите совмещают защиту от коротких замыканий и защиту от перегрузки. В результате защита имеет задержку времени, а ток трогания защиты выбирается незначительно отличающимся от номинального тока двигателя.

Наличие максимальной защиты от коротких замыканий с выдержкой времени приводит к тому, что короткие замыкания отключаются медленно, за время короткого замыкания число оборотов двигателей значительно снижается, сопротивление двигателей падает, вследствие чего увеличиваются пусковые токи при восстановлении напряжения и защита отключает двигатели.

Кроме этого при коротких замыканиях имеет место массовое отключение двигателей, которые имеют защиту минимального напряжения без выдержки времени или с небольшой выдержкой времени. В энергосистемах такое массовое отключение нагрузки приводило к аварии и полному отключению систем.

В эксплуатации двигатель неизбежно подвергается перегрузкам не только по технологическим причинам, а так же из-за потребления повышенных токов при восстановлении напряжения после отключения частичного или удаленного короткого замыкания, когда напряжение было больше уставки защиты минимального напряжения.

Громадное значение для повышения надежности работы асинхронных двигателей имеют продолжительность короткого замыкания или перерыва при переключении с одного источника питания на другой. Как было показано выше, сопротивление асинхронного двигателя весьма резко уменьшается при сравнительно небольшом увеличении скольжения [109].

Правильная эксплуатация электродвигателей возможна только в том случае, когда эксплуатационному персоналу известны основные параметры двигателя.

Особенно это важно при решении таких вопросов, как самозапуск, выбор уставок релейной защиты, определение числа повторных пусков и т. п.

### 4.2 Приемо-сдаточные испытания погружных электродвигателей

Особое внимание необходимо обращать на приемные испытания ПЭД после монтажа. Проверка параметров двигателей во время эксплуатационных испытаний дает возможность своевременно обнаружить и устранить тот или иной дефект. Учитывая, что количество двигателей довольно велико, не следует усложнять программы испытания, ограничиваясь только теми испытаниями, которые нужны в эксплуатации. Основные технические характеристики ПЭД представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики ПЭД

Тип ПЭД	N, ĸBT	U, B	I,A	КПД, %	cosφ
ЭДБС450-13085 «Борец»	450	3000	123	82,5	0,86
ПЭД160-117М1В5 «Новые тех-	160	2500	52	81,4	0,84
нологии»					
ПЭДС-Я-360-117 М585 «Ал-	360	4380	70	84,5	0,84
маз»					

Результаты всех испытаний должны немедленно обрабатываться на месте с тем, чтобы иметь возможность произвести повторные измерения при получении неправильных результатов.

#### 4.2.1 Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания при неподвижном роторе производится для определения параметров двигателя, необходимых для выбора уставок релейной защиты, определения начального момента и пускового тока и для проверки правильности соединения обмотки и состояния паек обмотки ротора. Обычно опыт короткого замыкания производится при пониженном напряжении. Как известно, активное и реактивное сопротивления рассеяния двигателя зависят от величины тока. Поэтому пересчет данных, полученных из опыта короткого замыкания при пониженном напряжении к номинальному напряжению, может привести в некоторых случаях к значительным погрешностям. Поэтому иногда целесообразно проведение опыта короткого замыкания при нормальном напряжении [110].

Опыт короткого замыкания может производиться при питании обмотки статора напряжением трехфазного тока или напряжением однофазного тока. При опыте короткого замыкания обмотка ротора должна быть замкнута накоротко.

Необходимо обращать внимание на правильность включения ваттметров (в схеме Арона) и на то, чтобы концы от вольтметра и от обмотки напряжения ваттметров были присоединены непосредственно к зажимам двигателя. При несоблюдении этого могут иметь место большие погрешности, так как сопротивления обмоток амперметра и ваттметра могут быть соизмеримы с сопротивлением обмоток двигателя, а для низковольтных мощных двигателей даже превосходить сопротивление двигателя.

При питании однофазным током схема измерения упрощается и практически исключается возможность ошибки при измерении мощности. При опыте короткого замыкания производится измерение мощности напряжения и тока.

При питании однофазным током измерение производится поочередно для каждой пары фаз обмотки статора.

Возможны следующие замыкания:

- между витками одной катушки;

- между катушками или катушечными группами одной фазы;

- между катушками разных фаз.

При коротких замыканиях в обмотках образуются замкнутые цепи. В этих цепях вращающийся поток индуктирует ЭДС и при хорошем контакте в месте соприкосновения в замкнутых цепях могут циркулировать токи большой силы. Величина тока зависит от величины полного сопротивления замкнутых накоротко витков или катушек. Токи в короткозамкнутых контурах нагревают обмотку до появления дыма и расплавления паек. Более или менее длительная работа машины при наличии короткого замыкания может вызвать перегорание обмотки и повреждение деталей. Короткие замыкания в обмотках переменного тока всегда сопровождаются характерным для них сильным гудением и неравномерным распределением тока в линейных проводах.

При значительных коротких замыканиях в обмотках электродвигателей пуск их становится невозможным, ибо автоматы срабатывают, а плавкие предохранители перегорают, так как двигатель в это время потребляет большой неравномерно распределенный по фазам ток. Если замыкания в обмотке происходит во время работы двигателя, то возможна и его остановка.

Если при коротких замыканиях в обмотке асинхронного двигателя пуск его удается осуществить, то момент его, а также число оборотов оказываются пониженными.

В синхронном двигателе при наличие коротких замыканий в статорной обмотке, кроме изложенных явлений, наблюдается затруднения при входе двигателя в синхронизм, а при значительном короткозамкнутом контуре синхронирование может оказаться даже невозможным.

При замыкании в обмотке ротора асинхронного двигателя последний плохо разворачивается при пуске, идет рывками, сила тока в статоре колеблется, что особенно заметно в начале пуска. Двигатель не достигает нормального числа оборотов и не принимает нагрузки – затормаживается, слышится сильное гудение. Интенсивность проявления указанных явлений зависит от числа короткозамкнутых витков. При большом числе короткозамкнутых витков ротор может начать вращаться даже при выключенном реостате.

