

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт Промышленной автоматизации и цифровизации

Кафедра Энергетика

Мыңбай Ерлан Мырзабекұлы

«Разработка и исследование трансформатора тока для
цифровой подстанции »

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Специальность 6M071800 – «Электроэнергетика»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ

Институт Промышленной Автоматизации и Цифровизации

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Мыңбай Ерлан Мырзабекұлы

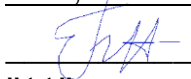
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	<u>«Разработка и исследование</u> <u>трансформатора тока для</u> <u>цифровой подстанции»</u>
----------------------	--

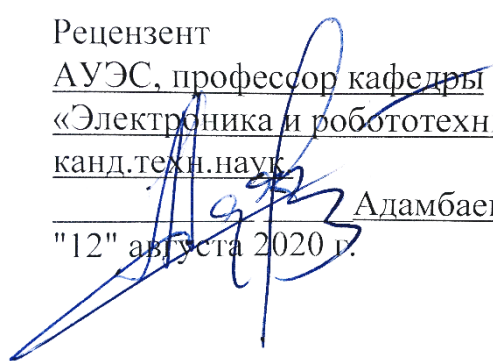
Направление подготовки	<u>6M071800 – «Электроэнергетика»</u>
------------------------	---------------------------------------

Научный руководитель
PhD, ассистент-профессор

 Балгаев Н.Е.
"11" августа 2020 г.

Рецензент

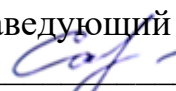
АУЭС, профессор кафедры
«Электроника и робототехника»,
канд.техн.наук

 Адамбаев М.Ж.
"12" августа 2020 г.

Нормоконтроль

 Бердибеков А.О.
"12" августа 2020 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «Энергетика»
 Сарсенбаев Е.А.
"12" августа 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

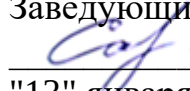
САТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТИ

Институт Промышленной Автоматизации и Цифровизации
Кафедра Энергетики

Специальность 6М071800 – «Электроэнергетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой «Энергетика»

 Сарсенбаев Е.А.

"13" января 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Мынбай Ерлану Мырзабекұлы

Тема: «Разработка и исследование трансформатора тока для цифровой подстанции».

Утверждена приказом проректора Университета №1208–м от "30" октября 2018 г.

Срок сдачи законченной диссертации: "10" июня 2020 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Анализ состояния измерения токов в цифровых подстанциях;*
- б) Разработка моделей трансформаторов тока для цифровых подстанций в Matlab;*
- в) Исследование режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанций.*

Рекомендуемая основная литература:

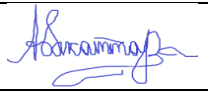
1. Стандарт МЭК 61850;
2. Donald G. Fink, H. Wayne Beatty (ed), Standard Handbook for Electrical Engineers, Eleventh Edition, Mc-Graw Hill, 1978, 0-07-020974-X.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ состояния измерения токов в цифровых подстанциях	31.01.2019г.	Выполнено
Разработка моделей трансформаторов тока для цифровых подстанций в Matlab	31.08.2019г.	Выполнено
Исследование режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанции	31.03.2020г.	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию
с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ состояния измерения токов в цифровых подстанциях	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Разработка моделей трансформаторов тока для цифровых подстанций в Matlab	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Исследование режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанции	Н.Е. Балгаев, PhD	10.08.2020г.	
Нормоконтролер	Бердибеков А.О.	11.08.2020г.	

Научный руководитель _____



Балгаев Н.Е.

Задание принял к исполнению обучающийся _____



Мынбай Е.М

Дата

"13" января 2020 г.

АҢДАТПА

Шағын станцияларды цифрландыру оларды нақты уақыт режимінде басқаруға және бақылауға мүмкіндік береді. Қосалқы станциядағы электр энергиясының ағынын бақылау және бақылау үшін бастапқы өлшеу құрылғыларынан, атап айтқанда ток трансформаторларынан алынған, берілетін және тұтынылатын энергия туралы сенімді және дәл ақпарат қажет, олар сандық қосалқы станциялардың құрылғыларына қойылатын талаптарға сәйкес келуі керек. Сонымен қатар, бұл ток трансформаторлары апаттық жағдайда да дәлдігін сақтауы керек.

