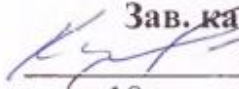


Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет: электротехнический  
Выпускающая кафедра: Электротехника и электромеханика (ЭТиЭМ)  
Направление подготовки: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Направленность (профиль): Электромеханика  
Квалификация: бакалавр

Допускается к защите  
Зав. кафедрой ЭТиЭМ  
 Б.В. Кавалеров  
« 18 » июня 2020 г.

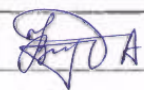
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(дипломная работа)

на соискание академической степени бакалавра

*На тему:*


Разработка математической модели датчика ДБСКТ для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции

Студент Ведерников Дмитрий Андреевич ()

**Состав ВКР:**

1. Задание на выполнение ВКР 3 стр.
2. Пояснительная записка на 77 стр.

**Руководитель ВКР:**

 / Бахирев И.В. /  
подпись / ФИО

Пермь 2020 г.

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭТиЭМ

Б.В. Кавалеров

« 23 » марта 2020 г.

### ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Фамилия, Имя, Отчество: Ведерников Дмитрий Андреевич

Факультет: Электротехнический Группа – ЭМ-16-16

Форма ВКР: дипломная работа

Начало выполнения работы: 24 марта 2020 года

Контрольные сроки просмотра работы кафедрой: 10 июня 2020 года

Сроки предоставления на отзыв руководителя: 15 июня 2020 года

Защита работы на заседании ГЭК: 22 июня 2020 года

1. Наименование темы: Разработка математической модели датчика ДБСКТ для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции

2. Исходные данные к работе: Математическая модель ГТУ-16П МЭКС. Технические данные датчика ДБСКТ-250-1Ш: напряжение питания однофазного тока синусоидальной формы –  $6 \pm 0,6$  В, частота напряжения питания –  $2000 \pm 100$  Гц, потребляемый ток – 1..5 мА, максимальное выходное напряжения  $3,8 \pm 0,4$  В, рабочая температура среды от минус 60 °С до плюс 220°С. Габаритные размеры ДБСКТ–250-1Ш: длина – 87,6 мм, диаметр – 22,1 мм.

3. Содержание пояснительной записки: задание ВКР, реферат, введение, основная часть, заключение, список использованных источников.

Основная часть: 4 раздела (главы):

- Первый раздел – обзор на математическое моделирование, рассмотрение видов математического моделирования, преимущества и недостатки их, а также в каких случаях приходится использовать метод математического моделирования, проект совместный с АО «ОДК–Авиадвигатель».

- Второй раздел – теоретическое описание вращающихся трансформаторов,

применяемых в качестве датчиков при считывании углового положения ротора, а также рассмотрены альтернативные варианты, которые могли бы заменить поворотные трансформаторы.

– Третий раздел – выполнено построение и исследование математической имитационной модели датчика ДБСКТ для ВНА, показаны зависимости выходного напряжения в зависимости от угла поворота.

– Четвёртый раздел – выполнен обзор СКВТ в синусно-косинусном режиме, который будет использоваться в качестве датчика определения углового положения, рассмотрено сравнение ДБСКТ с другими датчиками углового положения по нескольким критериям, рассмотрено применение ДБСКТ во входном направляющем аппарате.

4. Перечень графического материала:

– Схема расположения обмоток двухполюсного вращающегося трансформатора.

– Математическая имитационная модель дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора

– Схема настройки симметрирования СКВТ.

– Схемы синусно-косинусного вращающегося (СКВТ) и линейного трансформаторов.

5. Дополнительные указания: Построение математической модели и исследование характеристик датчика ДБСКТ выполнено в программно-аппаратном комплексе MatLab Simulink (MatLab R2014b лицензия 850238 – предоставил АО «ОДК–Авиадвигатель»).

6. Основная литература

1. Бабина О.И. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей / О.И. Бабина // Конференция: Имитационное моделирование. Теория и практика. Санкт-Петербург, 21-23 октября 2009 г. – С. 73-77 – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immond-2009-1-73-77.pdf>

2. Вращающийся трансформатор [Электронный ресурс] / Электрические трансформаторы – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вращающийся\\_трансформатор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вращающийся_трансформатор) (дата обращения 15.05.2020).

3. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С.В. Звонарев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. – 112с .

4. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие для среднего профессионального образования / М.М. Кацман – Москва: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002.

5. Лодочников Р.А. Микроэлектродвигатели для систем автоматики (технический справочник) / Р.А. Лодочников, Ю.М. Юферов. – Москва: Энергия, 1969. – 272 с.

6. Пономарев В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 129 с.

7. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учебник для вузов / Ф.М. Юферов. – Москва: Высш. шк., 1976.

Руководитель выпускной квалификационной работы

Доцент кафедры ЭТиЭМ Бахирев Иван Владимирович (  )  
(должность, Ф.И.О)

Задание получил: студент Ведерников Дмитрий Андреевич (  )  
(Ф.И.О)

Дата: « 23 » \_\_\_\_\_ марта \_\_\_\_\_ 2020г.

## КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ Выпускной квалификационной работы (ВКР)

№ п/п	Наименование этапа работы	Объём этапа в %	Сроки выполнения		Примечание
			Начало	Конец	
1	Поиск и систематизация информации по теме ВКР, анализ исходных данных.	20	24.03.2020	05.04.2020	
2	Разработка основной части	45	06.04.2020	10.05.2020	
3	Разработка графической части	15	11.05.2020	17.05.2020	
4	Оформление пояснительной записки	15	17.05.2020	27.05.2020	
5	Представление работы на проверку и отзыв руководителю ВКР, разработка и согласование доклада и презентации ВКР на защите	5	28.05.2020	05.06.2020	
6	Предзащита	-	05.06.2020	09.06.2020	
7	Представление работы заведующему кафедрой на утверждение	-	10.06.2020	14.06.2020	
8	Защита на заседании ГЭК	-	22.06.2020	22.06.2020	

Руководитель выпускной квалификационной работы

Канд. техн. наук, доцент \_\_\_\_\_ (И.В. Бахирев)

Исполнитель ВКР, студент \_\_\_\_\_ (Д.А. Ведерников)

«23» марта 2020 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 77 с., 24 рис., 1 табл., 28 источн., 1 прил.

ГАЗОТУРБИНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ, ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА,  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДУБЛИРОВАННЫЙ  
БЕСКОНТАКТНЫЙ СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР,  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДУБЛИРОВАННОГО БЕСКОНТАКТНОГО  
СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Объектом исследования** является разработанная математическая модель датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора (ДБСКТ) для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции.

**Цель работы** – разработать математическую модель датчика ДБСКТ для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции.

**В процессе работы** проведен сбор информации по математическому моделированию, разработана и исследована математическая модель датчика ДБСКТ, а также выполнено сравнение полученной модели с работой реального датчика.

**В результате исследования** была получена математическая модель дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора, которая идентичная работе реального ДБСКТ, для использования ее в математической модели ГТУ.

**Предполагается внедрение результатов работы** в рамках подготовки мобильного электронного имитатора САУ ГТУ-16П МЭКС на АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь).

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ, ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ .....</b>	<b>9</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>10</b>
<b>1 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Понятие о математическом моделировании. Проект АО «ОДК-Авиадвигатель» .....	12
1.2 Аналитическое моделирование – один из видов математического моделирования.....	15
1.3 Имитационное моделирование – один из видов математического моделирования.....	16
1.4 Сравнение аналитического (статического) и динамического (динамического) моделирования.....	19
<b>2 ДАТЧИКИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ УГЛА ПОВОРОТА .....</b>	<b>25</b>
2.1 История появления трансформаторов. Применение вращающихся трансформаторов в устройствах автоматики .....	25
2.2 Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) в синусном режиме .....	28
2.3 Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ).....	31
2.4 Потенциметрическая система дистанционной передачи угла.....	34
<b>3 ДУБЛИРОВАННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР. УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ .....</b>	<b>38</b>
3.1 Дублированный бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме (СКВТ).....	38
3.2 Сравнение датчиков передачи угла .....	45
3.3 Применение ДБСКТ во входном направляющем аппарате .....	46
<b>4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ДУБЛИРОВАННОГО БЕСКОНТАКТНОГО СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....</b>	<b>50</b>

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	59
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	61
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Перечень слайдов презентации ВКР на защите.....	64



## **ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ, ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ**

В настоящей ВКР применяют следующие сокращения и обозначения:

БУ – блок управления.

ВНА – входной направляющий аппарат.

ВТ – вращающийся трансформатор.

ГГ – газогенератор.

ГТД – газотурбинный двигатель.

ГТУ – газотурбинная установка.

ГТЭС – газотурбинная электростанция.

ДБСКТ – дублированный бесконтактный синусно-косинусный трансформатор.

КВД – компрессор высокого давления.

КНД – компрессор низкого давления.

МЭКС – малоэмиссионная камера сгорания.

ЛВТ – линейный вращающийся трансформатор.

САУ – система автоматического управления.

СКВТ – синусно-косинусный вращающийся трансформатор.

МДС – магнитодвижущая сила.

ПТ – поворотный трансформатор.

СКВТ – синусно-косинусный вращающийся трансформатор.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из приоритетных направлений в электроэнергетике и электротехнике является применение авиационных двигателей в наземных газотурбинных электростанциях (ГТЭС). На сегодняшний день, в России предприятиями занимающимися разработкой и подготовкой газотурбинных установок (ГТУ) являются АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь), АО «ОДК-Климов» (Санкт-Петербург), ПАО «ОДК-Сатурн» (Рыбинск) [3].

На основе ГТУ строят электростанции, которые обеспечивают электроэнергией, как промышленные предприятия, так и бытовых потребителей. Наиболее востребованными являются ГТЭС мощность, которых достигает 25 МВт и более. При разработке ГТУ для электростанций на их основе, в первую очередь ставится вопрос математического моделирования систем. При помощи математического моделирования, опирающегося на теоретические положения можно предположить реальную работу какой-либо системы [6].

Для построения математической модели, необходимо понимать, что включает в себя математическое моделирование. Если речь идет о математическом моделировании, то оно подразумевает в себе применение математического аппарата, на котором основан принцип работы какого-либо реального объекта. При решении задач с помощью данного метода исследования применяют два основных вида математического моделирования – аналитическое и имитационное.

В тех случаях, когда описание на теоретическом уровне невозможно выполнить, тогда применяют метод имитационного моделирования (метод исследования), в котором испытываемая система заменяется моделью. Разработанная модель должна описывать с высокой точностью работу реальной системы, а именно процессы, происходящие во время работы реального объекта.

В рамках реализации проекта по вводу в эксплуатацию программно-аппаратного комплекса для создания мобильного электронного имитатора САУ ГТУ-16П МЭКС АО «ОДК-Авиадвигатель» было предложено разработать математическую модель датчика ДБСКТ для данного комплекса.

Поэтому в качестве объекта исследования будет математическая модель датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции.

Цель работы – разработать математическую модель датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- 1) сбор и систематизация информации о математическом моделировании;
- 2) поиск информации о дублированном бесконтактном синусно-косинусном трансформаторе;
- 3) рассмотрение альтернативных вариантов датчиков, подобных ДБСКТ;
- 4) построение и проверка математической модели ДБСКТ;
- 5) сравнение результатов моделирования с реальной работой датчика.

Дублированный бесконтактный синусно-косинусный трансформатор используется в качестве датчика передачи углового положения лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора низкого давления ГТУ газотурбинной электростанции.

Понятие о трансформаторе появилось еще в XIX веке. С тех пор он стал активно развиваться и на сегодняшний день имеются различные варианты устройства и области применения данных механизмов. ДБСКТ является трансформатором с вращающимся сердечником.

Существуют и другие варианты устройств, которые применяются в качестве датчиков углового положения. В качестве альтернативных вариантов были выбраны: синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) в синусном режиме, линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ) и потенциометрическая система дистанционной передачи угла.

В связи с применением входного направляющего аппарата для КНД, который оказывает значительное влияние на энергоэффективность ГТУ подтверждается актуальность разработки и исследования математической модели датчика ДБСКТ для ВНА для включения ее в математическую модель ГТУ.

# 1 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## 1.1 Понятие о математическом моделировании. Проект АО «ОДК-Авиадвигатель»

В современных условиях, при значительном росте используемых ресурсов и воздействии на окружающую среду, с огромным потоком информации, который следует учитывать, традиционные эмпирические методы принятия решений раскрывают его ограниченность. Разработка авиационной техники должна основываться на разработке новых методов управления и внедрении новейших технологий, а также использовании эффективных методов научных исследований. Такие эффективные методы следует отнести к математическим исследованиям. После проведения математических исследований следующий шаг – проверка теории. Для этого применяется имитационное моделирование системы.

Моделирование – это особый метод познания окружающего мира, который относится к обычным методам. Он может применяться как на эмпирическом, так и на теоретическом уровне.

При моделировании технических объектов используют математический аппарат алгебраических и дифференциальных уравнений, алгебру логики и другие.

Основным преимуществом моделирования является возможность проверки и оптимизации системы до ее включения в рабочий механизм.

Процесс моделирования можно разделить на три этапа: формализация (переход от реального объекта к модели), модернизация (процесс анализа и усовершенствования модели, поиск и нахождение решения), интерпретация (переход от полученных результатов моделирования к реальному объекту исследования).

При совместной работе с АО «ОДК-Авиадвигатель», в рамках реализации проекта по подготовке и вводу в эксплуатацию программно-аппаратного комплекса для создания мобильного электронного имитатора САУ ГТУ-16П МЭКС, было предложено разработать математические имитационные модели датчиков для данного комплекса.

Мобильный электронный имитатор представляет собой комплекс, который будет имитировать реальную работу ГТУ электростанции. Комплекс подключается к шкафу САУ, который управляет двигателем. Перспективность проекта заключается в том, что можно отрабатывать на имитаторе различные штатные и внештатные режимы работы ГТД, без угрозы вывода реального двигателя из строя.

Этот лабораторный комплекс необходим для изучения принципов работы ГТД и установок. Он включает в себя имитатор, который представляет собой полную сложную математическую модель ГТУ, компьютерная реализация, которой позволяет обеспечить динамическое взаимодействие (в реальном времени) виртуальной ГТУ и реальных агрегатов автоматики. Модель обеспечивает не только адаптивные алгоритмы управления, но и надежную диагностику двигателя и его систем. Модель позволяет исследовать различные режимы работы, в том числе имитировать критические и аварийные. Имитатор может быть представлен в двух разных проектах: виртуальная компьютерная модель и полуночная модель.

В состав лабораторного комплекса входят:

- 1) имитатор, основанный на математической модели ГТУ;
- 2) автоматизированный аппаратный и программный комплекс NI PXI;
- 3) специализированное практическое программное обеспечение, созданное в LabVIEW.

Поскольку данный электронный имитатор работает с математическими моделями, то необходимо понимать, что такое математическое моделирование и что оно включает в себя.

Математическое моделирование в узком смысле понимает математическое представление реальности или процесс изучения математических моделей. Любой изучаемый процесс можно описать различными моделями, причем ни одна модель не может сделать это полностью и всесторонне. Однако использование упрощенной модели, отражающей индивидуальные свойства исследуемого объекта, позволяет более четко смотреть на взаимосвязь причинно-следственных связей, входов и выходов, быстрее делать необходимые выводы, принимать правильные решения [16].

Под математической моделью обычно понимают материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания замещает объект – оригинал, сохраняя некоторые важные его черты.

Основными требованиями к математическим моделям являются требования адекватности, универсальности и экономичности. Стоит также сказать и про другие свойства, которыми обладают математические модели, такие как простота, достаточная точность, способность к развитию, потенциальность.

Модель считается адекватной, если она в полном объеме отражает все свойства реального объекта с приемлемой точностью. В свою очередь, точность определяется как величина соответствий значений на выходе модели и объекта.

Универсальность модели в основном определяется количеством и составом входных и выходных параметров, учитываемых в модели.

Свойство экономичности подразумевает затраты вычислительных ресурсов для получения результата, а именно затраты времени и памяти вычислительных устройств.

Простотой называется свойство, когда получение желаемого результата моделирования достигается с той же точностью, но при этом расчете учитывается меньшее количество факторов.

Свойство потенциальности (предсказуемости) характеризуется возможностью получения новых знаний об изучаемом объекте с использованием модели.

Достаточная точность результатов моделирования, а именно, при решении задач достигается надежностью функционирования модели [11].

На сегодняшний день данный вид моделирования считается одним из самых перспективных, поскольку получают хороший результат работы и зачастую применяется чаще остальных.

Положительными характеристиками математического моделирования по сравнению с другими видами моделирования являются:

- 1) экономность, ресурсосбережение реальной системы;
- 2) возможность построения объектов и систем, которых нет в природе (гипотетические предположения);

- 3) возможность получения результата в различные промежутки времени;
- 4) универсальность аппаратного и программного обеспечения, доступность пакетов приложений для широкого спектра работ;
- 5) возможность сравнительно простого многомерного анализа.

Область применения математического моделирования достаточно широка. Практически все научные области используют имитацию для получения возможных исходов реальной модели.

Традиционно математические модели делятся на аналитические и имитационные модели (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Виды математического моделирования

## **1.2 Аналитическое моделирование – один из видов математического моделирования**

Аналитическое моделирование – это математическая формализация, изменение свойств объекта с течением времени. Для аналитического моделирования характерно, что процессы функционирования элементов системы прописываются в виде некоторых функциональных связей (алгебраических, интегро-дифференцированных, конечно - разностных) и логических условий. Аналитическая модель может быть написана в результате аналитического решения исходных уравнений модели.

Каждая аналитическая модель характеризуется сложностью ее получения. Однако после его получения он позволяет рассчитать полный набор желаемых значений произведенной величины с полным набором изменений в заданном количестве.

Аналитические методы используются в тех случаях, когда свойства системы могут отображаться с использованием детерминированных величин или зависимостей, то есть когда знание процессов и событий в течение определенного периода времени позволяет им полностью определять свое поведение за пределами этого диапазона. Аналитическое моделирование широко используется для решения задач, связанных с движением и стабильностью, оптимального размещения, распределения работы и ресурсов, выбора наилучшего (кратчайшего) пути.

При практическом применении аналитических методов сопоставления сложных систем следует иметь в виду, что они требуют установки всех детерминированных отношений между компонентами и целями системы в виде аналитических зависимостей. Для сложных многокомпонентных многокритериальных систем чрезвычайно сложно получить такие зависимости, а иногда и невозможно. Более того, если даже это удастся при введении значительных ограничений и допущений, практически невозможно доказать легитимность применения этих аналитических выражений, т.е. адекватность модели исследуемой системы [1].

Данный метод является одним из сложных при выполнении поставленных задач, но актуальность применения он не теряет, так как с помощью этого метода получаются достаточно точные результаты моделирования, сопоставимые с результатами, полученными от реального объекта.

### **1.3 Имитационное моделирование – один из видов математического моделирования**

Другим типом математического моделирования является имитационное моделирование. Построение датчиков выполняется на основе математического моделирования. Взаимосвязь математического и имитационного моделирования очевидна. Поскольку математическое (логико-математическое) представление выполняется с использованием математической логики, имитация (программное) выглядит как логическая математическая модель, которая прописывается как



алгоритм функционирования объекта, реализованный в виде программного комплекса для компьютера.

Поэтому под имитационным моделированием понимают метод, который позволяет создавать модели, описывающие реальную систему с высокой степенью точности (описывающие процессы, как они проходили в реальности), для этого проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. Проведение экспериментов над системой, называется имитацией.

Имитационное моделирование рассматривается как частный случай математического моделирования. Бывают случаи, когда невозможно аналитически разработать модели, либо сделать это невозможно, либо процессы, протекающие в этих объектах, нестабильны. В этих случаях аналитическая модель заменяется имитатором или имитационной моделью.