### 4.2.2 Опыт холостого хода

Опыт холостого хода производится для проверки работы двигателя без нагрузки. При опыте холостого хода обычно вполне достаточно произвести только измерение тока статора. В измерении мощности, потребляемой двигателем при холостом ходе, нет необходимости.

# 4.3 Информационно-измерительная система контроля параметров погружных электродвигателей

При разработке стенда для испытаний ПЭД проведен анализ применимости пяти разработанных методов измерения ИХГС. Анализ показал рекомендуемые системы применения каждого из методов в зависимости от значений их основных характеристик (относительная максимальная погрешность измерения ИХГС в зависимости от угла сдвига фаз входных и дополнительных сигналов Δα и быстродействия). В таблице 4.2 приведены сведения о предпочтительном использовании этих методов измерений в различных условиях.

Обозначе-	Характеристики метода	Области применения
ние метода	(относительная макс.	
	погрешность измерения	
	ИХГС в зависимости от	
	Δα, быстродействие)	
АВД	$\delta = 5\%$ ,	Метод применим для контроля аварий-
	время измерения	ных и предаварийных ситуаций высоко-
	не более 7 мс	вольтного оборудования, в связи с тем,
		что обладает достаточно большим быст-
		родействием и отсутствует угловая по-
		грешность ФБ.
ABE	$\delta = 18\%$ ,	Метод применим при построении систем
	время измерения	приемо-сдаточных испытаний силовых
	не более 5 мс	трансформаторов в связи с возможно-
		стью оперативного контроля аварийных
		режимов. Данный метод обладает боль-
		шой погрешность измерения информа-
		тивных параметров, которая не влияет на
		время измерения.

Таблица 4.2 – Области применения разработанных методов измерения ИХГС

Продолжение таблицы 4.2 - Области применения разработанных методов

Обозначе-	Характеристики метода	Области применения
ние метода	(относительная макс.	
	погрешность измерения	
	ИХГС в зависимости от	
	Δα, быстродействие)	
БВЕ	$\delta = 0,35\%,$	Метод прост в реализации, рекомендует-
	время измерения	ся для контроля ИХГС и оперативного
	не более 10 мс	управления средствами защиты мощного
		электрооборудования.
ΑΓΕ	$\delta = 1,4\%,$	Метод применяется при построении ав-
	время измерения	томатических систем контроля электро-
	не более 12 мс	энергии, в которых не требуется высокое
		быстродействие, так как снижение по-
		грешности по модулю ФБ приводит к
		увеличению общего времени измерения.
БГЖ	$\delta = 0,28\%,$	Метод применяется в системах защит
	время измерения	силового электрооборудования, в связи с
	не более 4 мс	тем, что обладает высоким быстродей-
		ствием и отсутствует угловая погреш-
		ность и погрешность по модулю ФБ.

### измерения ИХГС

Как показали исследования, форма контролируемых сигналов напряжения и тока близка к синусоидальной, коэффициенты несинусоидальности не превышают 5%, вследствие этого для построения системы испытаний электрических параметров электродвигателей, с точки зрения сокращения времени и повышения точности измерении, был использован пятый разработанный метод измерения ИХГС, основанный на определении интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенных в пространстве, с формированием двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол, рассмотренный в разделе 3.5.

На основе исследованного метода была разработана ИИС стендовых испытаний ПЭД и проведен анализ ее работы в режимах холостого хода и короткого замыкания. Структурная схема ИИС представлена на рисунке 4.1



Рисунок 4.1 - Структурная схема ИИС

В состав ИИС входят:

- первичные преобразователи напряжения ППН1 ППН3;
- первичные преобразователи тока ППТ1 ППТ3;
- инвертор ИНВ;
- фазосдвигающий блок ФБ;
- аналоговые коммутаторы АК1 АК2;
- аналого-цифровые преобразователи АЦП1 АЦП2;
- компараторы КОМП1 КОМП2;
- контроллер КНТ;

- блок цифро-аналогового преобразования ЦАП;
- шина данных ШД;
- шина управления ШУ.

Модуль содержит микроконтроллер, реализующий разработанный алгоритм измерения, на основе метода БГЖ измерения интегральных характеристик, с использованием инвертирования входного сигнала напряжения и центральный компьютер с периферийными устройствами. Технические характеристики ИИС представлены в Приложении В.

Компьютер с помощью специального программного обеспечения обеспечивает управление универсальным ИИС, прием данных, вывод результатов на монитор и принтер, составление и сохранение протоколов испытаний. ИИС регистрирует входные сигналы, преобразует их в цифровой код, обрабатывает и передает в компьютер. Протоколы тестирования ПЭД представлены в Приложении Г.

Внешний вид стенда представлен в Приложении А.

Технические характеристики стенда испытаний представлены в Приложении Б.

### 4.4 Основные результаты и выводы

1. В функционирования разработанной ИИС контроля основу электрических параметров электродвигателей заложен метод измерения интегральных характеристик по МгЗ сигналов, разделенных в пространстве. Разработанная система позволяет измерять весь комплекс ИХГС.

2. Экспериментальные исследования показали, что разработанная ИИС обеспечивает измерение среднеквадратического напряжения и тока с основной относительной погрешностью менее 0,1 %, а активной и реактивной мощности с основной ПрП менее 0,1%.

3. Разработанная ИИС стендовых испытаний погружных электродвигателей внедрён в Самарском филиале с Ограниченной ответственностью «РН-Ремонт НПО» (г. Отрадный), а так же в ООО «Инженерные технологии» (г. Самара), что подтверждается актами внедрения (Приложение Д).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе направлены на создание информационно-измерительной системы, позволяющей повысить производительность стендовых испытаний погружных электродвигателей в режимах холостого хода и короткого замыкания, увеличить точность измерения основных электрических параметров.

### В работе получены следующие основные результаты:

1. Обоснована возможность использования аппроксимационного подхода к решению задач оперативного измерения и контроля параметров силового электрооборудования, позволившая разработать новые методы оперативного измерения таких параметров.