"Индустрия 4.0" бағыттарының бірі өнеркәсіпті, оның ішінде электр энергетикасы жүйесін цифрландыру болып табылады. Электр энергетикасы жүйесінің негізгі элементтері энергия көздері, электр беру желілері мен тұтынушылар арасындағы өзара байланысты қамтамасыз ететін қосалқы станциялар болып табылады. Сондықтан қосалқы станцияларды цифрландыру оларды нақты уақыт режимінде басқаруға және бақылауға мүмкіндік береді және электр энергиясын берудің тиімділігін, сенімділігі мен қауіпсіздігін барынша арттыруға көмектеседі.

АННОТАЦИЯ

Цифровизация подстанций делают возможным их управление и мониторинг в режиме реального времени. Для мониторинга и контроля потока электроэнергии подстанции нужны надежные и точные информации о передаваемой и потребляемой энергии, получаемые от первичных измерительных устройств, в частности от трансформаторов тока, которые должны соответствовать требованиям предъявляемых к устройствам цифровых подстанций. Кроме того, эти трансформаторы тока должны сохранять свою точность и в аварийных режимах.

Одним из направлений «Индустрия 4.0» является цифровизация промышленности, в том числе электроэнергетической системы. Ключевыми элементами электроэнергетической системы являются подстанции, которые обеспечивают взаимосвязь между источниками энергии, сетями электропередачи и потребителями. Поэтому, цифровизация подстанций делают возможным их управление и мониторинг в режиме реального времени и помогают максимально повысить эффективность, надежность и безопасность передачи электроэнергии.

ANNOTATION

Digitalization of substations makes it possible to manage and monitor them in real time. To monitor and control the flow of electricity to a substation, reliable and accurate information about the transmitted and consumed energy is needed from primary measuring devices, in particular from current transformers, which must meet the requirements for digital substation devices. In addition, these current transformers must maintain their accuracy even in emergency modes.

One of the directions of "industry 4.0" is the digitalization of industry, including the electric power system. The key elements of the electric power system are substations that provide interconnection between energy sources, transmission networks and consumers. Therefore, digitalization of substations makes it possible to manage and monitor them in real time and helps to maximize the efficiency, reliability and safety of power transmission.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Анализ состояния измерения токов в цифровых подстанциях	11
1.1	Особенности измерения токов в цифровых подстанциях	11
1.2	Сравнительный анализ измерительных трансформаторов тока	13
1.3	Виды оптических трансформаторов тока	16
1.3.1	Оптический трансформатор тока на основе эффекта Фарадея	17
1.3.2	Интерферометрические принципы	19
1.3.3	Оптический трансформатор тока на основе Брэгговских решеток	19
1.3.4	Микромеханические датчики с оптическим считыванием	20
1.3.5	Другие принципы измерения оптического тока	21
2	Разработка моделей трансформаторов тока для цифровых подстанций в Matlab	22
2.1	Модель оптического трансформатора тока для аналогового выхода	22
2.1.1	Разработка передаточной функции с использованием данных частотной характеристики	23
2.1.2	Реконструкция развитой передаточной функции как суммы рациональных функций первого порядка и их схемных реализаций	25
2.2	Цифровая модель для оптических измерительных трансформаторов	33
2.3	Полная модель оптического трансформатора тока	35
	Выводы по главе	37
3	Исследование режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанций	42
3.1	Имитация короткого замыкания	42
3.2	Моделирование тока нагрузки и тока короткого замыкания	46
	Выводы по главе	47
	Заключение	48
	Список использованной литературы	50

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В энергетических и электротехнических установках возникает необходимость измерения параметров целого ряда электрических и магнитных величин: тока, напряжения, мощности, энергии, напряженностей электрических и магнитных полей. Диапазоны изменения измеряемых величин и их частотные спектры чрезвычайно широки. Для измерения этих величин используются трансформаторы тока и напряжения.

Создание сверхмощных линий электропередач, энергетических объектов напряжением сотни киловольт и током десятки килоампер существенно повысило требования к высоковольтной измерительной аппаратуре. К таким требованиям относятся увеличение рабочих токов и напряжений, повышение точности измерения, расширение частотного диапазона, увеличение эксплуатационной надежности и уменьшение массо-габаритных характеристик. Именно по этой причине в большинстве развитых стран идут интенсивные поиски и разработки новых методов измерения параметров энергетических объектов. Особое внимание уделяется оптико-электронным трансформаторам тока и напряжения, в основе которых лежит использование светового потока для измерения параметров высоковольтных объектов и оптического канала связи для(передачи информации из зоны высокого потенциала.