Имитационная модель представляет собой логические описания объекта с применением математических зависимостей, которые могут быть использованы для компьютерных экспериментов при проектировании, анализа и оценки функционирования объекта [22].

Построение имитационной модели необходимо в тех случаях, когда:

- 1) стоимость проведения экспериментов на реальном оборудовании обходится дорого или нет возможности проверки на реальном оборудовании;
- 2) затруднение в построении аналитических моделей, в силу присутствия различных факторов как время, нелинейность участков, стохастичность (случайность) переменных;
- 3) осуществление опытов с привязкой ко времени;
- 4) невозможность получения результата моделирования без использования компьютера;
- 5) опасность возникновения аварийной ситуации при проверке на реальном объекте.

Цель имитационного математического моделирования заключается в восстановлении действий системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами или другими словами –

разработке симулятора (англ. *simulation modeling*) исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов [8].

Имитационное моделирование можно разделить на три вида (рисунок 1.2):

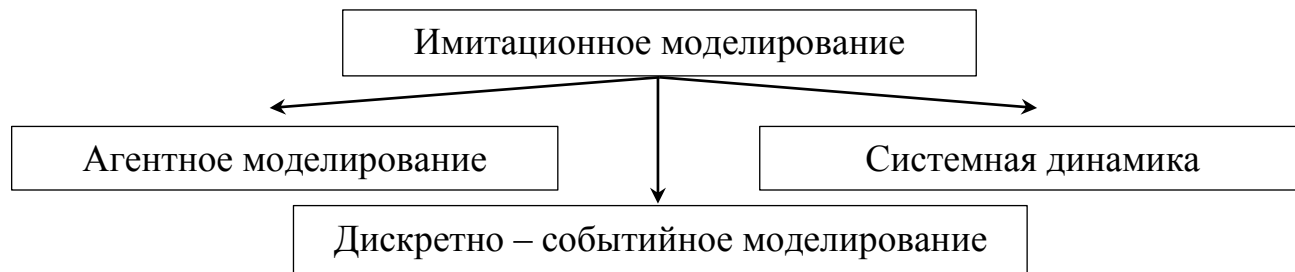


Рисунок 1.2 – Виды имитационного моделирования

- 1) Агентное моделирование – вид имитационного моделирования, появление которого относится к периоду 1990-х-2000-х годов. Применение данного метода необходимо для исследования децентрализованных систем и то, как такое поведение определяет работоспособность всей системы в целом. Аналитик, работающий с системой, делает индивидуальный подход к каждому агенту системы, а в целом общее поведение появляется как результат взаимодействия множества агентов, которые составляют данную систему [5].
- 2) Системная динамика – для использования данного вида имитационного моделирования необходимо построить графические диаграммы причинно-следственных связей и глобальных воздействий некоторых параметров на другие во времени. После этого на основе полученных диаграмм строится модель на компьютере и выполняется имитация модели. Этот вид легче других помогает понять суть происходящего выявления причинно-следственных связей между объектами и явлениями. Метод был разработан Форрестером в 1950 годах [25].
- 3) Дискретно-событийное моделирование – вид моделирования, включающий анализ только основных действий моделируемой системы. К основным событиям относят: «ожидание», «обработка», «движение» и «разгрузка», в

отдельных случаях список может быть расширен. Чаще всего этот метод используется для моделирования производственных процессов. Разработал Джеффри Гордоном в 1960-х годах.

Имитационное моделирование позволяет оценить работу системы с течением времени. Положительной стороной будет то, что есть возможность управлять временем. При быстропротекающих процессах можно замедлить ход течения времени и укорить работу систем с медлительной изменчивостью. Но стоит обращать внимание на точность работы системы. Иногда нельзя прибегнуть к ускорению или замедлению работы процессов системы, поскольку может возникнуть значительная погрешность [13,21].

Как уже было сказано выше, что иногда сложно выполнить расчет аналитически, поэтому прибегают к имитационному моделированию. Для понимания разницы между аналитическим и имитационным моделированием выполним сравнительный анализ (рисунок 1.3) [1].

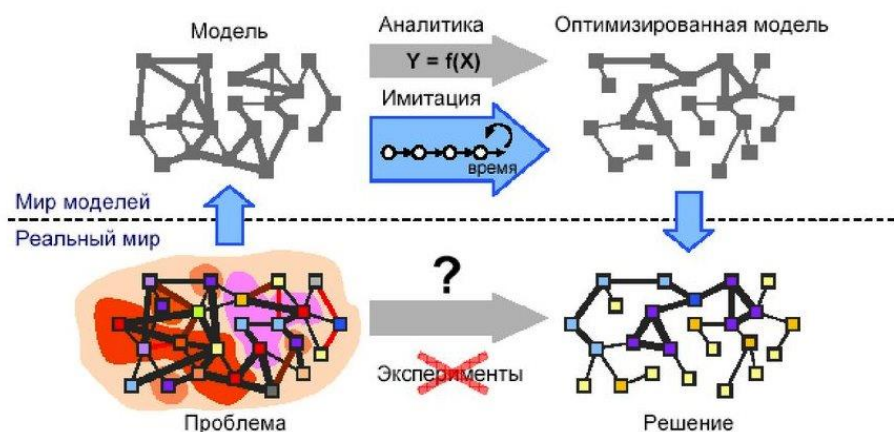


Рисунок 1.3 – Аналитическое (статическое) и имитационное (динамическое) моделирование

#### 1.4 Сравнение аналитического (статического) и динамического (динамического) моделирования

Модели аналитики, записывают математическим аппаратом, применяя алгебраическую форму, в виде интегралов или дифференциалов, а также используя

алгебру логики. Работа метода очень ограничена в силу статичности и сложности получения. При помощи аналитических моделей можно получить лишь простые и идеализированные решения. Так как чаще всего модель не имеет ничего общего с реальным объектом. Применение статического (аналитического) моделирования направлено на описание основных свойств объектов.

В силу ограниченности статического моделирования, широкое применение нашел метод имитационного (динамического) моделирования. Различие данных методов в том, что аналитическое реализуют зависимость выходных параметров системы от входных. Имитационное моделирование позволяет находить сложные решения, основные из которых определены во времени.

В модели имитация, в использовании всей системы уравнений нет необходимости, так как можно составить подробную структурную схему, которая будет описывать поведение реального объекта, но при этом логическая последовательность и взаимодействие между параметрами системы должно сохраняться.

Аналитические модели ориентированы на математические законы, при помощи которых можно получить, как правило, оптимальное решение, но это сужает возможность применения метода. Получение стабильной работы при использовании данного метода, как правило, сложная задача, а иногда невозможная. В свою очередь, имитационное моделирование не гарантирует нахождение оптимального решения или получения высокой степени достоверности. Для его получения необходимо проводить множество опытов и исследований, чтобы модель приблизить к функционированию реального объекта.

В аналитических моделях, оценка работы модели определяется данными с выхода модели. Результатом процесса оптимизации модели будут значения переменных решений, которые максимизируют (или минимизируют) целевую функцию. В имитационных моделях значения переменных решения представляют собой входные данные модели, а выходные данные процесса моделирования модели представляют собой значение целевой функции, соответствующее этим входным значениям переменных.

В случае если аналитические модели не могут быть использованы, инженеры-конструкторы используют имитационные модели. В целом, при решении сложных задач, в которых важно время и динамика, модели имитации считаются одним из самых востребованных и полезных методов количественного анализа:

- 1) Аналитические модели часто трудно формализовать и строить, а иногда и невозможно построить. Каждая аналитическая модель имеет свои «препятствующие» факторы, которые зависят от специфики данной модели;
- 2) Аналитические модели обычно обеспечивают стационарные (долгосрочные) решения. На практике часто важно неустойчивое поведение системы или ее функций в течение короткого периода времени, что препятствует получению «средних» решений;
- 3) Широкий спектр программных пакетов может использоваться в имитационном моделировании, предназначенный для получения данных о моделях.

Аналитические и имитационные модели могут использоваться для решения проблем, связанных со случайными событиями. Кроме того, аналитические модели часто лучше, чем имитационные модели по следующим причинам [11]:

- 1) Модели имитации требуют большого количества тестов, чтобы получить хороший результат значения целевой функции для каждого отдельного решения;
- 2) Используя аналитическую модель, можно получить оптимальное решение;
- 3) Решение задач моделирования требует оценки большого количества возможных альтернативных решений;
- 4) Имитационные модели имеют ряд преимуществ по сравнению с аналитическими, в том числе:
  - 1) Данные модели указывают на возможность многократного тестирования параметров интересующей нас модели;
  - 2) Возможность исследовать сложные результаты, которые могут оказаться в поведении системы.

Аналитические и имитационные модели проходят три основных этапа моделирования, а именно формализацию, моделирование, интерпретацию результатов моделирования.

Этап формализации можно разделить на три подэтапа: формулировка проблемы и определение целей исследования, разработка концептуальной модели, формализация модели моделирования.

Чтобы сформулировать проблему и определить цели исследования, необходимо провести сбор информации об объекте моделирования, изучить проблемные ситуации и постановку проблемы, разработку концептуальной модели объекта.

Концептуальная модель объекта представляет собой логическое и математическое описание системы, которая соответствует сформулированной проблеме. После этого необходимо определить общий вид модели и переход от реальной системы к логически функциональной схеме. Объект описывается с использованием математических понятий и алгоритмов для функционирования его компонентов. Концептуальное описание – это упрощенное алгоритмическое отображение реальной системы. Во время его разработки была определена базовая структура модели, которая включает статическое и динамическое описание системы. Кроме того, определяются пределы системы, дается описание внешней среды и определяется ее влияние на систему. Основные элементы далее идентифицируются и описываются, формируются переменные, параметры, функциональные зависимости для отдельных элементов и процессов, а также для всей системы, ограничений и целевых функций. На этом этапе также была указана техника всего экспериментального эксперимента. При создании небольших моделей этот этап сочетается с фазой составления значительного описания системы. Поэтому для построения имитационной модели используются различные инструменты.

Подготовка формализованного описания системы основана на ее концептуальном описании. В соответствии с технологиями программирования концептуальную модель превращают в программу-имитатор, написанными на различных языках программирования или с использованием систем моделирования.

Вторым этапом, которые проходят аналитическое и имитационное моделирование, является моделирование. На данном этапе выполняют испытания, исследования и проверку моделей. Проводится верификация модели, оценка адекватности, исследование свойств аналитической и имитационной модели, а также других процедур испытания моделей. Информация о реальной системе может быть получена из соответствующей документации по системе.

После реализации имитационной модели на компьютере необходимо проверить надежность и качество модели. Поэтому проводят анализ полученных результатов, что является третьим этапом моделирования систем.

При организации вычислительного эксперимента, ориентированного на аналитическую и имитационную модели, чаще всего, для обработки результатов можно выбрать несколько аналитических методов: регрессионный и дисперсионный анализ, градиент и другие методы оптимизации. Оба метода являются достаточно трудоемкими для анализа, поэтому разработчик должен владеть системным анализом и быть хорошим технологом. Успех эксперимента с моделью зависит от правильного решения вопросов обработки и последующего анализа и интерпретации результатов моделирования.

Использование результатов имитационного моделирования допускается в тех случаях, когда модель обеспечивает необходимую точность, т.е. сама модель может считаться качественной.

Качество работы системы является последним этапом разработки модели, при этом необходимо учитывать два критерия:

1. проверить соответствие модели ее назначению (целям исследования);
2. оценить достоверность и статистические характеристики результатов, получаемых при проведении модельных экспериментов.

При аналитическом моделировании достоверность результатов определяется корректным выбором используемого математического аппарата и методической ошибкой, присущей данному математическому методу.

На качество результатов влияют многие факторы, в частности [19]:

- 1) моделирование случайных факторов на основе использования датчиков случайных чисел, которые могут «искажать» поведение модели
- 2) наличие нестационарного режима работы модели;
- 3) использование нескольких разнотипных математических методов в рамках одной модели;
- 4) зависимость результатов моделирования от плана эксперимента;
- 5) необходимость синхронизации работы отдельных компонентов модели.

Совершенно не так давно имитационное моделирование считалось не перспективным. Применялось только в тех случаях, когда аналитический метод имеет ограниченное применение или нет возможности его применить. Если же есть возможность получить аналитическую модель, то в таком случае применяют какой-либо метод оптимизации, что позволяет найти оптимальное решение.

В настоящее время имитационное моделирование является наиболее эффективным методом изучения функционирования систем и зачастую единственным практически доступным методом получения информации о поведении системы, особенно на этапе проектирования. Чаще всего имитационные модели выполняются не вместо аналитических, а параллельно с ними, поскольку их относительно легко создавать и позволяют изучать параметры реальных систем, которые невозможно представить в аналитических моделях.

В частности применение двух методов моделирования при сложении всех плюсов обоих подходов делает возможность находить оптимальное решение, производить качественный анализ работы системы. При построении комбинированных математических моделей, можно разбивать систему на подсистемы, которые можно оптимизировать [1].



## **2 ДАТЧИКИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ УГЛА ПОВОРОТА**

### **2.1 История появления трансформаторов. Применение вращающихся трансформаторов в устройствах автоматики**

Газотурбинный двигатель (ГТД) – это воздушный двигатель, в котором воздух сжимается нагнетателем перед сжиганием в нём топлива, а нагнетатель приводится газовой турбиной, использующей энергию нагретых таким образом газов. На сегодняшний день двигатель представляет сложную структуру и включает в себя множество устройств управления, а также устройств, следящих за состоянием двигателя. Одним из таких устройств является датчик – дублированный бесконтактный синусно-косинусный трансформатор.

В системах автоматического управления большую роль играют устройства, с помощью которых можно считывать и передавать угол поворота. По характеру движения данные устройства подразделяются на системы шагового и непрерывного действия. Как показывает практика, наиболее распространен вариант датчиков непрерывного действия. Основными элементами дистанционной передачи угла являются датчик, который принимает угол передачи, линия связи и приемник, воспроизводящий угол передачи [12].

Чтобы рассматривать непосредственно принцип действия и структуру дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора, инициатором разработки математической модели которого является АО «ОДК-Авиадвигатель», обратимся непосредственно к истории появления трансформатора.

Бурное развитие трансформаторной техники началось в восьмидесятые годы XIX века, именно к тому времени назрел вопрос перехода в пользу переменного тока. Наступление энергетического кризиса поставило вопрос перед сторонниками постоянного и переменного тока, а именно передачу электроэнергии на большие расстояния и рассмотрение проблемы централизованного производства [27].

К первой конструкции простейшего трансформатора с разомкнутым магнитопроводом была индукционная катушка. Изобретение ее можно отнести еще

к 30-ым годам XIX века [9]. Впоследствии более совершенную конструкцию предложил немецкий механик Генрих Румкорф, именно его именем в дальнейшем и стали называть индукционную катушку. Роль индукционной катушки, превратившейся в аппарат, названный позднее трансформатором, как средства электрического разделения цепей переменного тока.

Развитие автоматических систем управления в XX веке потребовало разработки трансформаторов, с помощью которых можно было бы точно измерять угловые координаты. Поэтому были разработаны вращающиеся (поворотные) трансформаторы [14].

Вращающийся или поворотный трансформатор – электрическая микромашина системы автоматики, резольвер (англ. Resolver\_(electrical)), предназначенная для преобразования механического перемещения – угла поворота ротора  $\alpha$  – в электрический сигнал – выходное напряжение  $U$ , амплитуда которого пропорциональна или является функцией (чаще всего,  $\sin\theta$  или  $\cos\theta$ ) угла поворота ротора. Это электрическая машина, принцип работы основан на индукции с малой мощностью [10].

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) применяются в аналого-цифровых преобразователях, системах передачи угла высокой точности, в качестве датчиков обратной связи в следящих системах, бортовой аппаратуре. В аналого-цифровых преобразователях это «угол-амплитуда-код» и «угол-фаза-код» [2].

По конструктивному исполнению вращающиеся трансформаторы крайне многообразны. ПТ аналогичны синхронным электродвигателям с возбуждаемым переменным током ротора. Работа ВТ возможна при выполнении ряда условий: если неподвижный – статор и вращающийся – ротор. Концы обмоток статора крепятся непосредственно к неподвижным клеммам. Концы, проходящие на роторе, в первую очередь крепятся на токосъемные щетки, а затем на сами клеммы.

Наиболее распространенным вариантом являются двухполюсные трансформаторы, производимые по принципу асинхронных двигателей с короткозамкнутыми кольцами. Детали ротора и статора необходимо выполнять таким образом, чтобы как можно тщательнее они были изолированными друг от

друга листов электротехнической стали с повышенными электромагнитными свойствами. В свою очередь, листы стали должны выштамповываться с высокой степенью точности. В пазы полузакрытого типа обмотка статора и ротора укладывается таким образом, что обмотки двух фаз сдвинуты относительно друг друга на 90 электрических градусов. Для обеспечения однородных магнитных свойств применяют веерную сборку листов и скос пазов на одно зубцовое деление. Магнитопровод трансформатора всегда выполняют ненасыщенным, чтобы до минимума снизить влияние нелинейности кривой намагничивания стали на выходные характеристики.

На сегодняшний день предпочтительным вариантом использования являются двухполюсные ВТ с двумя парами одинаковых взаимно перпендикулярных обмоток: имеем статорные обмотки  $W_1$  и  $W_k$  (C1–C2 и C3–C4), к роторным обмоткам относятся  $W_2$  и  $W_3$  (P1–P2 и P3–P4) (рисунок 2.1).

В зависимости от схемы включения обмоток и схемы включения в автоматические системы СКВТ могут, работая в различных режимах, выполнять различные функции [12].

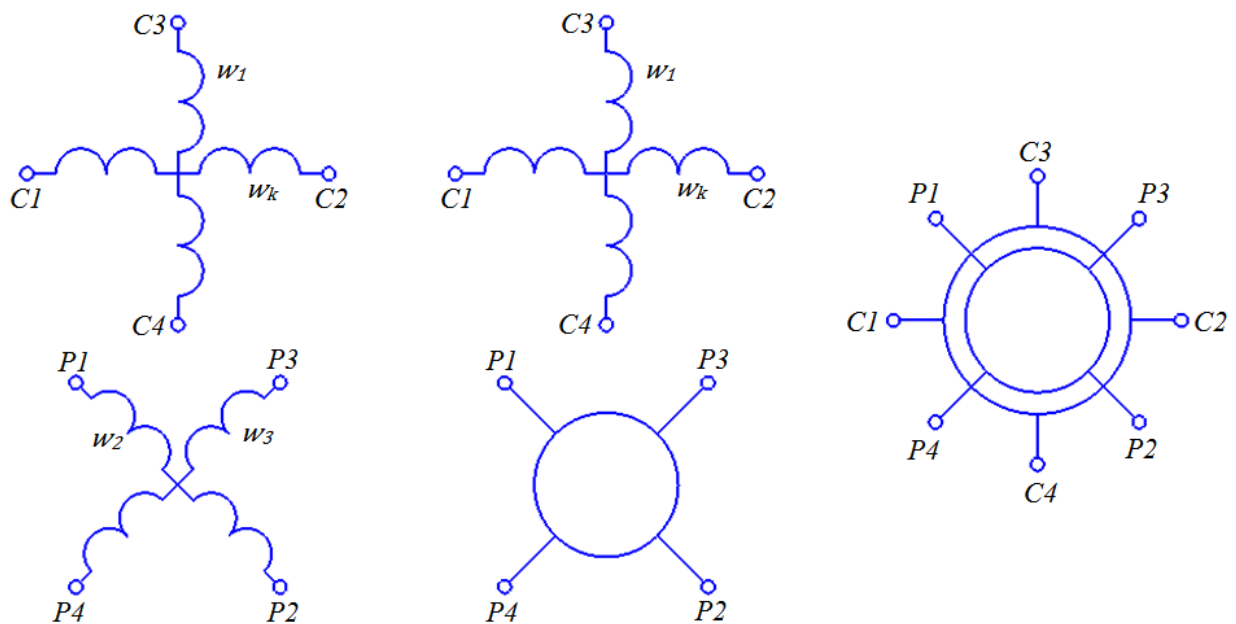


Рисунок 2.1 – Расположение обмоток двухполюсного вращающегося трансформатора

По классификации поворотные трансформаторы (ПТ) разделяют по способу включения обмоток статора и ротора.