2. На основе классификации известных аппроксимационных методов и средств измерения ИХГС предложены новые методы их измерения, характеризуемые высоким быстродействием и малой погрешностью. Установлено, что все разработанные новые методы, инвариантные к погрешностям формирования дополнительных сигналов, можно разделить на методы с коррекцией и без последующей коррекции мгновенных значений сигналов.

3. Предложены новые методы и средства измерения ИХГС по мгновенным значениям напряжений и токов в силовых цепях электрооборудования с повышенными метрологическими характеристиками. Показано, что разделение мгновенных значений сигналов в пространстве за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных, обеспечивает сокращение времени определения параметров гармонических сигналов на 15%, что в отличие от существующих методов определения ИХГС позволяет выявить аварийные режимы электрооборудования за время менее полупериода периода анализируемых сигналов.

4. Исследованы методические погрешности новых методов определения ИХГС, а также разработаны способы их корректировки. Анализ существующих

методов и систем измерения информационных интегральных характеристик, основанных на формировании ортогональных составляющих сигналов, выявил наличие частотной погрешности фазосдвигающих блоков ИИС, значительно снижающей точность измерения даже в узком диапазоне изменения частоты. Показано, что использование предложенных методов измерения ИХГС позволяет снизить эту погрешность на 40%.

5. Разработана автоматизированная ИИС контроля электрических параметров силового электрооборудования, характеризуемая высоким быстродействием и точностью. Разработанная система использует новый метод определения всего комплекса информационных интегральных характеристик, характеризуемый коррекцией погрешностей фазосдвигающих блоков ИИС. Такая система, реализующая предложенный метод, позволяет проводить измерения за время не более четверти периода, с минимальными аппаратными затратами. Проведенные экспериментальные исследования показали, что разработанная система позволяет оперативно определять информативные параметры силового электрооборудования для предотвращения аварийных режимов.

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АбсП	Абсолютная погрешность
АкМ	Активная мощность
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
ВГС	Высшая гармоническая составляющая
BxC	Входной сигнал
ГП	Графики процессов
ДопС	Дополнительный сигнал
ИИС	Информационно-измерительная система
ИНВ	Инвертор
ИнтВ	Интервал времени
ИХГС	Интегральные характеристики периодических сигналов
ИХПС	Интегральные характеристики гармонических сигналов
Кнт	Контроллер
Комп	Компаратор
MB	Момент времени
МгЗ	Мгновенное значение
МгЗН	Мгновенное значение напряжения
МгЗТ	Мгновенное значение тока
H-O	Нуль-орган
ОтнП	Относительная погрешность
ОртС	Ортогональные составляющие
ПП	Первичный преобразователь
ПрП	Приведенная погрешность
PeM	Реактивная мощность
PeC	Реальный сигнал
СКЗ	Среднеквадратическое значение
ФБ	Фазосдвигающий блок
ШД	шина данных
ШУ	шина управления

## БИБЛИОГАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев, Т.М. Измерительная техника: Учебное пособие для техн. Вузов / Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

 Анашкин, С.В. Автоматизированный анализ нештатных ситуаций в электрических сетях / С.В. Анашкин, С.В. Карташов, Ю.Я. Любарский, А.Г. Мирошкин // Электрические станции. – №9. – 2013. – С. 49 – 53.

3. Гореликов, Н.И. Измерительные преобразователи интегральных характеристик сигналов сложной формы / Н.И. Гореликов, О.Л. Николайчук // ЦНИИТЭИ приборостроения. – 1981. – Вып. 3. – 32 с.

4. Лаппе, Р. Измерения в энергетической электронике / Р. Лаппе, Ф. Фишер. –М.:
Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.

5. Безикович, А.Я. Измерение электрической мощности в звуковом диапазоне частот / А.Я. Безикович, Е.З. Шапиро. – Л.: Энергия, 1980. – 168 с.

6. Волгин, Л.И. Измерительные преобразователи переменного напряжения в постоянное / Л.И. Волгин. – М.: Сов. радио, 1979. – 240 с.

7. Кизилов, В.У. Аналоговые измерительные преобразователи мощности / В.У. Кизилов // Измерение, контроль, автоматизация. – 1976. – Вып. 1(5). – С. 55-63.

 Кизилов, В.У. Методы и средства измерения активной и реактивной мощности в трехфазных цепях / В.У. Кизилов // Приборы и системы управления. – 1985. -№10. – С. 26-28.

9. Попов, В.С. Измерение среднеквадратического значения напряжения / В.С. Попов, И.Н. Желбаков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.

10. Орнатский, П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский – Киев: Вища школа, 1986. – 504 с.

11. Кирьяков, В.П. Об одном методе обработки результатов прямых измерений для определения действующих значений периодических напряжений произвольной формы / В.П. Кирьяков // Автометрия. – 1967. – № 2. – С. 17-22.

12. Левин, М.И. Определение параметров периодических сигналов путем измерения их мгновенных значений / М.И. Левин, Ю.И. Семко // Автометрия. – 1966. – № 1. – C. 33-40.

13. Пат. 3959724 США. Rochester Instrument Systems Inc. / R.L. Kraley, E.A. Hauptmann, B.M. Pressman. №490783; заявл. 22.07.74; опубл. 25.05.76. Бюл. №5.

14. Туз, Ю.М. Цифровой малокосинусный ваттметр / Ю.М. Туз, О.П. Синицкий,
В.И. Губарь // Новые электронные приборы: Сб. науч. тр. – Киев: КПИ, 1972. – С.
3-6.

15. Marzetta, Lois A. An evaluation of three-voltmeter method for AC power measurement / Lois A. Marzetta // IEEE Trans. On Instrum. and Measur.  $-1972. - V. 21. - N_{24}. - P. 353-357.$ 

16. Germer, H. Electronic method with direct time encoding for precision measurement of electric power over a wide range of frequency / H. Germer // IEEE Trans. On Instrum. and Measur.  $-1972. - V. 21. - N \cdot 4. - P. 350-353.$ 

17. Smith, Y.R. Rapid detection and mesurement of 3-phase reactive power, power and power-factor / Y.R. Smith // Electron. Lett. – 1972. – V. 8. – №23. – P. 574, 575.