Преимуществами оптико-электронных трансформаторов являются:

- полная электрическая развязка между исследуемой высоковольтной цепью и измерительным оборудованием,
- исключение громоздких изоляционных конструкций,
- малая чувствительность оптического канала связи к воздействию мощных электромагнитных помех,
- высокое быстродействие,
- практическая независимость габаритов, веса и стоимости измерительных устройств от класса рабочего напряжения,
- большая перегрузочная способность и отсутствие насыщения.

Цель исследования. Разработать и исследовать ток трансформатора для цифровой подстанции.

Задачи исследования. Рассмотреть и проанализировать состояния измерения тока в цифровых подстанциях, разработать модели трансформаторов тока для цифровых подстанций в программе MatLab, исследовать режимы работы трансформаторов тока для цифровых подстанций.

Объект исследования. Энергосберегающая технология, оптико-электронные трансформаторы, цифровой измерительный прибор.

Предмет исследования. Разработка и исследование оптического трансформатора тока для цифровых подстанций.

Методы исследования. Теория измерения тока в цифровой подстанции с применением программы MatLab

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты сравнения измерительных трансформаторов тока;
- модель оптического трансформатора тока;
- результаты исследования режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанций.

Научная новизна. Впервые разработаны математические модели полного оптического трансформатора тока и цифровая модель для оптических измерительных трансформаторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Разработанные модели цифровых подстанций делают возможным управление и мониторинг электроэнергетической системы в режиме реального времени и помогают максимально повысить эффективность, надежность и безопасность передачи электроэнергии.

Опубликованность результатов. Результаты анализа состояния передачи электрической энергии на дальние расстояния доложены и обсуждены на международной конференции «Сатпаевские чтения 2019», «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК»

Структура и объем диссертации. Диссертация структурирована следующим образом: обзорная информация дана во введении, основная часть работы распределена в трех главах, далее следуют заключение и список использованной литературы, состоящий из n! Источников. Работа выполнена на n! страницах, содержит n! рисунков и n! таблиц.

1 Анализ состояния измерения токов в цифровых подстанциях

1.1 Особенности измерение токов в цифровых подстанции

Измерительный преобразователь тока (СТТ) предназначен для измерения и передачи параметров тока в устройства измерения, измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления в сетях переменного и постоянного тока номинальным напряжением 6 (10) - 110 кВ (для более высоких классов напряжения - выполняется в соответствии с соглашением) частотой 50 и 60 Гц.

Данные могут быть организованы отключенными оптическими кабелями по протоколу МЭК 61850-9-2 или по медным кабелям в качестве аналогового сигнала. В качестве решения измерение тока в цифровых подстанциях рассматриваются в структурном стандартом МЭК 61850.

Электрические подстанции будут играть важную роль в Smart Grid. МЭК 61850 - это семейство стандартов, определяющих сетевые протоколы и соглашение об именах данных в устройствах автоматизации электрических подстанций. МЭК 61850 позволяет расширить возможности мониторинга даже при удаленном управлении станцией, когда это необходимо. Часть линий связи в государственных службах подготовлена публично через общедоступные сети (например, Интернет). Предложить обзор стандартов МЭК 61850 в недавнем опыте с МЭК 61850. Они представлены таким образом, чтобы вы могли соблюдать МЭК 61850 с надлежащей безопасностью. Таким образом, доступны возможные решения этих проблем. Автоматизация электрических подстанций по МЭК 61850.[1]

Преимущества использования цифровой трансформатор тока:

- Используется с инновационной концепцией развития электроэнергетики в направлении «цифровая подстанция»;
- Совместимость с традиционными и современными измерительными приборами МП для электрической и релейной защиты;
- Возможна генерация выходного сигнала в формате МЭК 61850-9-2;
- Точно воспроизводить форму кривых тока в нормальном режиме в переходных режимах (без насыщения, не считается явлением остаточной намагниченности);
- Возможность использования оптических кабелей связи;
- Взрывобезопасный и пожаробезопасный;
- Небольшие размеры;

Принципы действе и конструкция цифровой трансформатор тока и характеристики

Принцип работы трансформаторов заключается в следующем: измерение переменного и постоянного тока выполняется с помощью нескольких первичных трансформаторов тока, выполненных на основе законов полного тока и электромагнитной индукции, закона Ома и гальваномагнитных эффектов. Измерения могут выполняться одновременно преобразователями,

выполненными по разным физическим принципам (в зависимости от типа трансформатора). В зависимости от номинального уровня напряжения результаты преобразования обрабатываются на первичной стороне (высокое напряжение) для преобразователей 35 кВ и выше или на вторичной стороне (низкое напряжение) для преобразователей 35 кВ и менее.[2]