Существует множество датчиков для передачи угла. Для мобильного электронного имитатора ГТУ, рассмотрим альтернативные варианты устройств передачи угла поворота для входного направляющего аппарата (ВНА) лопаток компрессора ГТУ.

Устройствами для передачи угла поворота являются:

- 1) Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ):
  - а) СКВТ в синусном режиме,
  - б) СКВТ в синусно-косинусном режиме,
- 2) Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ),
- 3) Потенциометрическая система дистанционной передачи угла.

Рассмотрим возможные варианты применения устройств в качестве датчика передачи угла поворота лопаток компрессора в ГТУ электростанции.

## **2.2 Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ) в синусном режиме**

Синусно-косинусный трансформатор в данном режиме работы использует только одну обмотку ротора  $w_2$ , которая является синусной (рисунок 2.2,а). При включении обмотки возбуждения  $w_1$  в сеть в ней появляется ток  $I_1$ , который наводит магнитный поток  $\Phi_1$ .

Магнитный поток  $\Phi_1$ , сцепляясь с вторичной обмоткой, наводит в ЭДС  $\dot{E}_{w_2}$ . Величина напряжения зависит от положения вторичной обмотки относительно обмотки возбуждения, то есть от угла  $\alpha$  (угол положения ротора). В режиме холостого хода поворотного трансформатора на выходе появляется напряжение, которое определяется по формуле:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2m} \sin \alpha, \quad (2.1)$$

где  $\dot{U}_{2m}$  – наибольшее значение напряжения, соответствующее углу  $\alpha = 90^\circ$  (совпадение осей обмоток  $w_1$  и  $w_2$ ) [17].

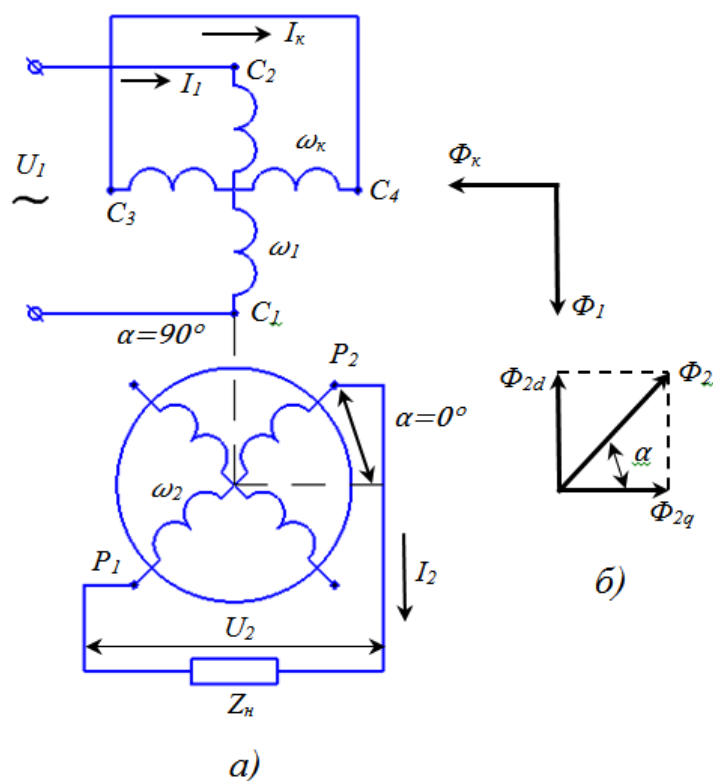


Рисунок 2.2 – Синусный вращающийся трансформатор: а) синусный режим работы, б) направления магнитных потоков по продольной и поперечной оси

При включении в цепь вторичной обмотки  $P_1 - P_2$  нагрузки  $Z_H \neq 0$ , в ней появляется ток  $I_2$ , величина которого определяется ЭДС  $\dot{E}_{w_2}$ , а также собственным сопротивлением обмотки  $Z_{w_2}$  и сопротивлением нагрузки  $Z_H$ . Значение тока в обмотке определится выражением:

$$\dot{I}_{w_2} = \dot{E}_{w_2} / (Z_{w_2} + Z_H). \quad (2.2)$$

Ток вторичной обмотки наводит магнитный поток  $\dot{\Phi}_2$ , который можно разложить на две составляющие: продольную и поперечную. Поток направлен по оси обмотки  $w_2$ .

Продольная составляющая направлена по продольной оси вращающегося трансформатора навстречу магнитному потоку возбуждения и определяется из выражения  $\dot{\Phi}_{2d} = \dot{\Phi}_2 \sin \alpha$ . Поперечная составляющая направлена по поперечной оси ПТ и направлена перпендикулярно обмотке возбуждения, что вызывает

искажение магнитного поля ВТ (см. рисунок 2.2,б). Определяется из выражения  $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$ .

Магнитный поток  $\dot{\Phi}_{2d}$  оказывает размагничивающее действие. Для уравнивания необходимо увеличить ток в обмотке возбуждения  $I_1$ .

Поперечная составляющая  $\dot{\Phi}_{2q}$  наводит ЭДС самоиндукции в обмотке  $w_2$ , а, следовательно, нарушает синусоидальную зависимость напряжения  $U_2$  от угла  $\alpha$ , что приводит к погрешности трансформатора. Для снижения влияния поперечной составляющей применяют метод симметрирования трансформатора. Существует два вида симметрирования: первичное и вторичное.

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусном режиме при подключении одной вторичной обмотки, применяется метод первичного симметрирования. Суть метода заключается в использовании компенсационной обмотки  $w_k$ . Обмотка  $w_k$  замыкается накоротко при выполнении условия  $Z_i + Z_{л} \approx 0$ , а именно сумма внутреннего сопротивления источника ( $Z_i$ ) и соединительных проводов ( $Z_{л}$ ) должно быть эквивалентно нулю. При питании ПТ, как правило, такая ситуация встречается редко. Поскольку подача напряжения осуществляется от источника небольшой мощности, поэтому  $Z_i$  достаточно велико. Устранение данной проблемы производится путем замыкания компенсационной обмотки  $w_k$  на резистор сопротивлением  $Z_{к.н.} = Z_i + Z_{л}$ .

Магнитный поток по поперечной оси  $\dot{\Phi}_{2q}$ , сцепляясь с компенсационной обмоткой, в ней появляется ЭДС  $E_k$ . За счет того, что обмотка замыкается накоротко, то в ней наводится ток  $I_k$ . В свою очередь, ток компенсационной обмотки создает магнитный поток  $\Phi_k$ . По закону Ленца, поток направлен в противоположную сторону относительно потока  $\dot{\Phi}_{2q}$ . Таким образом, поток по поперечной оси будет значительно скомпенсирован потоком компенсационной обмотки  $\Phi_k$ . Это приводит к снижению погрешности, вызванной нагрузкой, вращающего трансформатора [28].

Метод вторичного симметрирования в синусно-косинусном вращающемся трансформаторе в синусном режиме не используется, так как условием является выражение:

$$Z_{w_2} + Z_{H_2} = Z_{w_3} + Z_{H_3}. \quad (2.3)$$

Из выражения (2.3) видно, что невозможно получить равенство полных сопротивлений цепей вторичной обмотки, так как на роторе используется одна обмотка. Поскольку правая часть выражения равно нулю, а сумма левой части отличная от нуля  $Z_{w_2} + Z_{H_2} \neq 0$ , то зависимость не выполняется [17].

Таким образом, на практике данный вид трансформаторов применяется редко, вследствие наличия погрешности при нагрузке вращающегося трансформатора. Используют только в тех случаях, когда сопротивление нагрузки не значительно или когда напряжение вторичной обмотки подается на электронный усилитель. Поэтому использую чаще всего СВКТ в синусно-косинусном режиме.

### 2.3 Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ)

Линейную зависимость выходного напряжения от угла поворота ротора  $U = c\alpha$ , можно получить, используя синусную обмотку СКВТ. Чтобы получить линейную зависимость выходного напряжения от угла поворота ротора  $\alpha$ , необходимо, чтобы это напряжение определялось уравнением:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 \frac{\sin \alpha}{1+m \cos \alpha}, \quad (2.4)$$

где  $m$  – величина постоянная, определяемая магнитными и электрическими параметрами ЛВТ,  $U_1$  – напряжение питающей сети.

Величина малой погрешности СВКТ находится лишь в зоне углов  $-30^\circ < \alpha < +30^\circ$ . Для расширения диапазона углов  $\alpha$  линейной зависимости  $U_2=f(\alpha)$  применяют специальные схемы соединения обмоток СКВТ.

В системах автоматического управления применяются линейные вращающиеся трансформаторы с первичным и вторичным симметрированием. Линейная зависимость выходного напряжения от угла поворота представлена на рисунке 2.3. Для получения данной зависимости при первичном симметрировании

статорную обмотку S и косинусную обмотку В (рисунок 2.4,а) соединяется последовательно и подключается к сети с напряжением  $U_1$ . Квадратурная обмотка (К) замыкается накоротко или на некоторое сопротивление  $Z_{Кн}$ . Обмотка А является синусной и соединяется с нагрузочным сопротивлением  $Z_{Ан}$ . С данной обмотки снимается выходное напряжение.

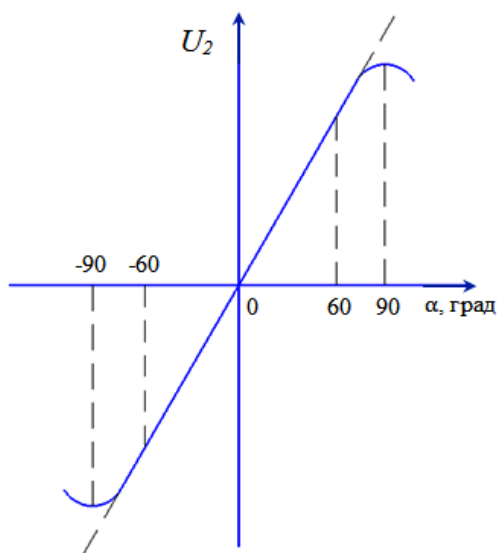


Рисунок 2.3 – Зависимость выходного напряжения от угла поворота

При первичном симметрировании поперечный поток роторной обмотки уменьшается током компенсационной обмотки. Данный ток, полученный в компенсационной обмотке, будет наводить поток, противодействующий поперечному магнитному потоку. Принцип действия аналогичный СКВТ. Полученное значение скомпенсированного поперечного потока  $\Phi_q$  будет оказывать незначительное влияние на выходную характеристику напряжения.

Если принять допущение, что  $\Phi_q$  эквивалентно нулю, то анализируя процессы вращающегося трансформатора будем рассматривать только потоки обмоток по продольной оси. Пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке (S и К), если считать, что первичное напряжение  $U_1$  уравнивается ЭДС  $E_s$  обмотки S и ЭДС  $E_s = E_s k_m \cos \alpha$  косинусной обмотки:

$$-\dot{U}_1 = \dot{E}_s + \dot{E}_s k_m \cos \alpha = \dot{E}_s (1 + k_m \cos \alpha), \quad (2.5)$$

где  $k_m = w_A/w_S$  – коэффициент трансформации ЛВТ.



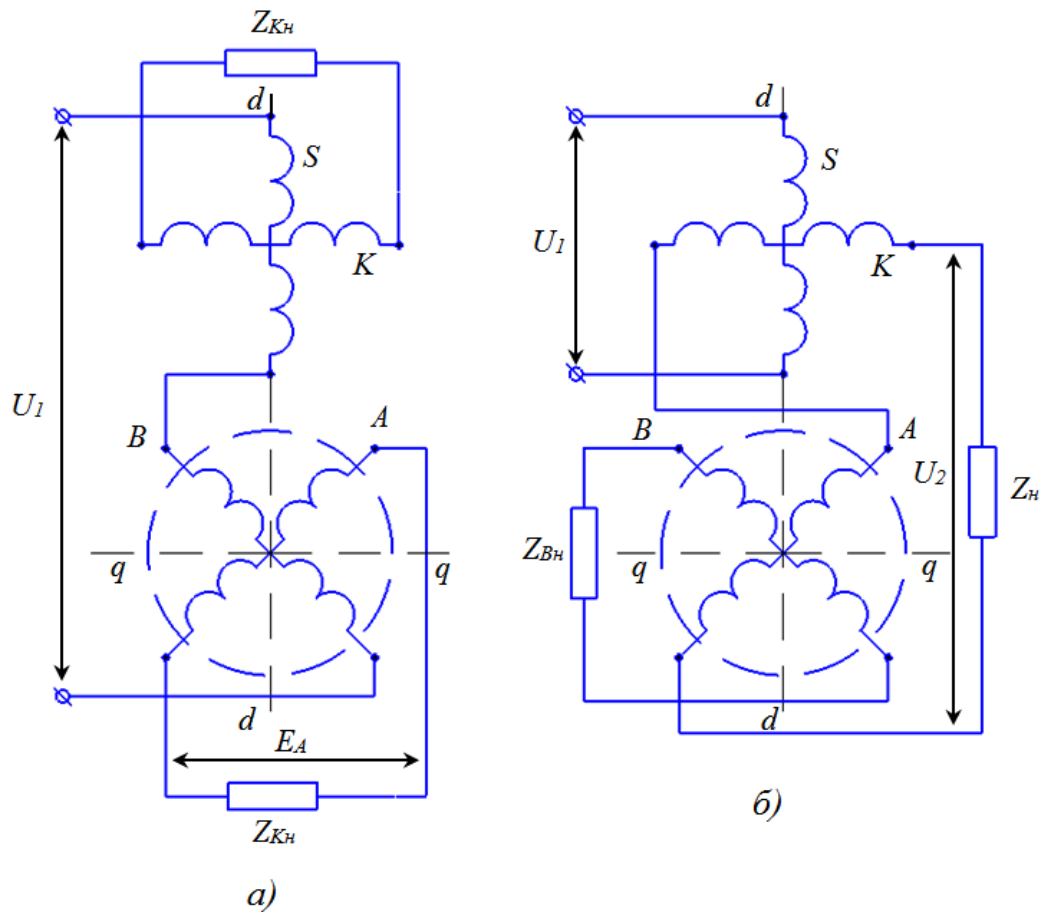


Рисунок 2.4 – Схемы ЛВТ при первичном (а) и вторичном (б) симметрировании

При применении допущения  $\Phi_q = 0$  (значение поперечного потока отсутствует), определяем выходную величину ЭДС  $\dot{E}_A$  синусной обмотки:

$$\dot{E}_A = \dot{E}_s k_m \sin \alpha. \quad (2.6)$$

Получим из выражения (2.6) ЭДС первичной обмотки  $S$  и подставим в (2.5), получаем:

$$-\dot{U}_1 = \dot{E}_A (1 + k_m \cos \alpha) / k_m \sin \alpha. \quad (2.7)$$

Из зависимости (2.7) видно:

$$\dot{E}_A = -\dot{U}_1 k_m \sin \alpha / (1 + k_m \cos \alpha). \quad (2.8)$$

Проводимый анализ уравнения (2.8) показывает, что отклонение функции  $E_A = f(\alpha)$  от прямой зависимости будут незначительными, если коэффициент трансформации находится в пределах  $k_m = 0,5 - 0,6$ . Если отклонение мало, то можно сказать, что погрешность ЛВТ минимальна. Оптимальным значением

коэффициента трансформации ПТ будет  $k_m = 0,54$ , тем самым угол  $\alpha$  находится в диапазоне от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ . Погрешность не превышает 0,1 %.

В реальных устройствах линейных вращающихся трансформаторов  $k_m = 0,56 - 0,58$ . Теоритическим значением является  $k_m = 0,54$ , но при этой величине не учитываются собственные сопротивления обмоток (активные сопротивления и сопротивление рассеяния). Что приводит к некорректной работе выходной характеристики ЛВТ [12].

При вторичном симметрировании ЛВТ (см. рисунок 2.4,б) нагрузка  $Z_n$  соединяется последовательно с обмоткой статора (К) и обмоткой ротора (А). Обмотка S присоединена к сети, а к обмотке В подключено симметрирующее сопротивление  $Z_{вх}$ . Величину этого сопротивления подбирают таким образом, чтобы поперечные МДС обмоток А и В компенсировали друг друга. Косинусная обмотка является симметрирующей. Выходное напряжение снимается с соединенных последовательно обмоток – квадратурной К и синусной А. Обеспечение взаимной компенсации поперечных МДС обмоток А и В, определяется из условия:

$$Z_B + Z_{вх} = 2(Z_A + Z_n + Z_K). \quad (2.9)$$

Особенностью ЛВТ с вторичным симметрированием является то, что его выходное сопротивление не остается постоянной при изменении угла  $\alpha$ , что значительно ограничивает области его применения. Входное сопротивление с вторичной симметрией постоянно.

## **2.4 Потенциометрическая система дистанционной передачи угла**

В технической сфере широко нашли применение устройства, измеряющие величину перемещения объектов с их преобразованием в электрический сигнал. Потенциометрический преобразователь углового движения – датчик дистанционной передачи углового движения в простейшем случае, так и линейном движении, служит в качестве потенциометр, за что и получил такое название. По характеру действия – непрерывный. Принцип работы основан на постоянном токе. Выходной

параметр представляет собой величину электрического сопротивления, которая зависит от углового или линейного движения подвижного элемента.

Потенциометр преобразует линейные или угловые перемещения в соответствующее количество напряжения, тока или сопротивления. Поэтому может работать со многими неэлектрическими величинами: давлением, уровнем, потреблением и т.д.

Потенциометрические датчики, принцип работы которых заключается в измерении движения или места расположения положения, соединяются своими подвижными контактами переменного резистора с объектами. Это могут быть клапаны, антенны, режущие инструменты и многое другое. После подачи питания на датчик с него снимается сигнал положения двигателя потенциометра, как с делителя напряжения [24].

По конструкции данный преобразователь угловых перемещений представляет собой каркас кольцевидной формы с обмоткой из проволоки – линейный (рисунок 2.5). Более совершенный вариант данного датчика представлен на рисунке 2.6 – угловой.

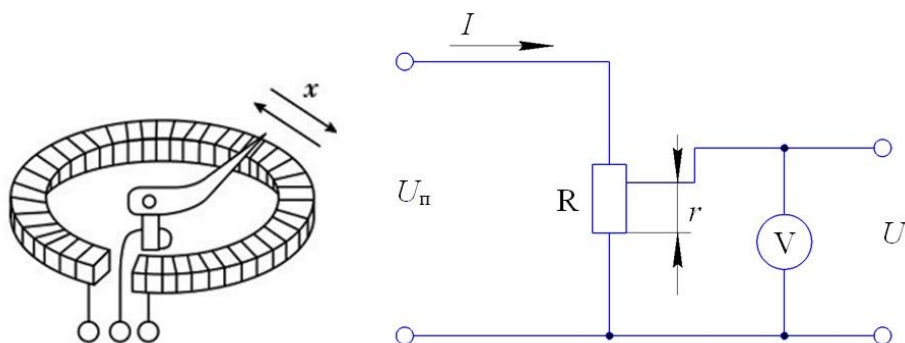


Рисунок 2.5 – Потенциометрический преобразователь угловых перемещений

Датчиком угла в этой схеме (см. рисунок 2.6) также является кольцевой потенциометр. К двум диаметрально противоположным точкам данного потенциометра подведено напряжение питания  $U_n$  постоянного тока. Как видно из схемы по потенциометру скользят три контактные щетки, которые смещены друг

относительно друга на  $120^\circ$  и связаны с осью устройства. Угол поворота устройства передается на пульт управления. К щеткам прикреплены проводники, которые образуют линию связи с приемником. В местах ее соприкосновения с обмоткой витки очищены от изоляции. Подвижный контакт в устройствах может перемещаться поступательно или вращательно. В последнем случае устройства могут быть одно- или многооборотного исполнения.