Clarke, F.J.J. Principles and theory of wattmeters operating on the base of regulary spaced sample pairs / F.J.J. Clarke, J.R. Stockton // J. Phys. Ser. E. Sci. Instr. – 1982. – V. 15. – №6. – P. 645-652.

19. Клисторин, И.Ф. Методы определения интегральных характеристик переменных напряжений путем обработки их мгновенных значений / И.Ф. Клисторин,
И.И. Коршевер // Автометрия. – 1967. – № 2. – С. 3-16.

20. Клисторин, И.Ф. Определение интегральных характеристик напряжений произвольной формы путем обработки результатов измерения мгновенных значений / И.Ф. Клисторин, И.И. Коршевер // Автометрия. – 1966. – № 2. – С.28-40.

21. Клисторин, И.Ф. Цифровые вольтметры действующих значений (обзор принципов построения и перспективы развития) / И.Ф. Клисторин // Автометрия. – 1966. – № 2. – С. 3-11.

22. Кудряшов, Э.А. Терморезонансные преобразователи / Э.А. Кудряшов // Приборы и системы управления. – 1972. – № 2. – С. 33-35.

23. Yang, A.H. Digitale Drehstorm – Mebeinheit / A.H. Yang, M. Steidentop // Regelugstechn. Prax. – 1982. – V. 24. – №6. – P. 197-203. 24. Petrovic, P.B. A method of measuring the integral characteristics of a signal / P.B. Petrovic // Measurement Techniques. – 2013. – V. 56, №2. – P. 185-194.

25. Jiekang, W. High-accuracy, wide-range frequency estimation methods for power system signals under nonsinusoidal conditions / W Jiekang, L Jun, W Jixiang // IEEE Transactions. Power Delivery. – 2005. - V. 20. №1. – P. 366–374.

26. Petrovic, P.B. A new method of determining the amplitude and phase of an alternating signal / P.B. Petrovic, M.P. Stevanovic // Measurement Techniques. – 2010. – V.
53. №8. – P. 903-910.

27. Агамалов, Ю. Р. Алгоритм измерения вектора гармонического сигнала, инвариантный к помехам, описываемым периодическими функциями / Ю. Р. Агамалов // Измерительная техника. - 2012. - № 12. - С. 43-46.

28. Агамалов, Ю. Р. Метод измерения векторов совместно действующих гармонических сигналов на основе их дискретизации и суммирования дискрет / Ю. Р. Агамалов // Метрология. - 2010. - №12. - С. 26-35.

29. Zhelbakov, I.N. Circuits with Operational Amplifiers: Laboratory works / I.N. Zhelbakov - Moscow: Publishing House MPEI, 2000.- 56 pp.

30. Dugan, R.C. Electrical Power Systems Quality / R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty // McGraw-Hill, 1996. - 265 c.

 Муха, Ю.П. Информационно-измерительные системы с адаптивными преобразованиями. Управление гибкостью функционирования: монография / Ю.П.
 Муха, О.А. Авдеюк, И.Ю. Королева. – Волгоград: ВолгГТУ, 2010. – 303 с.

32. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

33. Батищев, В.И. Измерительно-моделирующие технологии определения параметров энергообъектов / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. - № 4. – С. 66-69.

34. Батищев, В.И. Измерительно-моделирующий подход к определению интегральных характеристик периодических сигналов / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. - № 6. – С. 36-39. 35. Батищев, В.И. Использование аппроксимационного подхода для сокращения времени обработки измерительной информации / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев // Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий. Инфо-2007: Мат. междунар. науч.-практ. конф. – Сочи, 2007. – С. 67-71.

36. Батищев, В.И. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.

37. Батищев, В.И. Аппроксимационный подход к построению промышленных систем измерений, контроля и испытаний / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев // Татищевские чтения: Актуальные проблемы науки и практики. Информационные технологии в организации производства: Материалы V юбилейной междунар. науч.практ. конф. – Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева, 2008. – С. 3-16.

38. Мелентьев, В.С. Методы оценки погрешности аппроксимационных методов измерения параметров сигналов / В.С. Мелентьев, А.В. Цапаев, А.Н. Болотнова // Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГТА, 2006. – Вып. 4. – С. 46-48.

39. Мелентьев, В.С. Методы оценки соответствия модели реальному сигналу в системах обеспечения безопасности / В.С. Мелентьев, Е.Е. Макарова, А.Н. Болотнова // Актуальные проблемы информационной безопасности при противодействии криминалу и терроризму. Теория и практика использования аппаратнопрограммных средств: Материалы 1-го Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 121-125.

40. Мелентьев, В.С. Аппроксимационный подход к измерению и оценке результирующей погрешности измерения реактивной мощности и коэффициента мощности сигналов, близких к гармоническим / В.С. Мелентьев // Вестник Самарск. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – Самара: СамГТУ. – 2008. - №1(21). – С. 83-90.

41. Ланге, П.К. Аппроксимационные методы и средства обработки измерительных сигналов / П.К. Ланге, Е.Е. Ярославкина // Lambert Academic Publishing. – Dusseldorf. – Germany- 2017. – 236 c 42. Лычев, А.О. Автоматизированная информационно-измерительная система интегральных характеристик периодических сигналов и контроля режимов работы энергообъектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / Лычев Александр Олегович. Самара, 2014 – 179 с.

43. Нефедьев, Д.И. Сокращение времени измерения параметров за счет использования мгновенных значений входных и дополнительных гармонических сигналов / Д.И. Нефедьев, В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Поздеева // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – Пенза-2016. -№1(15). – С 48-55

44. Борисов, Р.К. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости на электроэнергетических объектах в современных условиях / Р.К. Борисов, Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко // Техн. електродинамика: Тем. вип. «Проблеми сучасной электротехники». — 2002. — №4. — С.99—103.

45. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость электротехнологических установок и питающих сетей / Г.Я. Вагин, Б.П. Борисов // Техн. электродинамика. — 1986. - № 2. - С. 35-39.