Электронный блок на первичной стороне преобразует выходные сигналы всех первичных преобразователей в цифровой сигнал, затем создает в них пакеты данных через оптические кабели и передает их электронным блокам на вторичных сторонах. Электронный блок на вторичных страницах публиковал в них пакеты данных по оптическим кабелям, отправляемые для защиты релейных устройств, автоматики, коммерческого учета электроэнергии по почте и других устройств.[1]

Трансформаторы состоят из следующих компонентов:

- первичные преобразователи переменного и постоянного тока;
- электронный блок на стороне высокого напряжения (для исполнений 35 кВ и выше);
- электронный блок на стороне низкого напряжения.

К первичным преобразователям мощности переменного и постоянного тока относятся: небольшой трансформатор тока, пояс Роговского и датчик постоянного тока (опция). Малогабаритный трансформатор тока предназначен для передачи информации на приборы коммерческого учета электроэнергии, пояс Роговского, а постоянного тока - для передачи устройств защиты и автоматики.

Электронные блоки преобразуют выходные сигналы первичных преобразователей переменного и постоянного тока в цифровой сигнал, его обработка и передача измеренных значений силы и напряжения переменного тока на устройства релейной защиты, автоматики, коммерческого учета электроэнергии и другие устройства на подстанции в соответствии с ИЕС 61850-9 -2 (протокол передачи может быть изменен или дополнен другим протоколом по запросу клиента). На выходе трансформаторы генерируют несколько токов измерения тока и напряжения со следующими схемами:

- 1) 4000 Гц (80 сообщений в периоде промышленной частоты 50 Гц) - для устройств релейной защиты и автоматики;
- 2) 12800 Гц (256 сообщений в периоде промышленной частоты 50 Гц) - для приборов коммерческого учета электроэнергии.

Трансформаторы также могут генерировать текущие потоки измеренных значений со следующими частотами дискретизации (необязательно):

- 1) 4800 Гц (96 отчетов для промышленной частоты 50 Гц из 80 отчетов для промышленной частоты 60 Гц);
- 2) 15 360 Гц (256 отчетов для времени частоты сети 60 Гц);
- 3) 14400 Гц (288 сообщений для промышленной частоты, времени 50 Гц в 240 сообщений для промышленной частоты, времени 60 Гц);
- 4) 96000 Гц - для компьютерной обработки электроэнергии в устройстве защиты в сетях постоянного тока.

Частота дискретизации может быть изменена по желанию заказчика, но не должна устанавливаться на 96000 Гц.

При желании цифровой трансформатор тока может предоставлять дополнительную служебную информацию о параметрах измеренных электрических сигналов и передаваемой электроэнергии, а также служебную информацию, отражающую состояние цифрового трансформатора.[1-2]

1.2 Сравнительный анализ измерительных трансформаторов тока

Виды измерительных приборов:

1 Трансформатор тока - это тип трансформатора, который используется для уменьшения или умножения переменного тока. Он производит ток в своей вторичной обмотке, который пропорционален току в своей первичной обмотке.

Трансформаторы тока вместе с трансформаторами напряжения или потенциала являются измерительными трансформаторами. Измерительные трансформаторы масштабируют большие значения напряжения или тока до небольших стандартизированных значений, с которыми легко работать измерительным приборам и защитным реле. Приборные трансформаторы изолируют измерительные или защитные цепи от высокого напряжения первичной системы. Трансформатор тока обеспечивает вторичный ток, который точно пропорционален току, протекающему по его первичной обмотке. Трансформатор тока представляет незначительную нагрузку для первичной цепи. [5]

2 Резистивные трансформатор тока являются одними из наиболее простых, но, зачастую, и наиболее сложных в применении устройств из-за отсутствия гальванической развязки с рабочей цепью.

В диапазоне небольших токов часто применяются шунты, выполненные в виде SMD резисторов по пленочной технологии, обеспечивающих хороший теплоотвод и малую индуктивность. Следующий класс мощности представлен резисторами, выполненными по пленочной технологии в корпусах для выводного монтажа типа ТО-220; эти резисторы также обладают хорошей способностью к теплоотводу через внешний радиатор и низкой индуктивностью.

Две основные проблемы, связанные с использованием резистивных шунтов на токи большой мощности, это потери мощности в шунте, требующие его охлаждения и собственная индуктивность шунта, искажающая напряжение на нем с увеличением частоты переходных процессов. Отдельным вопросом является организация гальванической изоляции между высоковольтной цепью и цепью управления, особенно при высоких рабочих и импульсных напряжениях.