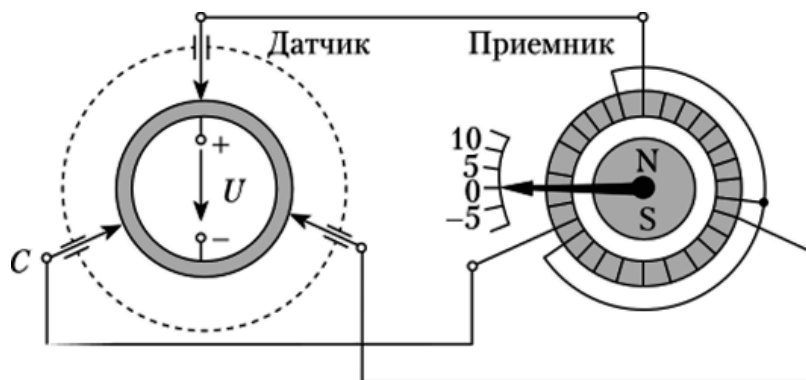


Рисунок 2.6 – Потенциометрическая система дистанционной передачи угла

Приемник представляется в виде тороидальной (кольцевой) магнитной цепи, на которую намотаны три обмотки. Обмотки магнитной цепи, также как и контактные щетки, смещены друг относительно друга на  $120^\circ$ . Как правило, соединяются в звезду или треугольник.

Как видно из рисунка 2.6, внутри приемника расположен свободно вращающийся магнит NS с закрепленной к нему стрелкой. При повороте подвижной части датчика его щетки переходят с одних точек потенциометра на другие. Следовательно, получается изменение потенциала каждой точки, что приводит к перераспределению токов в обмотках приемника. МДС изменяется, и направление результирующего магнитного потока, образованного тремя обмотками приемника, изменяется. Поток, образованный катушками приемника и направленный по его диаметру, поворачивается на угол, равный углу поворота оси датчика. Свободно вращающийся постоянный магнит устанавливается вдоль оси потока приемника, повторяя тем самым движение оси датчика. Один датчик в потенциометрических

системах дистанционной передачи угла может соединяться с несколькими приемниками.

Если ось приемника должна преодолевать некоторый момент сопротивления, например, от сил трения, то постоянный магнит будет устанавливаться не точно по оси потока, а с некоторым отклонением или ошибкой. По этой причине описываемая система используется, как правило, только при малых моментах сопротивления, когда ось приемника несет на себе лишь легкую стрелку.

Потенциометрическая система дистанционной передачи угла обладает рядом достоинств:

- 1) простота конструкции,
- 2) низкая цена,
- 3) хорошая разрешающая способность,
- 4) комплектность и небольшой вес,
- 5) обеспечивают стабильные характеристики и показания.

Безусловно, у данных датчиков имеются свои слабые стороны. Рассматривая проволочные потенциометры, можно назвать недостатки:

- 1) имеют слабую надежность контактов, что приводит к их дребезгу;
- 2) вследствие коррозии и эрозии электропровода возникает явление неустойчивости переходного сопротивления между движком и обмоткой;
- 3) сложность подбора материала для выполнения обмотки, так как предъявляются жесткие требования к удельному электрическому сопротивлению, стойкости к коррозии и температурному влиянию, поэтому применяются такие материалы как манганин, константан, никельхромовые сплавы;
- 4) применение щеточного узла усложняет конструкцию, что приводит к снижению надежности.

Далее рассмотрим принцип действия датчика ДБСКТ в синусно-косинусном режиме. Для выбора наилучшего варианта необходимо сравнить все варианты датчиков для определения углового положения вала.

### 3 ДУБЛИРОВАННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР. УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

#### 3.1 Дублированный бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме (СКВТ)

Устройство датчика ДБСКТ относится к области электротехники, а именно к информационным электрическим машинам, предназначен для работы в трансформаторных схемах дистанционной передачи угла поворота вала, может быть использован в качестве датчика углового положения в устройствах управления. Поэтому может быть использован в качестве датчика обратной связи при управлении лопатками ВНА газотурбинного двигателя. Общий вид датчика ДБСКТ представлен на рисунке 3.1.

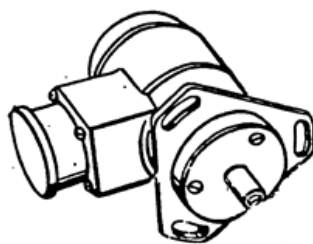


Рисунок 3.1 – Общий вид датчика ДБСКТ–250–1Ш

Дублированный бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (резольвер) содержит статор и ротор в виде магнитопроводов с пазами на наружной и внутренней сторонах. Такой тип трансформатора имеет не две, а четыре обмотки: две на статоре ( $w_1$  и  $w_R$ ) и две на роторе ( $w_2$  и  $w_3$ ). Обмотки статора имеют сдвиг в пространстве на угол  $\pi/2$  и чаще всего имеют одинаковое число витков ( $w_1 = w_R$ ), что дает возможность получить одинаковое собственное сопротивление ( $Z_1$  и  $Z_R$ ).

По обмоткам еще стоит сказать, что имеем на статоре двухфазные и однофазные на роторе концентрические распределенные обмотки, кольцевой

трансформатор, с целью повышения точности и обеспечения технологичности конструкции применяется скос пазов ротора [17].

Принцип работы синусно-косинусного вращающегося трансформатора в синусно-косинусном режиме основан на включении двух обмоток ротора –  $w_2$  и  $w_3$  (рисунок 3.2,а), которые смещены друг относительно друга на пространственный угол  $90^\circ$ . При включении обмотки статора в сеть переменного синусоидального тока, магнитный поток  $\Phi_1$  сцепляется с обмотками ротора и наводит в них ЭДС. Тогда ЭДС обмотки  $w_1$  будет меняться по закону синуса, а ЭДС  $w_2$  будет меняться по закону косинуса, однако величина обеих сил будет зависеть от угла поворота ротора. Получаем напряжение на выходе обмотки ротора  $w_2$  от угла поворота  $\alpha$  определяется зависимостью:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2m} \sin \alpha, \quad (3.1)$$

а напряжение на выходе обмотки  $w_3$  определяется формулой:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{3m} \sin \left( \frac{\pi}{2} + \alpha \right) = \dot{U}_{3m} \cos \alpha. \quad (3.2)$$

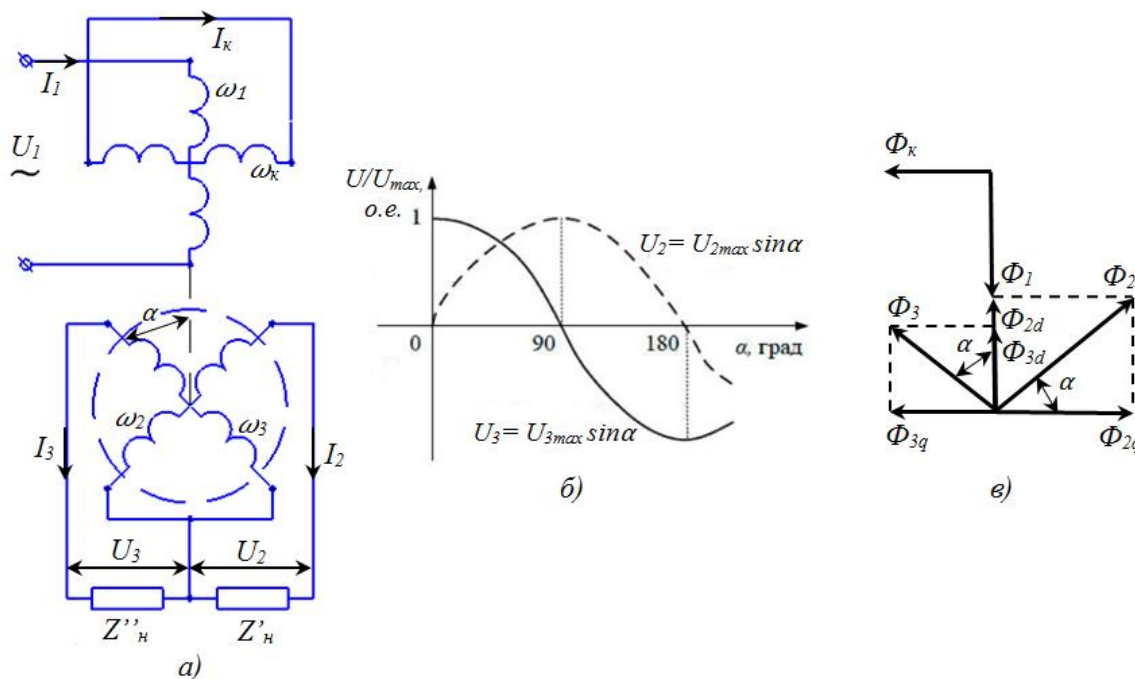


Рисунок 3.2 – Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме

Вследствие данных зависимостей такие вращающиеся трансформаторы и стали называть синусно-косинусными. Если ПТ предназначен для измерения отклонения угла поворота от нулевого значения, то рекомендуется использовать синусоидальную обмотку в качестве выходного сигнала. Если необходимо получить падающую калибровочную характеристику при углах поворота от 0 до 90 °, можно снять выходное напряжение с косинусной обмотки [28].

Однако можно представить относительность начальных точек диапазона измерения. Для этого можно легко перемещать с любой стороны благодаря соответствующему повороту корпуса ВТ относительно фиксированной шкалы, когда он установлен на измеряемом объекте.

Из зависимости (3.2) видно, что напряжение на выходе  $\dot{U}_3$  при повороте ротора на угол  $\alpha$  изменяется пропорционально косинусу этого угла.

Следовательно, на выходе трансформатора получаем два напряжения  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$ . Напряжение  $\dot{U}_2$  меняется пропорционально закону  $\sin\alpha$ , следовательно,  $\dot{U}_3$  изменяется пропорционально  $\cos\alpha$  (см. рисунок 3.2,б).

Роторные обмотки  $w_2$  и  $w_3$ , как правило, имеют одинаковые параметры. Поэтому амплитудные значения напряжения  $\dot{U}_{2m}$  и  $\dot{U}_{3m}$  будут одинаковы и определяются выражением (3.3).

$$\dot{U}_{2m} = \dot{U}_{3m} = (w_2/w_1)\dot{U}_1, \quad (3.3)$$

где  $\dot{U}_1$  – входное напряжение ПТ, определяемое на зажимах обмотки возбуждения  $w_1$ .

Используя зависимость выражения (3.3), можно определить выходные напряжения СКВТ. Запишем значения напряжения для обмоток  $w_2$  и  $w_3$  по формулам (3.4) и (3.5) соответственно:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1(w_2/w_1) \sin \alpha, \quad (3.4)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_1(w_3/w_1) \cos \alpha. \quad (3.5)$$

Рассмотрим режим работы трансформатора, когда нагрузочные сопротивления неодинаковы,  $Z'_H$  – сопротивление синусной нагрузочной обмотки и  $Z''_H$  – сопротивление косинусной нагрузочной обмотки.



Из рисунка 3.2,а видно, что при включении данных сопротивлений в роторную цепь по ним начинают протекать токи  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$ . Данные токи создают магнитные потоки  $\dot{\Phi}_2$  и  $\dot{\Phi}_3$  (см. рисунок 3.3,в). Определим поперечные составляющие потоков  $\dot{\Phi}_{2q} = \dot{\Phi}_2 \cos \alpha$  и  $\dot{\Phi}_{3q} = \dot{\Phi}_3 \sin \alpha$ . Поскольку,  $\dot{\Phi}_{2q}$  и  $\dot{\Phi}_{3q}$  встречно направлены друг другу и поэтому частично компенсируются. Достижение полной компенсации наступает при равенстве магнитодвижущих сил синусной и косинусной обмоток по поперечной оси:

$$\dot{I}_2 w_2 k_2 \cos \alpha = \dot{I}_3 w_3 k_3 \sin \alpha, \quad (3.6)$$

где  $k_2$  и  $k_3$  – обмоточные коэффициенты обмоток ротора.

Определим токи в обмотках ротора при полной компенсации по формулам (3.7) и (3.8):

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2 + Z'_H} = \frac{(w_2/w_1)\dot{E}_1 \sin \alpha}{Z_2 + Z'_H}, \quad (3.7)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_3}{Z_3 + Z'_H} = \frac{(w_3/w_1)\dot{E}_1 \cos \alpha}{Z_3 + Z'_H}, \quad (3.8)$$

где  $Z_2$  и  $Z_3$  – полные сопротивления синусной и косинусной обмоток вращающегося трансформатора.

Полученные токи нагрузки (3.7) и (3.8) подставим в выражение (3.6), тем самым получается равенство:

$$\frac{(w_2/w_1)\dot{E}_1 \sin \alpha}{Z_2 + Z'_H} w_2 k_2 \cos \alpha = \frac{(w_2/w_1)\dot{E}_1 \sin \alpha}{Z_2 + Z'_H} w_3 k_3 \sin \alpha. \quad (3.9)$$

Синусная и косинусная обмотка имеют одинаковое число витков  $w_2 = w_3$ , следовательно, получаем одинаковые сопротивления  $Z_2$  и  $Z_3$ . Тем самым выражение (3.9) видоизменится:  $Z_2 + Z'_H = Z_3 + Z''_H$ .

Так как обычно собственные сопротивления вторичных обмоток трансформатора одинаковы ( $Z_2$  и  $Z_3$ ), то получаем, что для осуществления вторичного симметрирования необходимо, чтобы нагрузочные сопротивления роторных обмоток удовлетворяли условию  $Z'_H = Z''_H$ .

Соответственно, при равенстве нагрузочных сопротивлений синусной и косинусной обмоток получаем полную компенсацию поперечных составляющих магнитных потоков. Компенсация поперечных составляющих потоков реакции

вторичных обмоток называется вторичным симметрированием. Схема для вторичного симметрирования представлена на рисунке 3.3.

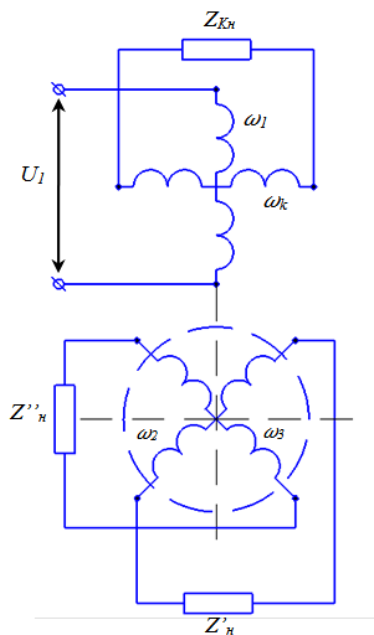


Рисунок 3.3 – Схема СКВТ при первичном и вторичном симметрировании

Особенностью вторичного симметрирования является то, что при его осуществлении входное сопротивление вращающегося трансформатора, а, следовательно, и потребляемый ток  $\dot{I}_1 = \dot{U}_1 / \dot{Z}_1$  при постоянном напряжении питания  $\dot{U}_1$  не зависит от угла поворота ротора  $\alpha$ .

Если  $Z'_н \neq Z''_н$ , то поперечные магнитные потоки  $\dot{\Phi}_{2q}$  и  $\dot{\Phi}_{3q}$  компенсируются не полностью, поэтому вторичное симметрирование получается частичным. Тогда получаем величину поперечного магнитного потока вращающегося трансформатора:

$$\dot{\Phi}_q = \dot{\Phi}_{2q} + \dot{\Phi}_{3q}. \quad (3.10)$$

Магнитный поток  $\dot{\Phi}_q$  наводит ЭДС самоиндукции, это приводит к искажению выходного напряжения. Компенсация может быть достигнута путем применения метода первичного симметрирования. Для этого необходимо добавить в определенное сопротивление ( $Z_{кн}$ ) в цепь короткозамкнутой компенсационной обмотки ( $w_k$ ), расположенной на статоре. В этой обмотке будет наводиться поток  $\dot{\Phi}_k$ , вследствие протекания тока ( $\dot{I}_k$ ) квадратурной обмотки.

Как показывает практика использования ДБСКТ, первичное симметрирование получается, если выполняется условие:

$$Z_{\text{ист}} + Z_{\text{л}} + Z_{w_1} = Z_{\text{К}} + Z_{\text{КН}}, \quad (3.11)$$

где  $Z_{\text{ист}}$  – сопротивление источника, питающего трансформатор;  $Z_{\text{л}}$  – сопротивление линии питания, соединяющей источник питания и обмотку ( $w_1$ ) трансформатора;  $Z_{\text{К}}$  и  $Z_{\text{КН}}$  – собственное сопротивление и добавочное сопротивление компенсационной квадратурной обмотки.

Уравнение (3.11) показывает, что для выполнения условия первичного симметрирования необходимо, чтобы полные сопротивления цепей обмоток статора были равны (симметричны).

Поскольку сопротивление линии ( $Z_{\text{л}}$ ) мало, поэтому им можно пренебречь, а сопротивления статорных обмоток равны ( $Z_{w_1} = Z_{\text{К}}$ ), тогда условием первичного симметрирования является равенство сопротивлений источника питания и сопротивления, подключённого к зажимам квадратурной обмотки (3.12).

$$Z_{\text{ист}} = Z_{\text{КН}}. \quad (3.12)$$

Чаще всего при практическом использовании ДБСКТ питается от источника большой мощности, поэтому сопротивление источника  $Z_{\text{ист}} = 0$ , а, следовательно,  $Z_{\text{КН}} = 0$ . Так величина сопротивления на зажимах компенсационной обмотки равна нулю, то ее можно замкнуть накоротко.

Физический смысл первичного симметрирования заключается в том, что погрешность возникающая из-за поперечной составляющей магнитного потока ротора  $\Phi_q$ , компенсируется токами протекающими по квадратурной обмотке, которые возникают при не полностью скомпенсированном поперечном потоке. Потому действие  $\Phi_q$  на практике равно эквивалентно нулю.

Особенность данного вида симметрирования в том, что сопротивление на выходе СКВТ не зависит от углового положения ротора  $\alpha$  ( $Z_{\text{вых}} = \text{const}$ ). В свою очередь, стоит отметить недостаток первичного симметрирования. Сопротивление входное ( $Z_{\text{вх}}$ ) трансформатора зависит от угла поворота ротора  $\alpha$  [26].

Мощность, которую потребляет СВКТ, не зависит от углового положения ротора. Поскольку это достигается полным вторичным симметрированием. Входное сопротивление также не зависит от угла поворота (угла  $\alpha$ ) ротора. Подбор нагрузок осуществляется методом амперметра и вольтметра (рисунок 3.4).

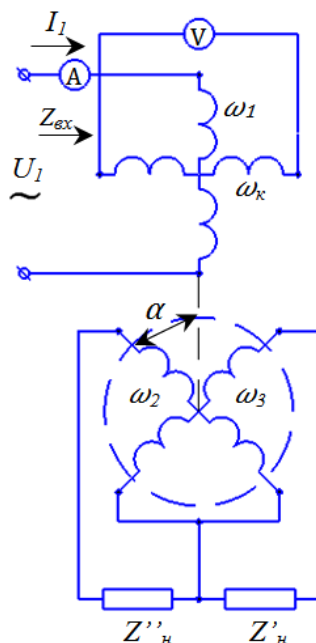


Рисунок 3.4 – Схема настройки симметрирования СВКТ методами амперметра и вольтметра

Суть метода амперметра заключается в подборе сопротивлений синусной  $Z'_n$  и косинусной  $Z''_n$  обмоток, при повороте ротора не вызывает изменения показания амперметра, включенного в цепь обмотки возбуждения.