46. Липковский, К.А. Особенности электропитания «энергоэффективных потребителей» / К.А. Липковский, В.В. Кирик, А.Ф. Жаркий, А.В. Самков // Техн. електродинаміка: Тем, вип. «Моделювання електронних, енергетичних та технологічних систем». — 1999. — Ч.1. — С. 94—96.

47. Москаленко, Г.Л. Высшие гармоники в системах электроснабжения / Г.Л. Москаленко, В.А. Пономарев, А.Ф. Жарким, А.В. Козлов // Обзор отечественных и зарубежных литературных источников. — Киев: 1988. — 41 с.

48. Помешкин, П.В. Влияние электромагнитных помех на работу электронной аппаратуры в условиях строительной площадки / П.В. Помешкин // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. наук. пр. — Київ: 1н-т електродинаміки НАН України, 2003. – №1 (4). - С. 118-122.

49. Cortina, R.f De Pasquali Ff Giraldi A. La protezione dalle interferenze electromagnetiche dei sistemi di automazione delle centrali termiche e nucleari / R.f Cortina, Ff De Pasquali, A. Giraldi // L'eneigia ellectrica. — 1989. — №6. — P. 157—281.

50. Immesberger, B. Nenzstorungen und schutzmasnahmer / B. Immesberger // Elec-

tronic — 1982. — №5. P. 91—94.

51. Ruhlmann, R. EinfiUsse von Oberschwingungen aus dem Ubergelagerten Netz / R. Ruhlmann // Elektrotechnik. — 1983. — №22. — P. 16—18.

52. Жаркий, А.Ф. Анализ величины искажений синусоидальности кривых токов и напряжений в электрических сетях жилых или общественных зданий / А.Ф. Жаркий // Техн. електродинаміка. — 2003. — № 2. — С. 62—66.

53. Жаркий, А.Ф. Искажение синусоидальности кривых токов и напряжений в низковольтных сетях при различных значениях загрузки питающего трансформатора / А.Ф. Жаркий // Техн. електродинаміка. — 2001. — № 6. — С. 43 — 45.

54. Жаркий, А.Ф. Моделирование фильтрации высших гармоник в низковольтных электрических сетях / А.Ф. Жаркий, Н.Н. Каплычный // Техн. електродинаміка: Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — 2003. — Ч. 2. — С. 117-119.

55. Жаркий, А.Ф. Методика определения коэффициента искажения синусоидальности кривых фазных напряжений в низковольтных электрических сетях / А.Ф.
Жаркий // Техн. електродинаміка. — 2003. — № 4. — С. 68—72.

56. Жаркий, А.Ф. Определение несинусоидальности токов и напряжений в электрических сетях жилых или общественных зданий / А.Ф. Жаркий // Техн. електродинаміка. — 2003. — № 1. — С. 52—56.

57. Жежеленко, И. В. Особенности выбора параметров фильтров высших гармоник для электрических сетей напряжением до 1000В / И.В. Жежеленко, А.М. Липский, В.Е. Кривоносое // Пробл. электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Третий Всесоюз. науч.-техн. совещание.: Тез. докл. — Таллинн: Ин-т термофизики и электрофизики АН ЭССР, 1986. - Ч.З. - С. 125-126.

58. Жежеленко, И. В. Проблемы качества электроэнергии / И.В. Жежеленко,
Ю.Л. Саенко // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2002. — № 4.
— С. 13—26.

59. Кузнецов, В.Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк. — Киев:

Наук, думка, 1992. — 240 с.

60. ГОСТ 32144 – 2013 Электрическая энергия. Совместимость техническихсредств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

61. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пром. предприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 266 с.

62. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в сетях промпредприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.

63. Мелентьев, В.С. Информационно-измерительные системы контроля и испытаний энергообъектов на основе методов измерения и обработки мгновенных значений электрических сигналов: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.16 / Мелентьев Владимир Сергеевич. Самара, 2006. - 367 с.

64. Батищев, В.И. Методы математического моделирования в задачах оперативного контроля технологических процессов / В.И. Батищев, О.М. Батищева // Высокие технологии в машиностроении: Мат. междунар. науч.-техн. конф. - Самара: СамГТУ, 2002. - С. 241–244.

65. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы измерения интегральных характеристик сигналов / В.С. Мелентьев // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. III Всерос. науч. конф. - Самара, 2006. -Ч. 4. - С. 67-69.

66. Батищев, В.И. Аппроксимационный подход к обработке и интерпретации результатов рентгено-дифрактометрических экспериментов / В.И. Батищев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII Междунар. конф. - Самара: Самар. науч. центр РАН, 2005. - С. 197-202.

67. Калашников, В.И. Информационно-измерительная техника и технологии: учебник для вузов / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др.; под ред. Г.Г. Раннева. - М.: Высш. шк., 2002. – 454 с.

68. Батищев, В.И. Измерительно-моделирующие методы оценивания функциональных характеристик случайных процессов / В.И. Батищев // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IV междунар. конф. - Самара: Самар. науч. центр РАН, 2002. - С. 524 – 530. 69. Мелентьев, В.С. Методы оценки соответствия модели реальному объекту в системах обеспечения безопасности / В.С. Мелентьев, Е.Е. Макарова, А.Н. Болотнова // Актуальные проблемы информационной безопасности при противодействии криминалу и терроризму. Теория и практика использования аппаратнопрограммных средств: Мат. 1 Всеросс. науч.-техн. конф. - Самара: СамГТУ, 2008. - С.121-125.

70. Тихонов, А.Н. Регуляризующие алгоритмы и априорная информация / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. - М.: Наука, 1983. – 200 с.

71. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. - М.: Наука, 1984. – 832 с.

72. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука, 1986. – 608 с.

73. Игнатьев, Н.К. Дискретизация и ее приложения / Н.К. Игнатьев. - М.: Связь, 1980. - 264 с.

74. Мелентьев, В.С. Метод измерения интегральных характеристик на основе использования характерных точек сигналов [Электронный ресурс] / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.С. Калашникова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. - №2 (2). – С. 144-146. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/36\_144-146.pdf.

75. Мелентьев, В.С. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVI Междунар. конф. – Самара: Самарский науч. центр РАН. 2014. - С. 717-722.