Вторым методом вторичного симметрирования является метод вольтметра. Поскольку, поперечная составляющая магнитного потока будет наводить ЭДС, то сопротивления роторных обмоток ( $Z'_n$  и  $Z''_n$ ) подбираются таким образом, чтобы показания вольтметра (V) были равны нулю. Это будет говорить о том, что поперечная составляющая магнитного потока полностью скомпенсирована.

Чаще всего для получения стабильных и наилучших характеристик применяют одновременно оба метода симметрирования. Поэтому для практического

использования в качестве датчиков, трансформаторы данного типа выпускаются с четырьмя обмотками.

Применение ДБСКТ в средствах автоматики обусловлено малой погрешностью данных устройств, что является, несомненно, их плюсом. Но есть и минус, в частности, для обеспечения нормальной работы трансформаторной системы синхронной связи на СКВТ требуются усилители мощности со значительно большим коэффициентом усиления.

### 3.2 Сравнение датчиков передачи угла

Устройств, которые используются в качестве датчиков для передачи угла, на сегодняшний день достаточно много. В разделе 2 были рассмотрены альтернативные варианты, которые могли бы заменить датчик ДБСКТ. Выполним сравнение дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора с другими устройствами, чтобы доказать преимущества этого датчика перед подобными механизмами.

За основу сравнения выберем несколько критериев: конструктивное исполнение, точность работы (погрешность), надежность. Сравнение датчиков по выбранным критериям представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Сравнение устройств, применяемых в качестве датчиков, для передачи углового положения лопаток входного направляющего аппарата КНД ГТУ

Вид датчика	Критерий		
	Конструктивное исполнение и габариты	Точность работы (погрешность)	Надежность
<b>СКВТ в синусном режиме</b>	Конструкции аналогичны синхронным электродвигателям с возбуждаемым переменным током ротора, чаще применяется двухполюсные трансформаторы, производимые по принципу асинхронных двигателей с короткозамкнутыми кольцами)	Не высокая точность, вследствие наличия погрешности при нагрузке. Невозможность применения метода вторичного симметрирования.	1) Снижение надежности вследствие применения конструкции аналогичной синхронным электродвигателям с возбуждаемым переменным током ротора за счет применения щеточного узла. 2) Высокая степень надёжности вследствие применения конструкции аналогичной асинхронным двигателям с короткозамкнутыми кольцами

Продолжение таблицы 3.1

Вид датчика	Критерий		
	Конструктивное исполнение и габариты	Точность работы (погрешность)	Надежность
<b>Линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ)</b>	Конструкция такая же, как у СКВТ в синусном режиме	Высокая точность (линейность зависимости) в диапазоне углов $-30^\circ < \alpha < +30^\circ$ , для расширения необходимо применять специальные схемы соединения обмоток.	Конструктивная надежность такая же, как у СКВТ в синусном режиме
<b>Потенциметрическая система дистанционной передачи угла</b>	Простая конструкция (усложнение за счет применения щеточного узла), малый вес.	Стабильность показаний. Не высокая степень точности, вследствие дребезга контактов.	Низкая надежность контактов. Нестабильность переходного сопротивления между двигателем и обмоткой из-за окисления и электроэрозии провода.
<b>СКВТ в синусно-косинусном режиме (ДБСКТ)</b>	Конструкция такая же, как у СКВТ в синусном режиме	1) Высокая степень точности, вследствие применения методов первичного и вторичного симметрирования. 2) Обеспечения нормальной работы трансформаторной системы синхронной связи на СКВТ требуются усилители мощности со значительно большим коэффициентом усиления.	Конструктивная надежность такая же, как у СКВТ в синусном режиме

Из таблицы 3.1 можно сделать вывод, что датчик СКВТ в синусно-косинусном режиме или ДБСКТ является наилучшим вариантом для определения угла поворота лопаток КНД ГТУ. Так как данный тип датчика имеет высокую степень точности. Простота и надежность конструкции, схожей с асинхронными двигателями с короткозамкнутыми кольцами.

### 3.3 Применение ДБСКТ во входном направляющем аппарате

Основной функцией входного направляющего аппарата является поворот лопаток, позволяющий изменить угол входа потока воздуха в компрессор ГТУ. Компрессор газотурбинной установки создан для сжатия и последующей подачи воздушного потока в камеру сгорания. Принцип действия лопаточных компрессоров – увеличение полного давления рабочего тела за счет преобразования механической работы в кинетическую энергию рабочего тела с последующим преобразованием ее во внутреннюю энергию. Поэтому для считывания угла поворота лопаток

компрессора применяют дублированный бесконтактный синусно-косинусный трансформатор.

Датчики ДБСКТ предназначены для выдачи в САУ информации об угловом положении ВНА КВД и заслонки (тарелки) клапана перепуска воздуха за КНД.

ВНА устанавливается перед первой ступенью компрессора, чтобы создать предварительный вихревой (закрученный) поток на входе осевого компрессора в направлении вращения. Создание предварительного воздушного вихря позволяет увеличить периферическую (окружную) скорость и степень увеличения давления в компрессоре.

Входной направляющий аппарат предназначен для создания предварительного направленного воздуха к ротору компрессора, что снижает относительную скорость воздуха, поступающего на лопатки первой ступени. Конструкция входного направляющего аппарата (ВНА) осевого компрессора ГТУ показана на рисунке 3.5.

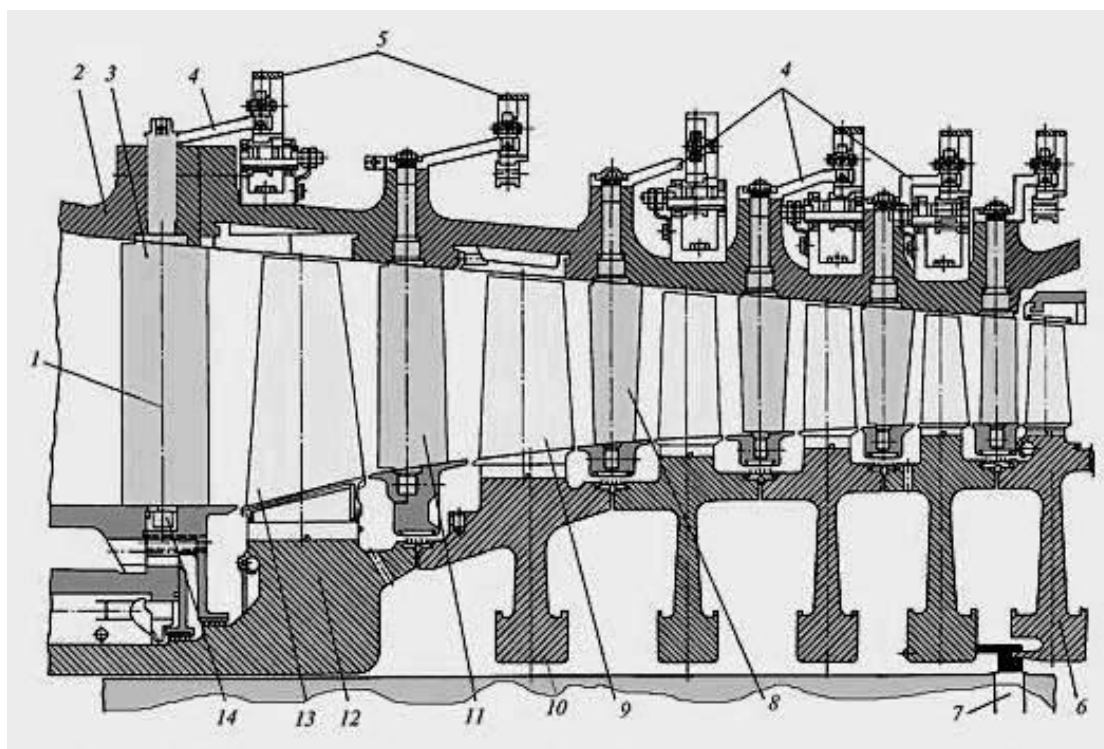


Рисунок 3.5 – Конструкция входного направляющего аппарата (ВНА) осевого компрессора ГТУ

Входная часть воздушного компрессора (рисунок 3.5) состоит: 1 – ось поворота лопатки ВНА; 2 – корпус воздушного компрессора; 3 – лопатка ВНА; 4 – поворотные рычаги направляющих лопаток; 5 – поворотное кольцо привода поворотных рычагов; 6 – диск 6-й ступени компрессора; 7 – стяжной болт ротора компрессора; 8 – направляющие лопатки 2-й ступени компрессора; 9 – рабочие лопатки 2-й ступени компрессора; 10 – диск 2-й ступени; 11 – направляющие лопатки 1-й ступени; 12 – диск 1-й ступени; 13 – рабочая лопатка 1-й ступени; 14 – цилиндрический шарнир лопатки ВНА [18].

Процесс подачи воздуха в большинстве случаев сопровождается изменением скорости потока при сохранении постоянного давления ( $P=const$ ). В свою очередь, при изменении расхода и давления воздуха ведет к изменению выходной мощности ГТУ. Изменение данных параметров приводит к снижению входной скорости воздушного потока, которая должна оставаться постоянной. Это приводит к созданию высокого угла потока на входные кромки лопаток компрессора, что приводит к увеличению величины нагрузки, а, следовательно, снижает срок службы данного агрегата. Поэтому применение ВНА для управления углом поворота лопаток позволяет сохранить постоянную скорость подачи воздуха и снизить нагрузку на компрессор. Также необходимо отметить, что установка входного направляющего аппарата позволяет поддерживать температуру газов перед газовой турбиной и за ней постоянной в диапазоне мощности примерно 100 – 80 %.

Конструктивно поворотные лопатки входного направляющего аппарата имеют сложный механизм регулирования угла. Эксплуатация данных устройств происходит в разных условиях. Поэтому рабочий механизм должен обеспечивать высокую устойчивость к загрязнению, но при этом сохранять свою основную функцию, а именно поддерживать высокую точность угла регулировки. Попадание загрязняющих веществ в устройство приводит к износу механизмов, что ведет к снижению точности аппарата и выходу его из строя. При разработке газотурбинных двигателей для электростанций основным требованием является минимальная масса, поэтому данные устройства должны также соответствовать данному параметру.



Необходимость применения дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора для ВНА в качестве считывающего устройства угла поворота, обусловлена тем, что направляющий аппарат выполняют поворотным с целью повышения энергоэффективности ГТУ и не допустить снижения экономичности при снятии нагрузки с ГТУ.

Если не следить за углом порота лопаток, а сделать ВНА жестко закрепленным, без возможности регулирования, то, как известно из опыта, ротор компрессора и электрогенератора имеют одинаковую частоту вращения (если не предусмотрена редукторная передача), то без входного направляющего аппарата поступление и расход воздуха в камеру сгорания был бы постоянным и не зависел от нагрузки. Это привело бы к повышенному потреблению топлива, даже на холостом ходу. При уменьшении расхода топлива и постоянного количества воздуха, подаваемого компрессором, температура рабочего тела перед и за газовой турбиной снижается. Это приводит к значительному снижению экономичности газовых турбин.

Осуществляя поворот лопаток ВНА всего на 25-30°, с одновременным уменьшением нагрузки позволяет уменьшить площадь проходных сечений каналов и, следовательно, уменьшить воздушный поток в камере сгорания. В то же время соотношение между расходом воздуха и топлива поддерживается постоянным.

В результате такого регулирования воздушного потока температура рабочего тела остается практически неизменной в диапазоне мощности газовой турбины до 80% от номинального значения. В определённых газовых турбинах поворотными выполняют и направляющие аппараты первых нескольких ступеней компрессора (ПНА) также вращаются, что позволяет расширить ранее указанный диапазон до 50% [20].

Таким образом, получаем необходимость применения ДБСКТ для ВНА. Так как это позволяет повысить энергоэффективность ГТУ и дает возможность изменять режим работы двигателя.

## 4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ДУБЛИРОВАННОГО БЕСКОНТАКТНОГО СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мобильный электронный имитатор представляется в виде устройства с набором контроллеров и шасси компании National Instruments.

Разработка математической модели датчика для использования ее математической модели ГТУ была основана на технических данных реального датчика ДБСКТ-250-1Ш.

Технические данные:

- 1) напряжение питания однофазного тока синусоидальной формы –  $6 \pm 0,6$  В;
- 2) частота напряжения питания –  $2000 \pm 100$  Гц;
- 3) потребляемый ток – 1...5 мА;
- 4) максимальное выходное напряжением –  $3,8 \pm 0,4$  В;
- 5) рабочая температура среды – от минус 60 °С до плюс 220 °С.

Габариты прибора синусно-косинусный трансформатор ДБСКТ-250-1Ш:

- 1) диаметр – 22мм,
  - 2) длина – 87,6мм.
- Масса – 0,2кг [15].

Датчик ДБСКТ-250-1Ш имеет два независимых канала. Каждый канал датчика имеет две выходную обмотку. Значение переменного напряжения на выходе одной из обмоток пропорционально  $\sin \alpha$ , а другой  $\cos \alpha$ , где  $\alpha$  - угол поворота вала датчика. Датчики установлены на специальных кронштейнах на ГГ.

Для управления приводом входного направляющего аппарата используется блок управления (БУ). Блок управления приводом входного направляющего аппарата (БУ ВНА) является элементом системы управления положением лопаток поворотного ВНА газотурбинной установки. БУ ВНА предназначен, в первую очередь, для применения совместно с системами автоматического управления (САУ) с двигателями ПС-90 разработки ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь), имеющими поворотный ВНА с приводом. Датчик ДБСКТ входит в данную систему, поскольку БУ ВНА обеспечивает электропитание, прием и преобразование сигнала

с датчика, а также – информационный сигнал напряжения, соответствующий фактическому положению ВНА, передаваемый в САУ [4].

Математическая модель ДБСКТ была разработана при использовании имитационного математического моделирования. Модель дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора представлена на рисунке 4.1.

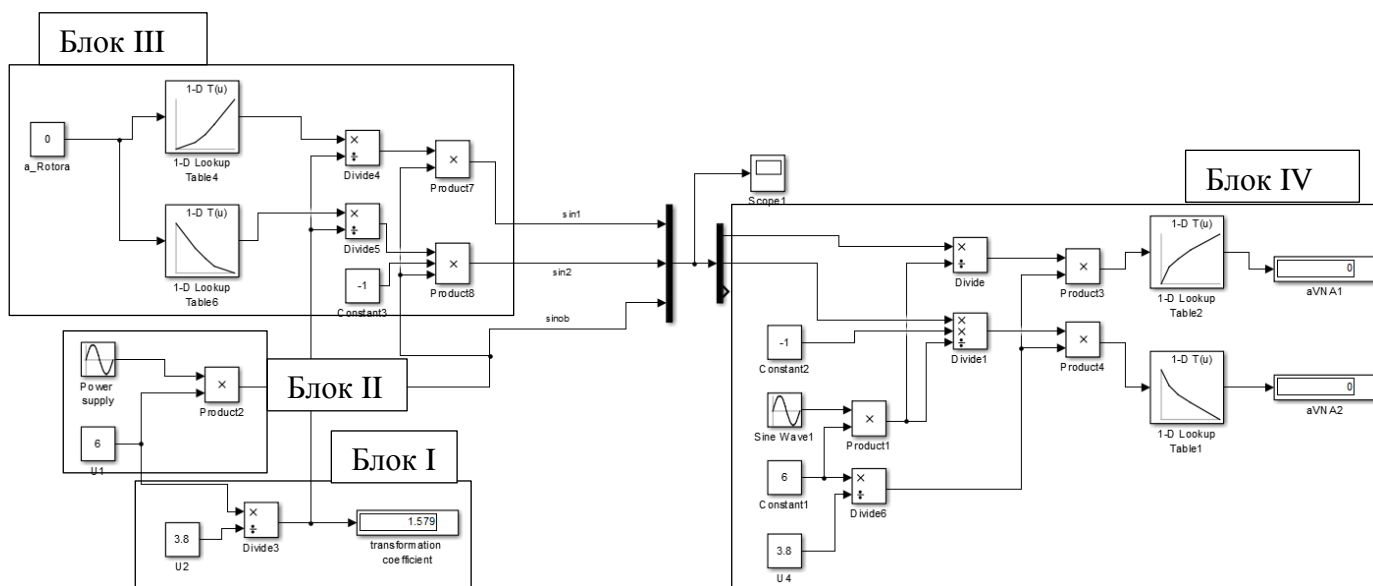


Рисунок 4.1 – Математическая имитационная модель дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора

На схеме (см. рисунок 4.1) представлены 4 блока, которые имитируют работу реального датчика ДБСКТ.

Блок I – производит расчет коэффициента трансформации трансформатора. Коэффициент трансформации определяется по формуле:

$$k = \frac{U_1}{U_2}, \quad (4.1)$$

где  $U_1$  – напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора,  $U_2$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

Используя технические данные реального датчика ДБСКТ, напряжение в статоре (входное напряжение)  $U_1 = 6$  В, а максимальное напряжение на выходе  $U_2 = 3,8$  В, рассчитаем аналитически коэффициент трансформации по формуле (4.1) и сравним со значением на полученным на рисунке 4.1 на дисплее Блока I.

$$k = \frac{6 \text{ В}}{3,8 \text{ В}} = 1,579. \quad (4.2)$$

Получаем идентичные результаты формулы (4.2) и значения рисунка 4.1 дисплея в Блоке I. Используя коэффициент трансформации полностью описываем датчик, а не принцип его работы.

Блок II математической модели имитирует работу источника питания и обмотку статора. Напряжение в статорной обмотке синусоидальной формы с амплитудой в 6 В с частотой питающей сети 2 кГц (12566.400 рад/с).

Блок III модели имитирует работу ротора вращающегося трансформатора. Угол поворота ротора представлен константой ( $a\_Rotora$ ) (см. рисунок 4.1), в реальном датчике это константа заменяется углом поворота ротора.

Блок IV – блок определения угла установки ВНА, производит прием и передачу электрического сигнала с датчика, а также передает в САУ электрический сигнал напряжения, который соответствует углу поворота ВНА.

Выполним моделирование, заведомо повернув, вал реального датчика на угол равный  $\alpha = 0^\circ$ . Математическая схема нулевого поворота ротора представлена на рисунке 4.2. Результат математического моделирования и работы реального датчика представлены на рисунках 4.3 и 4.4 соответственно. Датчик ДБСКТ в математической модели обеспечивает линейную зависимость напряжения от угла поворота.