76. Мелентьев, В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – Т.9, № 10 (137). - С. 52-55. 77. Мелентьев, В.С. Исследование метода оперативного измерения параметров сигналов для автоматизированных систем научных исследований / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2015): Труды Междунар. Науч.-техн. Конф. СГАУ – Самара: Самарский науч. центр РАН. 2015. - С. 94-98

78. Муратова, В.В. Анализ инструментальной погрешности системы измерения параметров гармонических сигналов на основе сравнения ортогональных составляющих сигналов / Е.Е. Ярославкина, В.В. Муратова, Е.В. Павленко // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. - 2015. - № 4 (48). – С. 50-55.

79. Мелентьев, В.С. Оценка влияния квантования на погрешность измерения интегральных характеристик при пространственном и временном разделении сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Синицын, А.С. Калашникова // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием. - Самара: СамГТУ, 2013. - Ч.2. - С. 108-111.

80. Мелентьев, В.С. Анализ погрешности определения интегральных характеристик гармонических сигналов по их мгновенным значениям, распределенным в пространстве / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев, А.Н. Камышникова, Д.В. Рудаков // Шляндинские чтения: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУ, 2010. – С. 23-27.

81. Муратова, В.В. Исследование методов измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, разделенных в пространстве / В.В. Муратова, Е.Е. Ярославкина // Современные тенденции развития естествознания и технических наук: Сб. науч. трудов. Междунар. науч.-практич. конф. – Белгород: АПНИ, 2018. – С. 244-248.

82. Melentiev, V.S. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space / V.S. Melentiev, Yu.M. Ivanov, A.O. Lychev // Measurement Techniques. - 2014. – V. 57, №9. – P. 979-984.

83. Муратова, В.В. Совершенствование методов измерения параметров сигналов для систем контроля и испытаний радиоэлектронной аппаратуры / В.С. Меленть-

ев, В.В. Муратова, А.С. Пескова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. - Том 18. №1(2). - С. 397-400.

84. Муратова, В.В. Использование математического моделирования для оценки погрешности измерения информативных параметров гармонических сигналов /
В.С. Мелентьев, В.В. Муратова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. - Том 18. №2(3). - С. 928-931.

85. Муратова, В.В. Влияние квантования мгновенных значений сигналов на погрешность определения их интегральных характеристик / В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. - 2016. - № 3 (51). - С. 66-72.86. Муратова, В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Ползуновский вестник. - 2014. - №2(4). - С. 24-26.

87. Муратова, В.В. Исследование влияния формы периодических сигналов на погрешность определения их параметров / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, А.С. Пескова // Перспективы развития технических наук: Сборник науч. трудов по итогам междунар. науч.-прак. конф. - Челябинск: ИЦРОН, 2016. - № 3. – С. 47-52.

88. Муратова, В.В. Анализ погрешности метода измерения параметров по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов / В.В. Муратова, // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. - №2(12). - С. 104-110.

89. Муратова, В.В. Исследование метода измерения параметров на основе формирования и сравнения ортогональных составляющих напряжения / В. С. Мелентьев, В. В. Муратова, А. С. Пескова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. - 2016. - № 2 (50). - С. 114-120. 90. Мелентьев, В.С. Синтез методов и систем измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, А.О. Лычев, А.А. Миронов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV междунар. конф. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2012. – С. 625-633. 91. Муратова, В.В. Метод и система измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих сигналов / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Е.Е. Ярославкина // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. - № 4 (40). - 2013. - С. 206-209.

92. Муратова, В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. – 2013. - № 2 (31). - С. 80 - 84.

93. Муратова, В.В. Оценка погрешности реализации метода измерения параметров гармонических сигналов / В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2014 – №4(44). – С. 69 – 76.

94. Мелентьев, В.С. Новый подход к измерению интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям, распределенным в пространстве / В.С. Мелентьев, А.Н. Камышникова, Г.И. Леонович // Информационные, измерительные и управляющие системы: Мат. междунар. науч.-техн. конф. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. - С. 186-191.

95. Муратова, В.В. Анализ погрешности измерения интегральных характеристик на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – Пенза-2013. -№1(3). – С 3-8.

96. Муратова, В.В. Анализ влияния квантования мгновенных значений входных и дополнительных сигналов на погрешность определения интегральных характеристик гармонических сигналов / В.В. Муратова // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. - 1(13). - С. 109-116.

97. Мелентьев, В.С. Анализ влияния погрешностей формирования дополнительных сигналов на погрешность измерения интегральных характеристик гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Синицын // Информационные технологии в науке и производстве: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 86-90.

98. Муратова, В.В. Методы и средства измерения интегральных характеристик, инвариантные к погрешностям формирования дополнительных гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. - 2014. - № 2 (42). - С. 40-50.

99. Муратова, В.В. Использование моделирования для определения методической погрешности измерения параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Всерос. научой конф. с междунар участием. – Самара: Самар. гос. техн. унт, 2016. – Ч.2. – С. 143-146.

100. Муратова, В.В. Метод повышения точности измерения характеристик периодических процессов / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов // Известия Самар. науч. центра РАН. - 2013. - Том 15. №4(2). Темат. выпуск. - С. 376 - 380.

101. Муратова, В.В. Повышение точности измерения параметров гармонических сигналов на основе формирования дополнительного напряжения / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2013 – №3(39). – С. 79-85.

102. Муратова, В.В. Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Измерения, контроль, информатизация: матер. XVI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 61-63.

103. Муратова, В.В. Метод измерения параметров сигналов для систем контроля и испытаний радиоэлектронной аппаратуры / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов // Известия Самар. науч. центра РАН. - 2013. - Том 15. №6(2). Темат. выпуск. - С. 417 - 420.

104. Муратова, В.В. Метод измерения параметров по мгновенным значениям входного напряжения и тока, связанным с переходом ортогональных составляющих через ноль / Матер. докл. Х Междунар молодёж. науч. конф. «Тинчуринские чтения» - под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 3 т.; Т.1. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015 – С. 105-106.