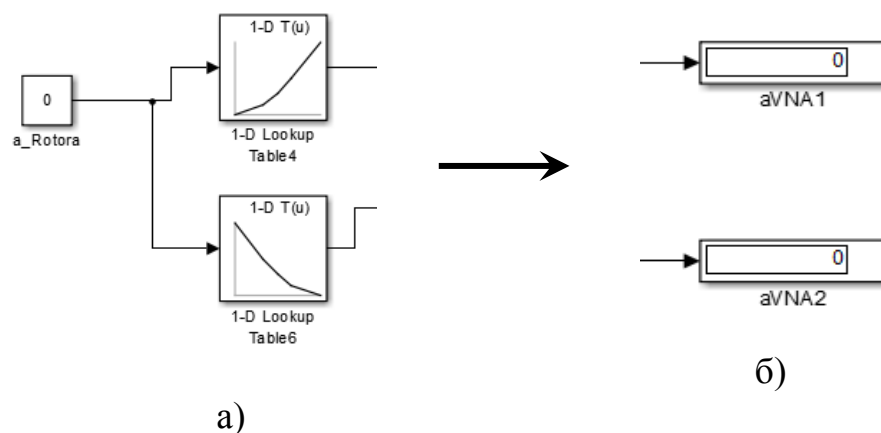


Рисунок 4.2 – Схема математической имитационной модели а) имитация поворота ротора на угол  $0^\circ$  б) информация, полученная САУ

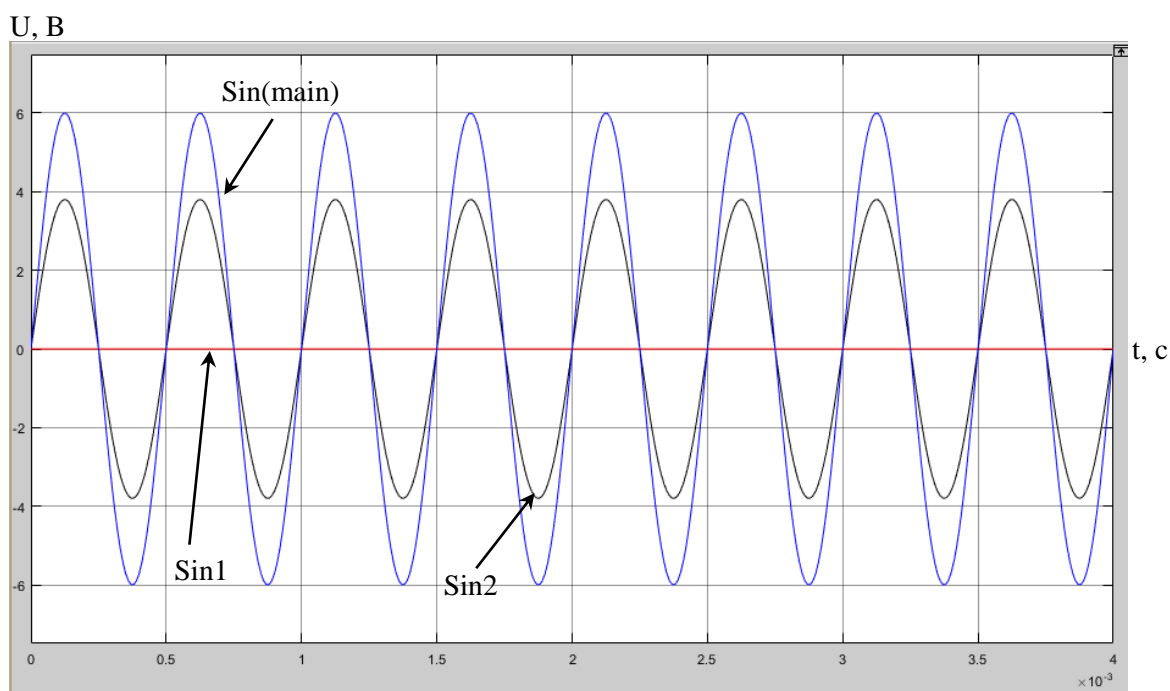


Рисунок 4.3 – Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = 0^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

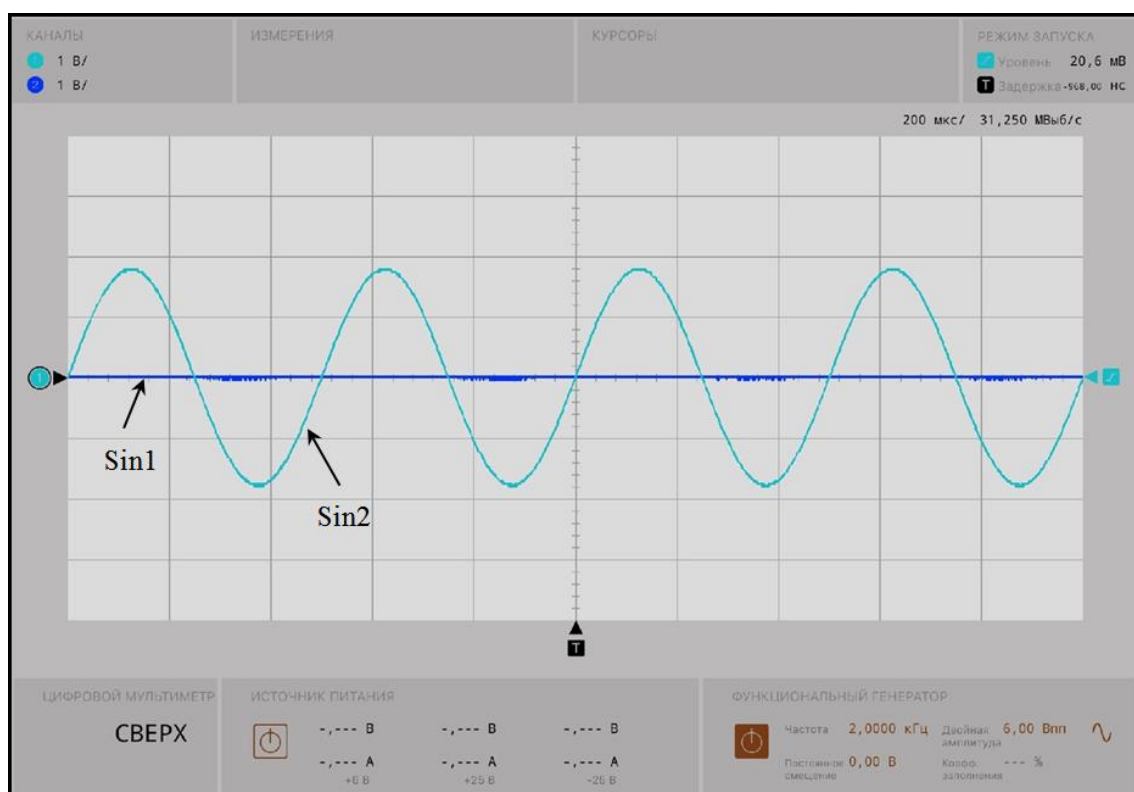


Рисунок 4.4 – Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = 0^\circ$  (без опорной синусоиды)

Так как выходные напряжения пропорциональны углу поворота, то подставляя значения  $\alpha = 0^\circ$ , в формулы (3.1) и (3.2), получим величину  $\sin(0^\circ) = 0$ , поэтому величина напряжения  $U_1 = 0$  В, а напряжение  $U_2$  пропорционально  $\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$  (сдвинут на  $90^\circ$ ). Поэтому можно сказать, что величина  $U_2$  будет изменяться по  $\cos \alpha$ , а  $\cos 0^\circ = 1$ , то напряжение  $U_2 = 3,8$  В.

Изменим угол поворота реального датчика и математической модели на  $\alpha = -40^\circ$  и сравним результат. Напряжения на выходе будут пропорциональны  $\alpha = -40^\circ$ , расчет производится также как и для  $\alpha = 0^\circ$ . Результат моделирования и работы реального датчика представлены на рисунках 4.5 и 4.6 соответственно.

На рисунках 4.4 и 4.6 не показана опорная синусоида (Sin (main)), так как осциллограф двух канальный, поэтому нет возможности вывести третий сигнал.

Поворачивая ротор на  $\alpha = -45^\circ$ , получаем равные величины амплитуд синусоид, поскольку  $\sin\left(-\frac{\pi}{4}\right) = \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ .

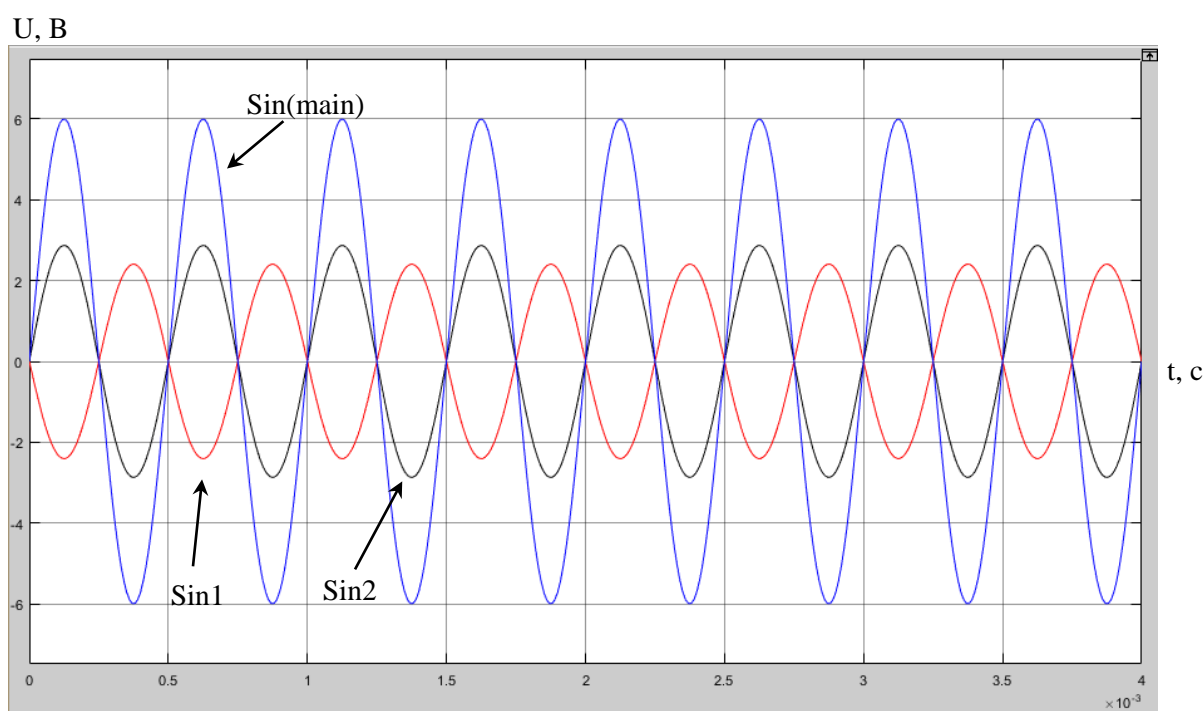


Рисунок 4.5 – Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -40^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

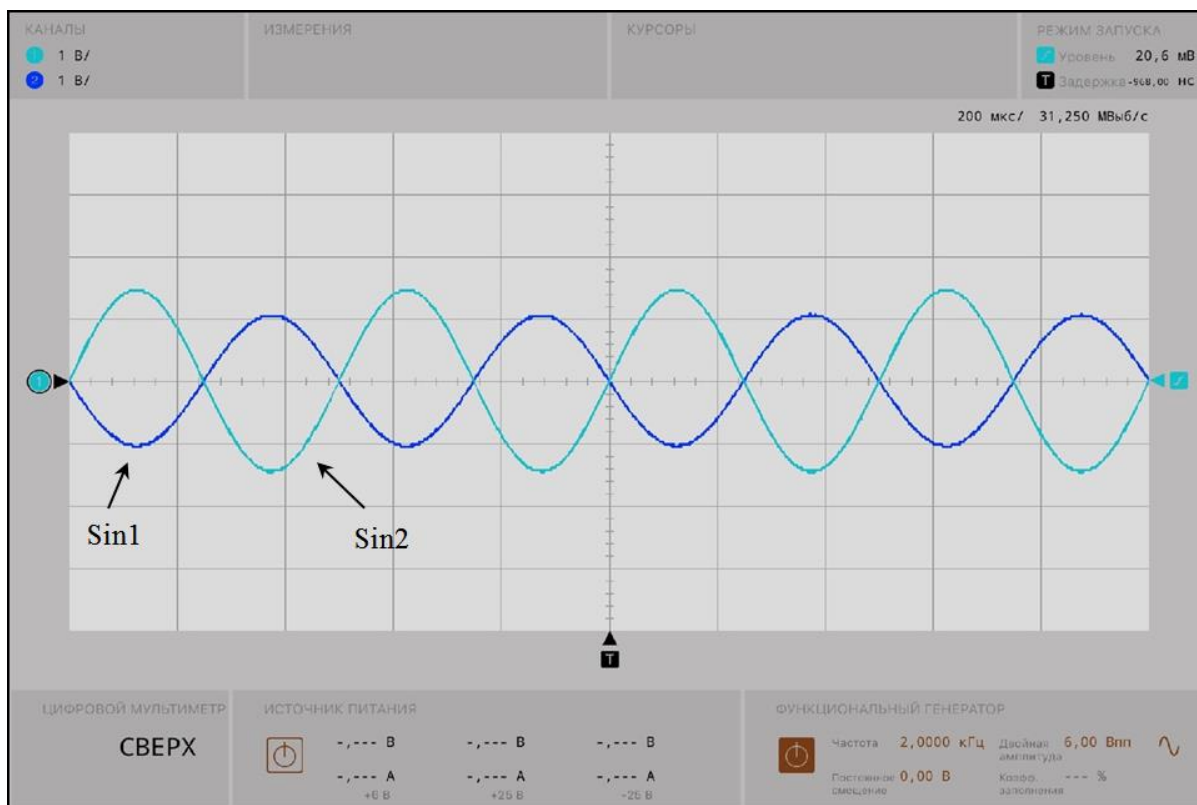


Рисунок 4.6 – Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -40^\circ$  (без опорной синусоиды)

Поворачивая вал ротора ДБСКТ в пределах  $-45^\circ < \alpha < -90^\circ$ , можно наблюдать изменение амплитуд синусоид. В частности, амплитуда синусоида Sin1 превосходит амплитуду Sin2. Это видно из графиков, показанных на рисунках 4.7 и 4.8.

В случае  $\alpha = -90^\circ$ , выходные напряжения пропорциональны углу поворота, то подставляя значения  $\alpha = -90^\circ$ , получим величину  $\sin(-90^\circ) = -1$ , поэтому величина напряжения  $U_1 = -3.8$  В, а напряжение  $U_2$  пропорционально  $\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)$  (сдвинут на  $90^\circ$ ) или это есть  $\cos \alpha$ . Подставив  $\alpha$  в косинус получаем  $\cos(-90^\circ) = 0$ , получаем напряжение  $U_2 = 0$  В. Результат моделирования математической модели и реального датчика представлен на рисунках 4.9 и 4.10. Как видно из рисунков, характеристики получились идентичные, значит модель построена верно.

Согласно ведомости контролируемых параметров и сигналов «УСТАНОВКА ГАЗОТУРБИННАЯ ГТУ-16ПМ» рабочий диапазон датчика  $-50^\circ \dots 0^\circ$ , поэтому нет необходимости выполнять моделирование свыше минус  $90^\circ$  [7].

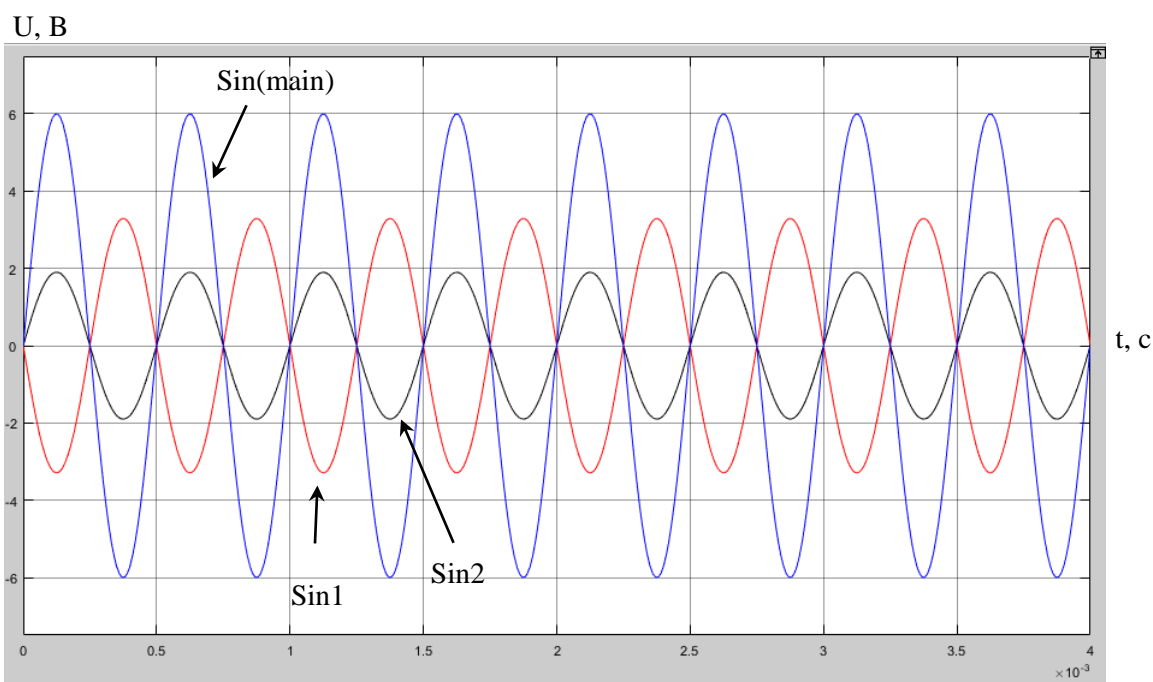


Рисунок 4.7 – Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -60^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

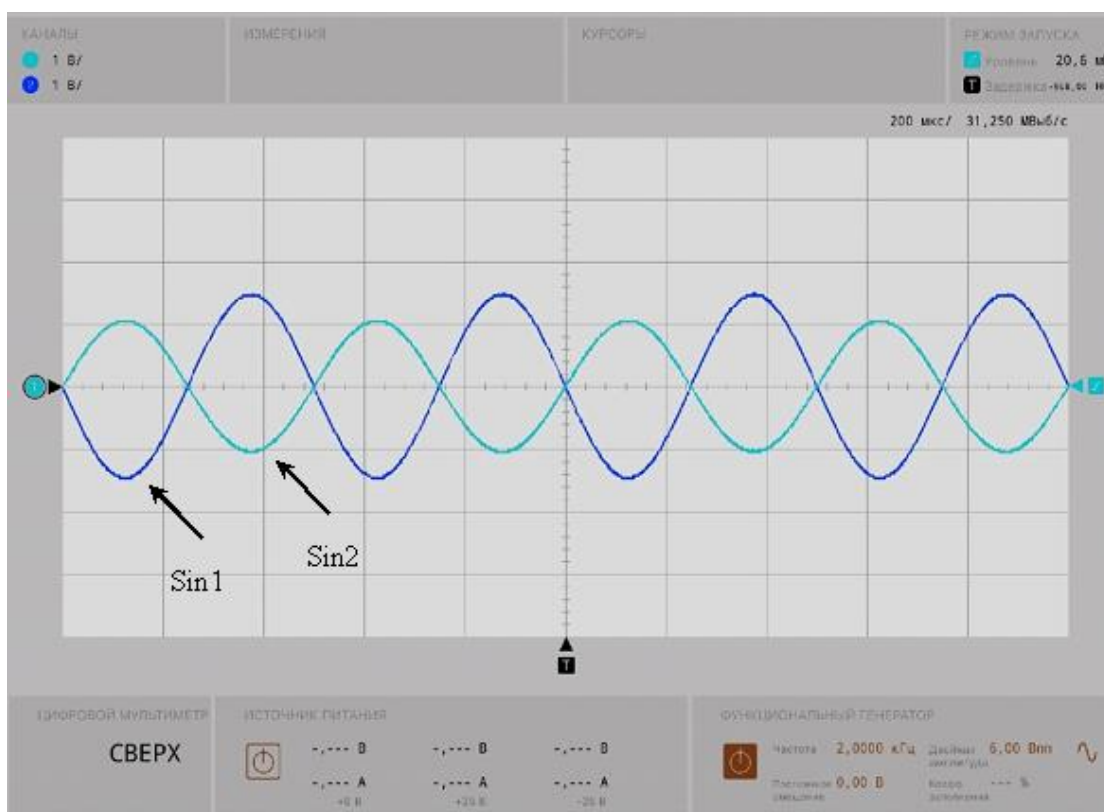


Рисунок 4.8 – Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -60^\circ$  (без опорной синусоиды)