105. Муратова, В.В. Метод автоматического контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры в процессе производства / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. - Том 17. Номер 2(4). - С. 822-826.

106. Муратова, В.В. Сокращение времени измерения параметров гармонических сигналов на основе использования их ортогональных составляющих / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Е.В. Павленко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник науч. тр. ХІ-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: ЮЗГУ, 2014. – С. 67-71.

107. Муратова, В.В. Совершенствование методов контроля параметров радиоэлектронной аппаратуры / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. - Том 16. №4(3). - С. 590-593.

108. Муратова, В.В. Методы оперативного измерения интегральных характеристик периодических сигналов / Е.Е. Ярославкина, В.В. Муратова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. - 2018. - №2(58) - С. 84-91

 Ривлин, Л.Б. Электродвигатели и их эксплоатация / Л. Б. Ривлин. - Ленинград; Москва: Госэнергоиздат, 1950 (Л.: тип. № 2 Упр. изд. и полиграфии). - 351 с.
 Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных двигателей / И.А Сыромятников. – Москва; Ленинград: Изд. И тип. Госэнергоиздата в М., 1950. – 239 с.





ВНЕШНИЙ ВИД СТЕНДА






Рисунок А.1 – Внешний вид стенда испытаний ПЭД

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

# ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНДА

## Таблица Б.1 – Основные технические характеристики стенда испытаний

Количество погрузочных мест	2 (по кол-ву скважин)
Количество одновременно тестируемых ПЭД на	1
холостом ходу или под нагрузкой	
Количество одновременно обкатываемых ПЭД на	1
холостом ходу	
Количество секций тестируемых ПЭД на одном	3
посадочном месте (скважине), не более	
Габариты тестируемых ПЭД	(ЭД103М), (ЭД117М),
	(ЭД130М) (производства
	ОАО «АЛНАС»
Рабочее положение тестируемых ПЭД к горизон-	Вертикальное (в скважине)
тали	
Длина тестируемых ПЭД, мм.,	По глубине скважины
Мощность тестируемого ПЭД, кВт., не более	160
Напряжение регулируемое, В	03000
Направление вращения вала тестируемого ПЭД	Любое
Скорость вертикального перемещения узла сты-	29
ковочного, не менее, мм/сек	
Вертикальный ход узла стыковочного, не менее,	700
MM.	
Время поворота консоли из исходного в рабочее	20
положение, с., не более	
Рабочая жидкость (допускается использование	Масло МА-ПЭД
трансформаторного масла, предусмотренного	ТУ38.101.579-75
тех. Условиями на тестируемый ПЭД)	
Режим работы стенда	Повторно-кратковременный
Промышленная сеть	3х380В, 50Гц
Мощность, потребляемая из сети, кВА, не более	670
Ток, потребляемый из сети, А, не более	1000

## погружных электродвигателей

### ПРИЛОЖЕНИЕ В

# ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ

#### Количественная Наименование характеристики оценка Число каналов контролируемых напряжений 3 3 Число каналов контролируемых токов 100÷6000 Диапазон контролируемого напряжения, В 10÷1000 Диапазон контролируемого тока, А 5 Дискретность регулировки выходного напряжения, В 0÷360 Диапазон измерения угла сдвига фаз между напряжением и TOKOM, ° Диапазон измерения угла сдвига фаз между каналами с вы-0÷360 ходом по напряжению, ° Рабочий диапазон частот, Гц 45÷65 50÷400 Расширенный диапазон частот, Гц Диапазон изменения входных сигналов: -1-0-+1 - cosφ 49,5 - 50,5- частота, ГЦ Основная приведенная погрешность измерения: - действующее значение фазного тока, % 0.1 - действующее значение линейного напряжения, % 0.1 0.1 - суммарной активной мощности 483 55 344 Габаритные размеры, мм 2,5 Масса, кг

#### Таблица В.1 – Основные технические характеристики ИИС

 Вид климатического исполнения: O4.1 по ГОСТ15150-69

 Рабочая температура воздуха, °C
 от +10 до +25

 Предельная температура воздуха, °C
 от +1 до +40

 Высота над уровнем моря, м, не более
 1000

 Максимальная относительная влажность при +25 C, %, не более
 80

 Группа механического исполнения: M13 по ГОСТ17516.1-90
 Степень защиты: IP по ГОСТ 14254-96

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

# ФОРМА ПРОТОКОЛА ТЕСТИРОВАНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

	Π		к карте про	цесса Ремонт У	ЭЦН КП 02-01-2	015 версня 3.0
	Прот	окол тестирован	ця ЦЭД			
	ООО "Инжен	ерные техноло	огнн" г. Са	мара		
пэд				Зав. номер		
Оператор				Дата		
	Испытани	я при отключен	ном питан	нн		
Контролируемы		уст обозн	OT 103M	прелеты	норма	факт
Сопротивление	обмотки U	RU	OM	top-careto	nopina	
Сопротивление (	обмотки V	RV	Ом			
Сопротивление	обмотки W	RW	Ом	1 1		
Разбаланс сопро	от-я обмотки U	UnbU	%	не более		
Разбаланс сопро	т-я обмотки V	UnbV	%	не более		
Разбалане сопро	т-я обмотки W	UnbW	%	не более		
Напр-ние изм. со	опрот-я изоляции до обкатки	Ulso	V	±5%		
Сопротивление	изоляции до обкатки	RIso	МОм	не менее		
Индекс поляриза	ации до обкатки	Ip		не менее		
Напр-ние изм. со	опрот-я изоляции после обкатки	Ulso	V	±5%		
Сопротивление	изоляции после обкатки	RIso	МОм	не менее		
Индекс поляриза	ации после обкатки	Ip		не менее		
Напряжение про	обоя масла	VOil	ĸВ	не менее		
·····	Исть	TORUS NO TOTOC	TOM YOTY			
<i>v</i> -			ion acty			4
онтролируемы П	е параметры	УСЛ.0003H. V	ед.изм.	пределы	норма	факт
папряжение тро	лания	VIOL	P	He oonee		
максимально до	лустимое напряжение	VIIIAX	D			
паправление вра Изворяти	ащения	V-#1	P	1.50/		
Гапряжение Тот		A 222111		±270		
10k	+ 19/	1-33711	- Pe	He Gonee		
Мощность потер Тампасатиза	рь +170	TI	*C	He oonee		
температура Виборния (Р		11 Vib	- United	110 50000		
Вибрация 0 Вибрания 1009		V10	MM/Cek.	He Gonee		
Вибрация 120 Виблания 240°		V10 1.54	M M/ CeK.	не более		
Виорация 240 Вория вибот		TER	M M/ CeK.	He oonee		
Бремя выбега		IIK	CER.	не менее		
	Испытанн	ия при номиналь	ной нагруз	ке		
Контролируемы	е параметры	усл.обозн.	ед.изм.	пределы	норма	факт
Напряжение		Velli	В	±5%		
Ток		Aav11	Α			
Скольжение + 20	0% (FOCT 183-74)	S	%	не более		
Коэффициент м	ощности	PF		ļļ		
кпд		Eff	%	не менее		
Мощность актив	зная	Pa	кВт	ļļ		
Мощность полн	ая	P	кВА	ļļ		
Мощность межа	ническая	Рмеж	кBт			
Закато ненне:	ПЭЛ угов тетворяет требовая	INGM				
State and a childer	1 A Market Bohnet i beooban			т <u>и</u> т	1 11	
Оператор	Мастер					
	подпи				полпи	
тип шлицов ва	ала (э/п)					
произволи	ТЕЛЬ					
пгонзводи						
ОБОРУДОВА	ние					
СЕРИЙНЫЙ Э	Ve					
ΠΛΤΛ						
дата						





	Иощн	ОСТЬ
	larpy	зка
-8-1	Макс.	мощность
Name and Address of the Owner, where the	-	the second se

Измерение температуры по длине корпуса протектора	Паспортное значение	Измеренная величина	Заключение
Температура корпуса до обкатки. С			×
Средняя температура корпуса после обкатки, С			~
Максимальная температура корпуса после обкатки, С			







#### приложение д

# АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ

153

### РАБОТЫ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «РН-РЕМОНТ НПО» САМАРСКИЙ ФИЛИАЛ ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "РН-РЕМОНТ НПО"

г.Отрадный

05.09.2017г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Комиссия в составе:

Подписи членов комиссии:

Заместитель директора по качеству Начальник ОТК Главный технолог Болотский А.В. Кривчиков Н.Г. Зотов С.А.

Мы, представители «PH-PEMOHT HПО», настоящим актом подтверждаем, что в поставленных нам в 2016г. ООО «АксесАвтоматик» стендах для испытания электродвигателей погружных насосов, в составе математического обеспечения, используются результаты научно-исследовательской работы «Аппроксимационные методы и системы измерения интегральных характеристик с пространственным разделением сигналов», выполненной Муратовой В.В., г. Самара

Использование разработанных Муратовой В.В. апроксимационных методов при измерении параметров электродвигателей погружных насосов позволило:

1) повысить точность измерения;

- повысило надежность работы аварийных защит стенда за счет повышения быстродействия алгоритмов оценки пиковых значений контролируемых параметров;
- 3) повысило производительность стенда при проведении испытаний.

Contraction of the second seco

Болотский А.В.

Кривчиков Н.Г.

Зотов С.А.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы от 05.09.17г. ИНН/КПП 1644057505/164401001 Р/с 4070281022564000002C Филиал 6318 ВТБ 24 (ПАО) г. Самара БИК: 043802955 К/с 3010181070000000955



423450, Республика Татарстан, г.Альметьевск, ул.Сургутская д.2 тел: (8553) 39-31-10 факс: (8553) 39-31-10 web. www.et\_alm.com

г. Альметьевск

05 июня 2018 г.

AKT

#### о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Мы, представители ООО «Инженерные технологии», настоящим актом подтверждаем, что результаты научно-исследовательской работы «Аппроксимационные методы и системы измерения интегральных характеристик силового оборудования», выполнешной Муратовой В.В., внедрены с 2016 в ООО «Инженерные технологии», г. Самара в составе математической модели стендов для испытания и аттестации силового оборудования в нефтяной промышленности.»

Эффект от внедрения, достигнут за счет увеличения точности измерения электрических параметров электродвигателей и повышения быстродействия измерения мгновенных значений за зремя не более четверть периода.

С уважением, Директор



Джураев М.Т.

**УТВЕРЖДАЮ** Ректор/Самарского собула ехнического у наверсит ula

AKT

об использовании результатов диссертационной работы В.В. Муратовой, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебном процессе Самарского государственного технического университета

Комиссия в составе начальника учебного управления университета к.э.н., доцента Е.А. Алонцевой, директора Института автоматики и информационных технологий к.т.н., доцента Н.Г. Губанова, заведующего кафедрой "Информационно-измерительная техника" к.т.н., доцента Е.Е.Ярославкиной составила настоящий акт о том, что в учебном процессе Самарского государственного технического университета использованы следующие результаты кандидатской диссертации В.В. Муратовой "Аппроксимационные методы и системы измерения интегральных характеристик силового электрооборудования".

1. Методы измерения интегральных характеристик, основанные на использовании временного и пространственного разделения мгновенных значений сигналов, излагались в лекционном курсе по дисциплине «Интеллектуальные измерительные системы» и использовались при проведении практических занятиях по данной дисциплине при подготовке магистров по направлению 12.04.01 - «Приборостроение» (магистерская программа «Приборостроение»).

2. Методики анализа влияния угловой И амплитудной погрешностей фазосдвигающих блоков на погрешность результата измерения интегральных характеристик периодических сигналов использовались в дипломном проектировании магистрами 12.04.01- «Приборостроение» (магистрерская программа «Приборостроение») и бакалаврами направления 12.03.01 - «Приборостроение» (профиль «Информационноизмерительная техника и технологии»)

Начальник УУ СамГТУ к.э.н., доцент

Директор ИАИТ к.т.н., доцент

Зав.кафедрой ИИТ к.т.н., доцент

Accocce. Men

Е.А. Алонцева

Н.Г. Губанов

Е.Е. Ярославкина