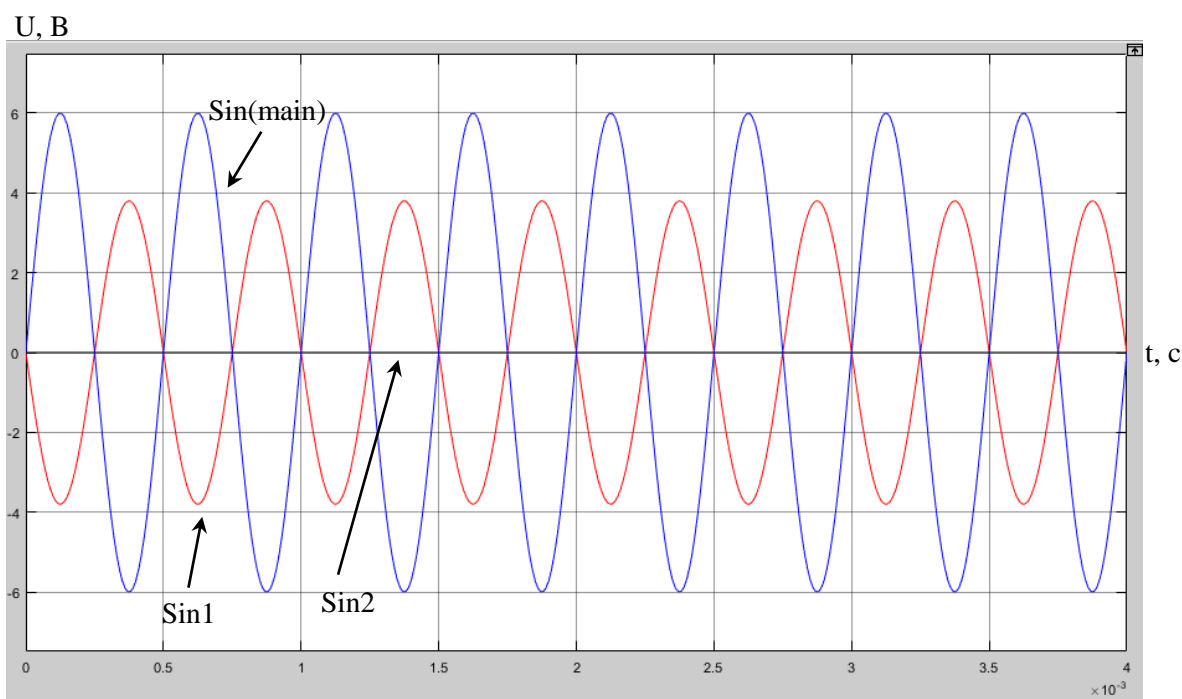


Рисунок 4.9 – Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -90^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

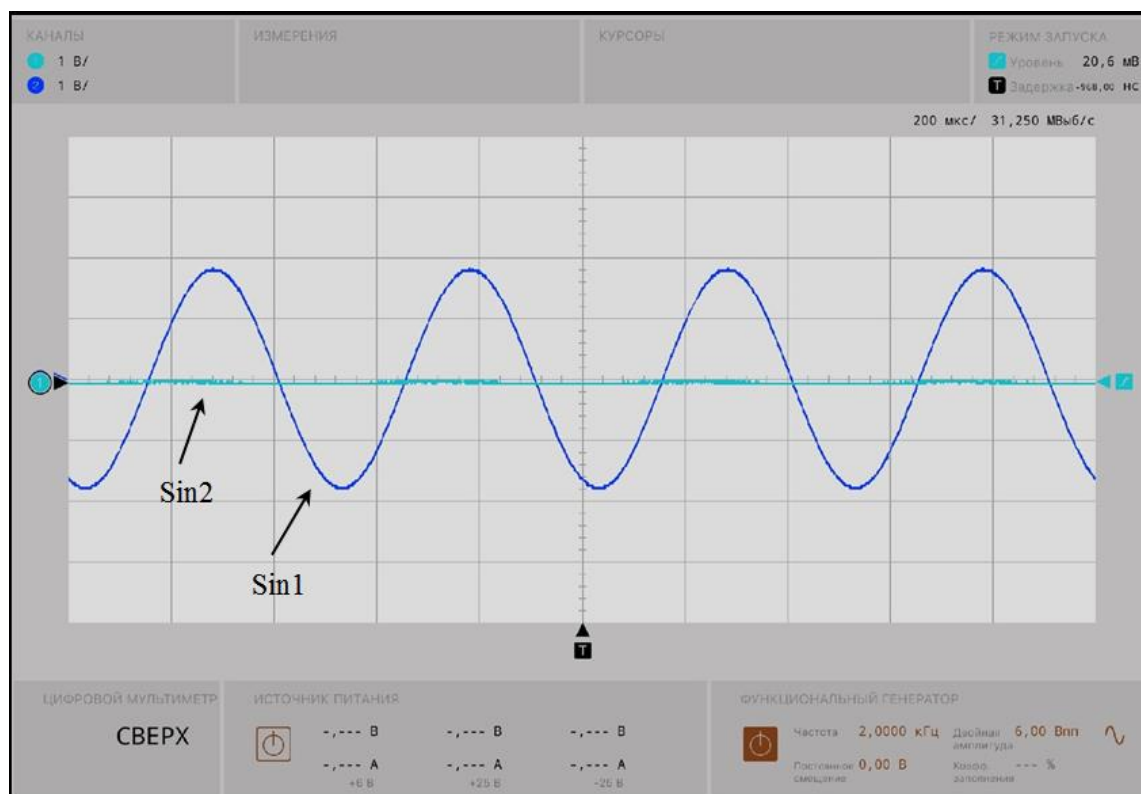


Рисунок 4.10 – Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -90^\circ$  (без опорной синусоиды)

Математическая модель, представленная на рисунке 4.1, является универсальной моделью для ряда датчиков. Некоторые реальные датчики ДБСКТ имеют подобную структуру, как и ДБСКТ-250-1Ш. В частности, у ДБСКТ-650-1Ш и ДБСКТ-220-1Ш подобная структура, но со своими техническими характеристиками. Поэтому технические характеристики датчика можно быстро изменить на другие.

В модели не учитывается температурное влияние, также габаритные размеры и масса датчика.

В процессе работы разработана математическая модель согласно технических данных датчика. Зависимость напряжения от угла поворота получается линейной. Можно было бы использовать линейный ВТ, но его применение в данном случае нецелесообразно, из-за малого рабочего диапазона ( $-30^\circ < \alpha < +30^\circ$ ), в котором обеспечивается минимальная погрешность, а также в необходимости применения специальных схем включения обмоток, что усложнило бы процесс моделирования.

Результат моделирования при повороте вала ротора ДБСКТ полностью совпал с работой реального датчика. Следовательно, данную модель можно использовать в математической модели ГТУ, разработчиком которой является АО «ОДК-Авиадвигатель».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день использование авиадвигателей в наземных электростанциях является перспективным направлением электроэнергетики. Электростанции на базе ГТУ осуществляют питание предприятий и бытовых потребителей. Чтобы рассмотреть и оценить работу реальной электростанции применяются различные методы исследования. Одним из таких методов является математическое моделирование.

Математическое моделирование является одним из самых перспективных и применяемых методов исследования не только авиационных систем, но и любых других сфер общества.

Моделирование является методом научного познания, которое предполагает полное представление реального объекта. При применении метода к техническим сферам, он, как правило, включает в себя математические законы. Безусловным плюсом математического моделирования является возможность исследования работы реального устройства, еще до момента ввода его в эксплуатацию. Следовательно, можно выполнить оценку поведения системы, возможное появление аварийных режимов.

В рамках разработки мобильного электронного имитатора ГТУ АО «ОДК-Авиадвигатель» была разработана математическая модель датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора.

Поскольку ДБСКТ является сложным устройством, то для построения математической модели данного датчика была изучена техническая документация на датчик, рассмотрен принцип работы и физика протекания процессов внутри устройства, а также изучен математический аппарат и схема функционирования датчика.

В процессе работы были рассмотрены устройства, которые могли бы заменить ДБСКТ. Сравнительный анализ рассмотренных выше альтернативных вариантов показал, что другие датчики не удовлетворяют показателям точности или надежности. Поэтому их использование не целесообразно.

Доказана необходимость применения дублированного бесконтактного синусного-косинусного трансформатора в качестве датчика считывания углового положения для входного направляющего аппарата. Поскольку использование ВНА повышает энергоэффективность работы ГТУ, за счет создания предварительно направленного потока воздуха в компрессор. За счет поворота лопаток ВНА можно получить постоянный одинаковый режим работы ГТУ, даже если изменяются параметры окружающей среды.

В процессе работы была разработана математическая модель датчика ДБСКТ для ВНА газотурбинной электростанции. Результат моделирования показал идентичность выходных характеристик разработанной модели и реального датчика, при имеющихся одинаковых входных параметрах. Это говорит о том, что данную модель можно включить в математическую модель ГТУ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бабина О.И. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей / О.И. Бабина // Конференция: ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА Санкт-Петербург, 21-23 октября 2009 г. – С. 73-77 . – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2009-1-73-77.pdf> (дата обращения 02.05.2020).

2. Баканов М.В. Информационные микромашины следящих и счетно-решающих систем (вращающиеся трансформаторы, сельсины) / М. В. Баканов, В. А. Лыска, В.В. Алексеев. – Москва: Сов. радио, 1977.

3. Бахирев И.В. Адаптивное управление газотурбинными установками при производстве электроэнергии с учетом возмущений в электрической системе : специальность 05.13.06 : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / И.В. Бахирев; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2018. – 120 с. – Место защиты: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Текст : непосредственный.

4. Блок управления приводом входного направляющего аппарата [Электронный ресурс] / Система комплекс. – URL: <http://syscomplex.ru/buvna.php> (дата обращения 30.05.2020).

5. Борщев А.В. Практическое Агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta Pro, N 3-4, 2004.

6. Ведерников Д.А. Резервное питание предприятий на основе газотурбинных электростанций / Д.А. Ведерников, Г.А. Килин // Материалы X международной интернет-конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика». – Пермь, 2018. – С. 301-307. – URL: <https://innotech.pstu.ru/archive/2018.pdf> (дата обращения 24.04.2020).

7. Ведомость 383-00-900BP2. Контролируемые параметры и сигналы. «УСТАНОВКА ГАЗОТУРБИНАЯ ГТУ-16ПМ» / АО «ОДК-Авиадвигатель. – Пермь : Изд-во АО «ОДК-Авиадвигатель, 2018. – 23.

8. Власов М.В. Имитационное моделирование: учебно-методическое пособие для подготовки к лекционным и практическим занятиям / М.В. Власов;

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ). – 2016. – 60 с.

9. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. - Ленинград: Энергия, 1974.

10. Вращающийся трансформатор [Электронный ресурс] / Электрические трансформаторы – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вращающийся\\_трансформатор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вращающийся_трансформатор) (дата обращения 15.05.2020).

11. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С. В. Звонарев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.

12. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие для среднего профессионального образования / М.М. Кацман. - Москва: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2002.

13. Кораблев Ю. А. Имитационное моделирование : учебник для бакалавров / Ю. А. Кораблев. - Москва: КНОРУС, 2017.

14. Леонов А.И. Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента / А. И. Леонов. - Москва: Машиностроение, 1978.

15. Лодочников Р.А. Микроэлектродвигатели для систем автоматики (технический справочник) / Р.А. Лодочников, Ю.М. Юферов. - Москва: Энергия, 1969. - 272 с.

16. Пономарев В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарев. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 129 с.

17. Осин И.Л. Электрические машины автоматических устройств: учебное пособие для вузов / И.Л. Осин, Ф.М. Юферов. - М.: Изд-во МЭИ, 2003.

18. Основные термины и определения дисциплины ГТУ. Изобретение ГТУ [Электронный ресурс] / Компрессоры газотурбинных установок. – URL: [https://studopedia.ru/21\\_132882\\_kompressori-gazoturbinnih-ustanovok.html](https://studopedia.ru/21_132882_kompressori-gazoturbinnih-ustanovok.html) (дата обращения 02.05.2020).

19. Оценка достоверности результатов имитационного моделирования по результатам аналитического моделирования / И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, Г.Р.

Зайнуллина, З.Т. Яхина // НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА «КИБЕРЛЕНИНКА» : [<https://cyberleninka.ru/>] – Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №6 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-dostovernosti-rezultatov-imitatsionnogo-modelirovaniya-po-rezultatam-analiticheskogo-modelirovaniya> (дата обращения 20.04.2020).

20. Разработка измерителя угла установки лопастей воздушного винта для двигательной установки самолета АН-140 / Ю.Ф. Басов, А.А. Штыков, А.В. Суббота [и др.] – 22 мая – URL: <https://docplayer.ru/49118190-Razrabotka-izmeritelya-ugla-ustanovki-lopastey-vozdushnogo-vinta-dlya-dvigatelnoy-ustanovki-samoleta-an-140.html> (дата обращения 20.04.2020).

21. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю. И. Рыжиков. - СПб. : КОРОНА принт ; М. : Альтекс-А, 2004 (ГП Техн. кн.). - 380 с.

22. Строгалев В. П. Имитационное моделирование: учебное пособие / В.П. Строгалев, И.О. Толкачева – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

23. Тиунов В.В. Методическое руководство по оформлению и защите выпускных квалификационных работ по образовательным программам высшего образования / Сост. В. В. Тиунов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2020.

24. Фомин А. И. Датчики систем управления : учебное пособие / А. И. Фомин. - Саратов: Изд-во СГТУ, 1997

25. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: перевод с англ. под ред. Маслова. / Р. Шеннон. – Москва: Изд-во «Мир», 1978. 212 с.

26. Шкуратов А.В. Возможности повышения точности датчиков углов на основе вращающихся трансформаторов / А.В. Шкуратов, С.П. Скворнюк // Журнал: Авиакосмическое приобретение. – Москва: Изд-во "Научтехлитиздат", 2013

27. Шулаков Н.В. Электрические машины: конспект лекций / Н.В. Шулаков. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008.

28. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учебник для вузов / Ф.М. Юферов. - Москва: Высш. шк., 1976.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электротехника и электромеханика»



УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭТиЭМ

Б.В. Кавалеров

« 18 » июня 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

По направлению подготовки 13.03.02

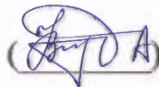
«Электроэнергетика и электротехника»

Профиль «Электромеханика»

На тему:

«Разработка математической модели датчика ДБСКТ для входного  
направляющего аппарата газотурбинной электростанции»

Выполнил: студент гр. ЭМ-16-16

Ведерников Дмитрий Андреевич (  )

Руководитель ВКР: к.т.н., доцент

Бахирев Иван Владимирович (  )

Пермь 2020 г.





## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время одним из приоритетных направлений в электроэнергетике и электротехнике является применение авиационных двигателей в наземных газотурбинных электростанциях (ГТЭС).

В связи с применением входного направляющего аппарата для компрессора низкого давления (КНД), который оказывает значительное влияние на энергоэффективность газотурбинной установки (ГТУ) подтверждается актуальность разработки и исследования математической модели датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора (ДБСКТ) для входного направляющего аппарата (ВНА) для включения ее в математическую модель ГТУ.



**Цель работы** - разработать математическую модель датчика дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора для входного направляющего аппарата газотурбинной электростанции.

**Задачи, поставленные для достижения цели:**

- 1) сбор и систематизация информации о математическом моделировании;
- 2) поиск информации о дублированном бесконтактном синусно-косинусном трансформаторе;
- 3) рассмотрение альтернативных вариантов датчиков, подобных ДБСКТ;
- 4) построение и проверка математической модели ДБСКТ;
- 5) сравнение результатов моделирования с реальной работой датчика.



## Математическое моделирование. Проект АО «ОДК-Авиадвигатель»

В состав лабораторного комплекса входит:

- 1) Имитатор, основанный на математической модели ГТУ;
- 2) Автоматизированный аппаратно-программный комплекс NI PXI;
- 3) Специализированное программное обеспечение практикума, выполненное в LabVIEW.

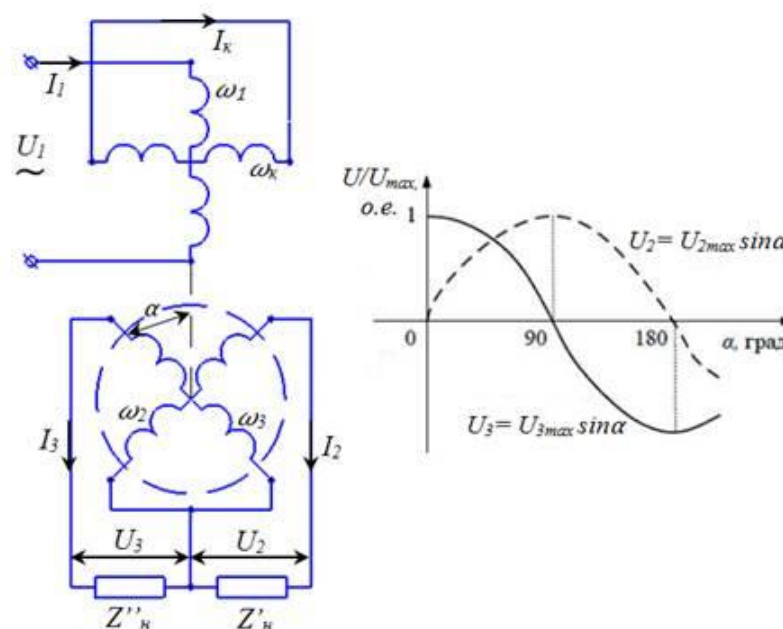
Положительными характеристиками математического моделирования:

- 1) экономность, ресурсосбережение реальной системы;
- 2) возможность построения объектов и систем, которых нет в природе (гипотетические предположения);
- 3) возможность получения результата в различные промежутки времени;
- 4) возможность сравнительно простого многомерного анализа.



Виды математического моделирования

## Схема дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора (ДБСКТ)



Синусно-косинусный вращающийся трансформатор в синусно-косинусном режиме

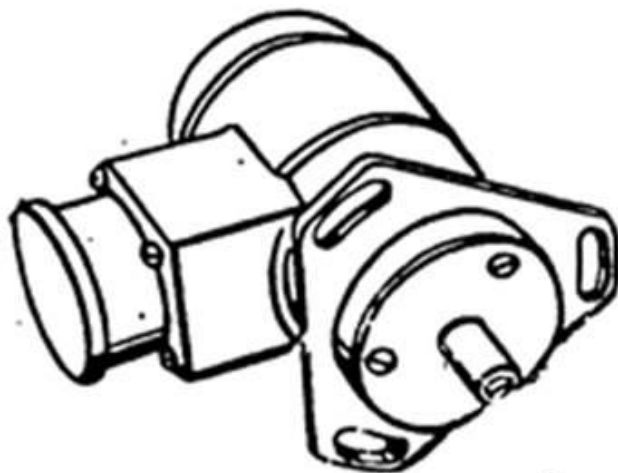
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2m} \sin \alpha. \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 (w_2/w_1) \sin \alpha. \quad (3)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{3m} \sin \left( \frac{\pi}{2} + \alpha \right) = \dot{U}_{3m} \cos \alpha. \quad (2)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_1 (w_3/w_1) \cos \alpha. \quad (4)$$

## ДУБЛИРОВАННЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР (ДБСКТ)



Общий вид датчика ДБСКТ-250-1Ш

### Технические данные -ДБСКТ-2501-Ш:

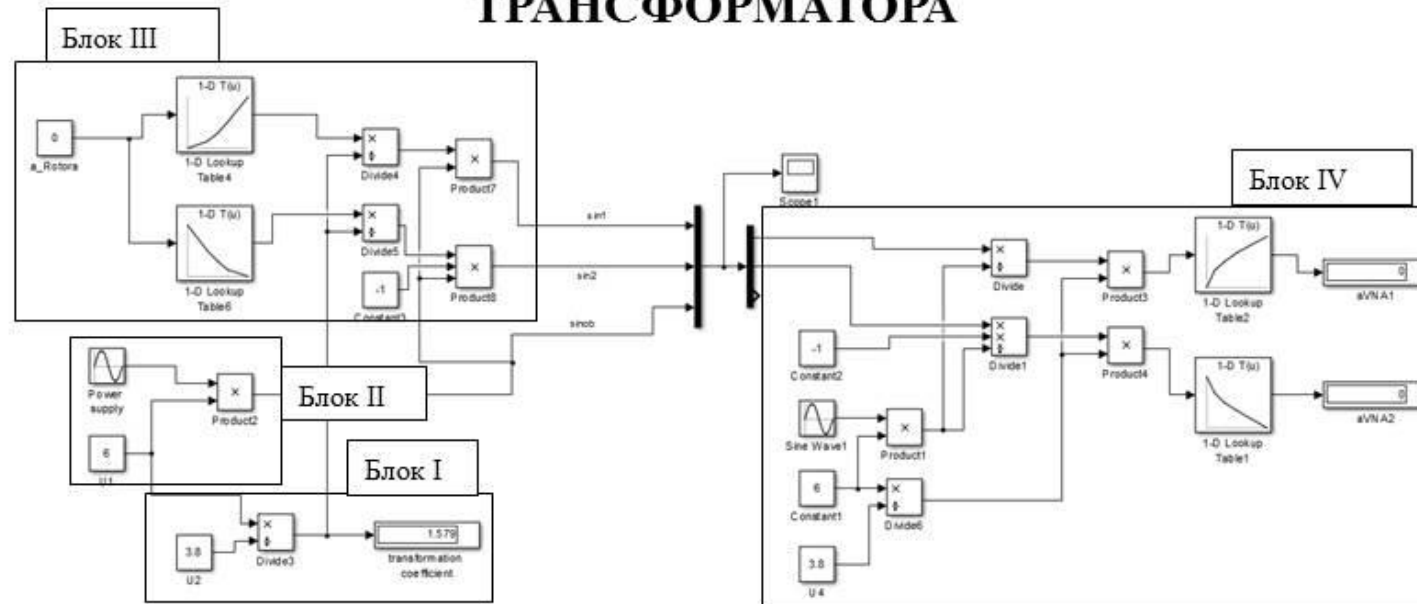
- 1) напряжение питания однофазного тока синусоидальной формы -  $6 \pm 0,6$  В;
- 2) частота напряжения питания -  $2000 \pm 100$  Гц;
- 3) потребляемый ток - 1...5 мА;
- 4) максимальное выходное напряжением -  $3,8 \pm 0,4$  В;
- 5) рабочая температура сред - от - 60 °С до +220 °С.

### Габариты прибора синусно-косинусный трансформатора ДБСКТ-250-1Ш:

- 1) диаметр - 22мм;
- 2) длина - 87,6мм;

**Масса** - 0,2 кг.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ДУБЛИРОВАННОГО БЕСКОНТАКТНОГО СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА



Математическая имитационная модель дублированного бесконтактного синусно-косинусного трансформатора

**Блок I** – расчет коэффициента трансформации:  $k = U_1/U_2 = 6/3,8=1,579$

**Блок II** – имитация работы источника питания и работу статорной обмотки.

**Блок III** – имитирует работу ротора вращающегося трансформатора.

**Блок IV** – блок определения угла установки ВНА



## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ДБСКТ

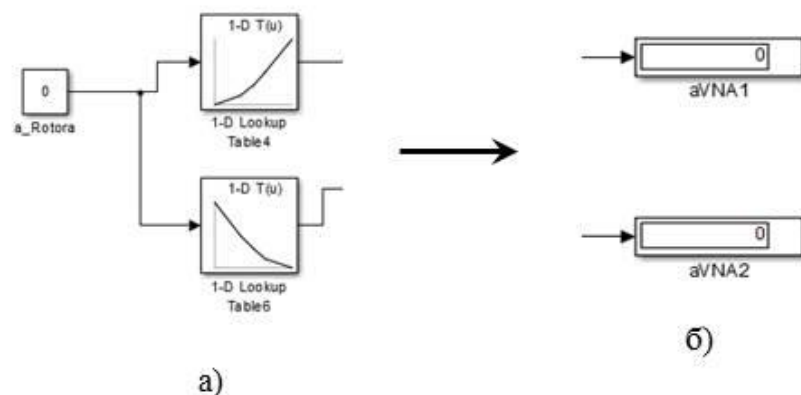


Схема математической имитационной модели а) имитация поворота ротора на угол  $0^\circ$  б) информация, полученная САУ

Угол поворота ротора  $\alpha = 0^\circ$

$$\sin(0^\circ) = 0$$

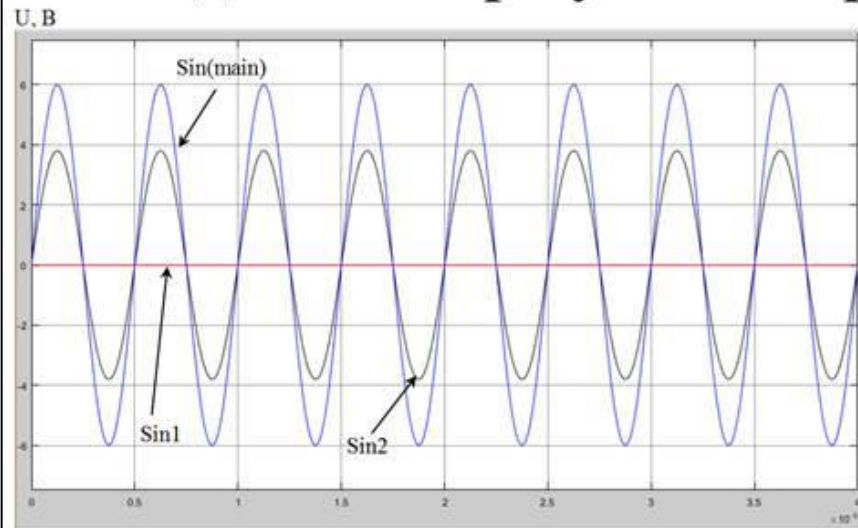
$$U_1 = 0 \text{ В}$$

$$\cos(0^\circ) = 1$$

$$U_2 = 3,8 \text{ В}$$

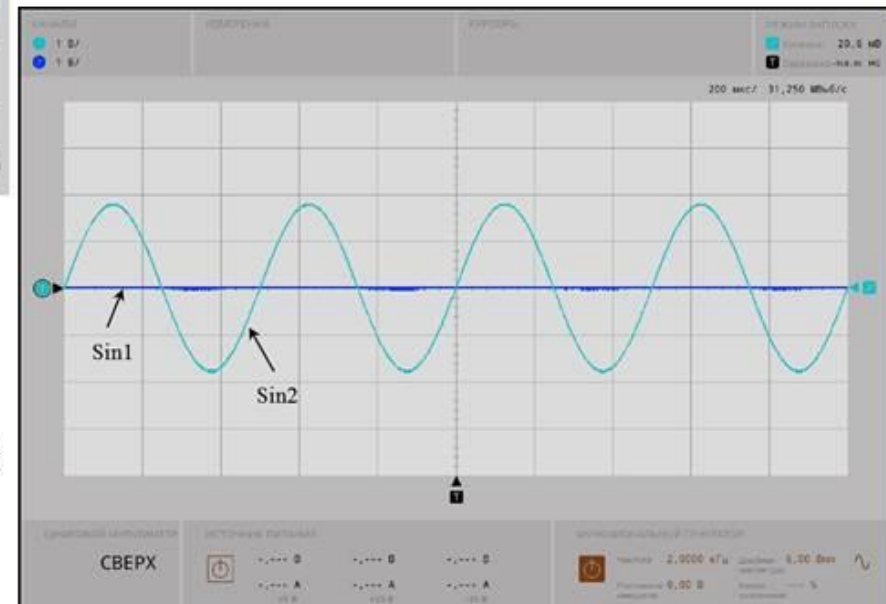
Согласно ведомости контролируемых параметров и сигналов «УСТАНОВКА ГАЗОТУРБИННАЯ ГТУ-16ПМ» рабочий диапазон датчика -  $50^\circ \dots 0^\circ$

## Результат моделирования и работа реального датчика при угле поворота ротора ДБСКТ $\alpha=0^\circ$



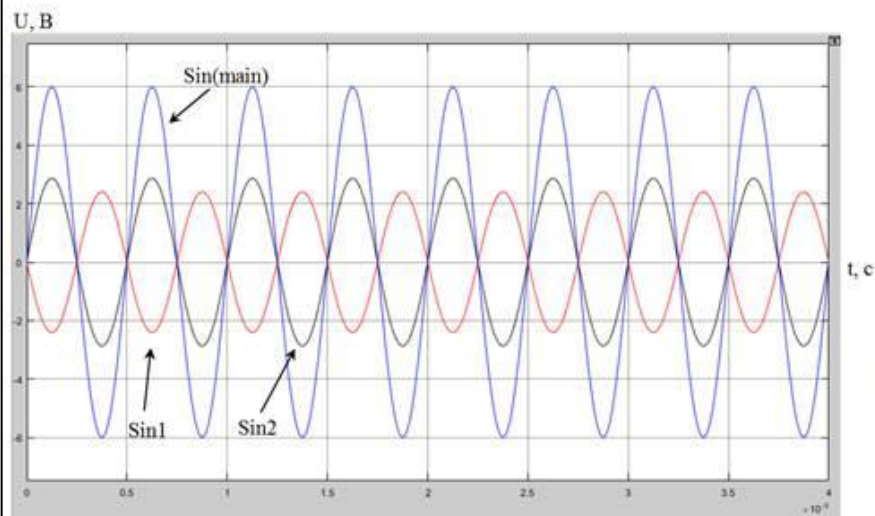
Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = 0^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = 0^\circ$  (без опорной синусоиды)



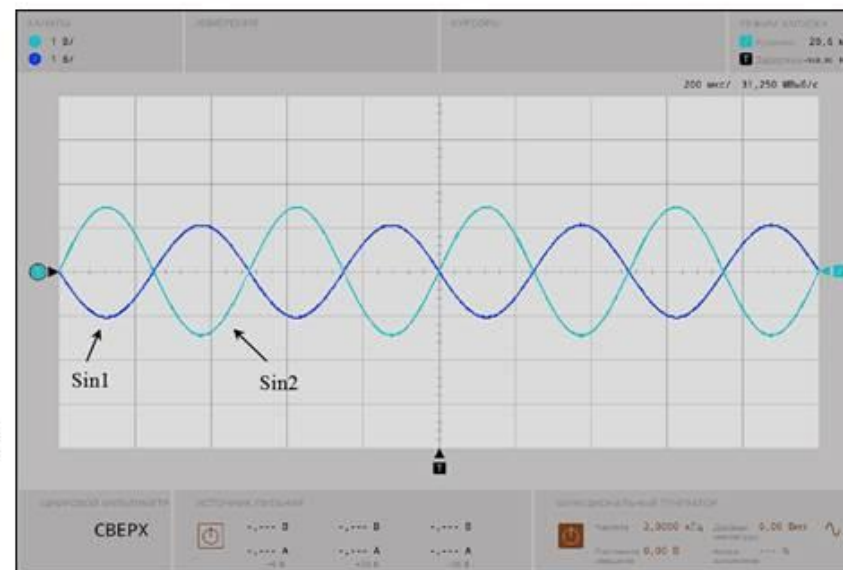


## Результат моделирования и работа реального датчика при угле поворота ротора ДБСКТ $\alpha = -40^\circ$

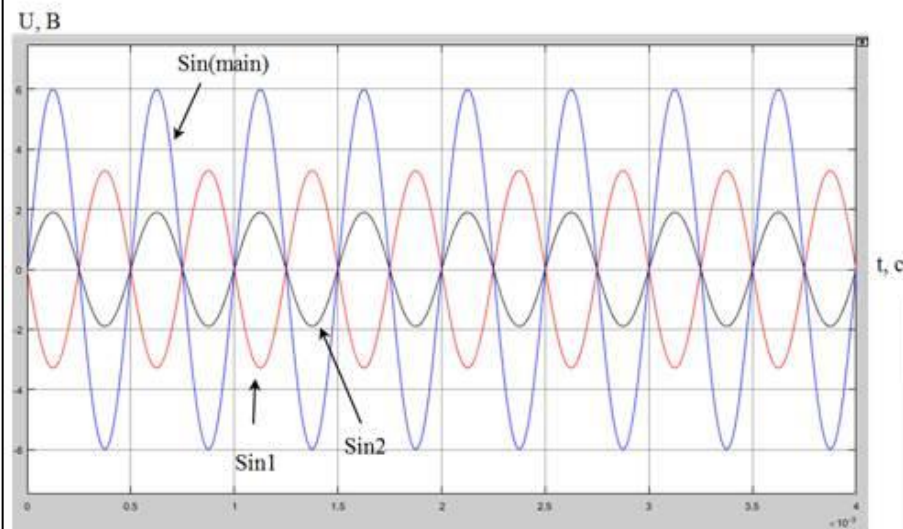


Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -40^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -40^\circ$  (без опорной синусоиды)

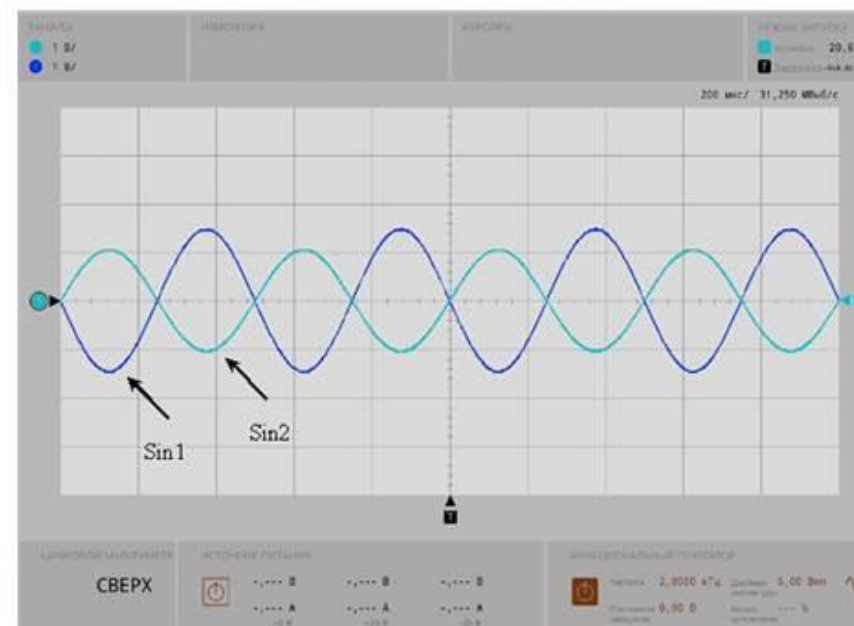


## Результат моделирования и работа реального датчика при угле поворота ротора ДБСКТ $\alpha = -60^\circ$

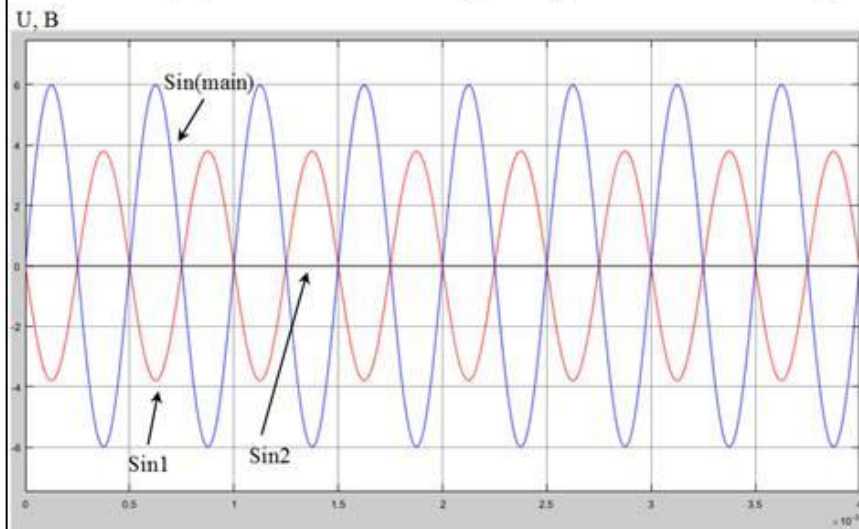


Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -60^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin (main)))

Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -60^\circ$  (без опорной синусоиды)

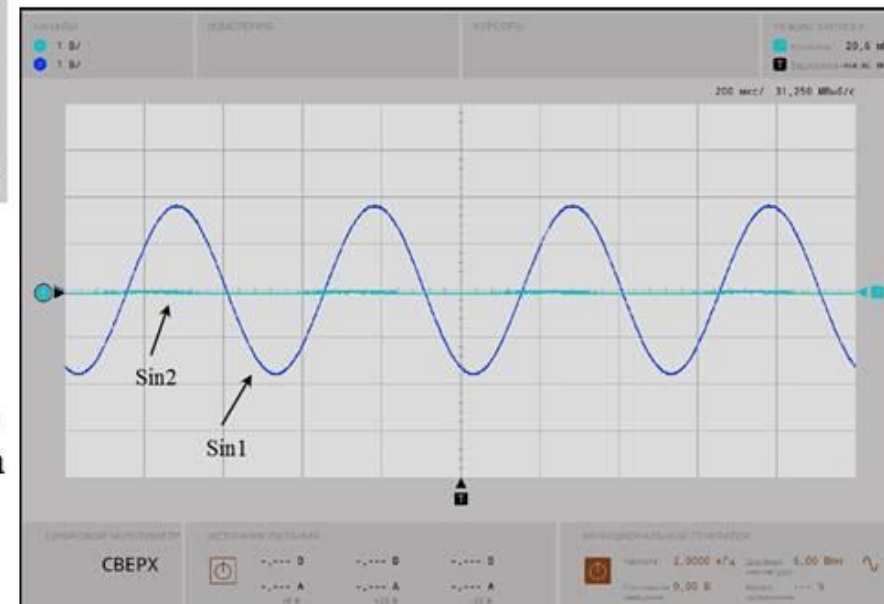


## Результат моделирования и работа реального датчика при угле поворота ротора ДБСКТ $\alpha = -90^\circ$



Графики выходного напряжения в результате имитационного моделирования датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -90^\circ$  (с опорной синусоидой (Sin t, с (main)))

Графики выходного напряжения реальный режим работы датчика ДБСКТ при угле поворота ротора равного  $\alpha = -90^\circ$  (без опорной синусоиды)





## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В процессе работы были рассмотрены устройства, которые могли бы заменить ДБСКТ. Сравнительный анализ рассмотренных выше альтернативных вариантов показал, что другие датчики не удовлетворяют показателям точности или надежности. Поэтому их использование нецелесообразно.
- В процессе работы была разработана математическая модель датчика ДБСКТ для ВНА газотурбинной электростанции. Результат моделирования показал возможность идентичность выходных характеристик разработанной модели и реального датчика, при имеющихся одинаковых входных параметрах. Это говорит о том, что данную модель можно включить в модель ГТУ.

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Кафедра «Электротехника и электромеханика»  
Выпускная квалификационная работа студента группы ЭМ-16-16 Ведерникова Д.А.  
на тему «Разработка математической модели датчика ДБСКТ для входного направляющего  
аппарата газотурбинной электростанции»



**Благодарю за внимание!**