3 Пояс Роговского или как все называет катушка Роговского, названная в честь Уолтера Роговского, представляет собой электрическое устройство для измерения импульсов переменного тока (АС) или высокоскоростных токов. Он состоит из спиральной катушки из проволоки, провод от одного конца которой проходит через центр катушки к другому концу, так что обе клеммы находятся

на одном конце катушки. Затем весь узел оборачивается вокруг прямого проводника, ток которого должен измеряться. Нет металлического (железного) сердечника. Плотность обмотки, диаметр катушки и жесткость обмотки имеют решающее значение для сохранения невосприимчивости к внешним полям и низкой чувствительности к расположению измеряемого проводника. [5] [6]

Поскольку напряжение, индуцируемое в катушке, пропорционально скорости изменения (производной) тока в прямом проводнике, выход катушки Роговского обычно подключается к электрической (или электронной) интегральной схеме, чтобы обеспечить выходной сигнал, который пропорционален току. Для этой цели часто используются однокристалльные сигнальные процессоры со встроенными аналого-цифровыми преобразователями. [6]

4 Датчик тока на эффекте Холла - это устройство, которое используется для измерения величины магнитного поля. Его выходное напряжение прямо пропорционально напряженности магнитного поля через него.

Датчики с эффектом Холла используются для определения приближения, позиционирования, определения скорости и измерения тока. [3]

Часто датчик Холла объединяется с определением порога, так что он действует как и называется переключателем. Обычно встречается в промышленных приложениях, таких как пневматический цилиндр на фото, они также используются в потребительском оборудовании; например, некоторые компьютерные принтеры используют их, чтобы обнаружить пропавшую бумагу и открыть крышки. Их также можно использовать в компьютерных клавиатурах, что требует сверхвысокой надежности.

Датчики Холла обычно используются для измерения частоты вращения колёс и валов, например, для определения момента зажигания двигателя внутреннего сгорания, тахометров и антиблокировочных тормозных систем. Они используются в бесщеточных электродвигателях постоянного тока для определения положения постоянного магнита. В изображенном колесе с двумя равномерно расположенными магнитами напряжение от датчика будет пиковым дважды за каждый оборот. Эта схема обычно используется для регулирования скорости дисководов.[7]

5 Датчик тока на эффекте Фарадея так как он является оптический трансформатор тока. Он обладает преимуществами хорошей изоляции, широкой полосы частот и отсутствия магнитного насыщения, поэтому он станет идеальной заменой обычного трансформатора тока, который используется в системах питания высокого и сверхвысокого напряжения. В опубликованной литературе оптический трансформатор тока исследовательские работы в основном направлены на оптимизацию проектирования структуры чувствительной головки и анализ внутреннего магнитного поля. Используя несимметричное оптическое волокно вокруг проводника тока, в котором используется магнитооптический эффект (эффект Фарадея), измеряет постоянные постоянные токи до или 600 кА в пределах $\pm 0,1\%$ от измеренного значения.[9]

Основные области применения различных датчиков и их сравнение

На следующих диаграммах представлены области типичных применений различных токовых датчиков. Таблица была составлена путем тестирования вышеупомянутых датчиков на 10 кВ и 220 кВ, которые широко используются в Казахстане.

Напряжение 10 кВ

Виды датчика тока	Класс точности	Масса, кг	Вторичный сигнал, А	Типы тока	Срок службы, год
Трансформатор тока	0,2S; 0,5S; 0,2; 0,5	700	1 и 5	Переменный ном. частота 50 Гц	30
Резистивные трансформатор тока	Не применяется				
Пояс Роговского	0,1				
Датчик тока на эффекте Холла	Не применяется				
Датчик тока на эффекте Фарадея	До 0,2S	175	PRP, РТР	Переменный, 0-2000 Гц Постоянный	30

Напряжение 220 кВ

Виды датчика тока	Класс точности	Масса, кг	Вторичный сигнал, А	Типы тока	Срок службы, год
Трансформатор тока	0,2S; 0,5S; 0,2; 0,5	700	1 и 5	Переменный ном. частота 50, 60 Гц	40
Резистивные трансформатор тока	Не применяется				
Пояс Роговского	Не применяется				
Датчик тока на эффекте Холла	Не применяется				
Датчик тока на эффекте Фарадея	До 0,2S	175	PRP, РТР	Переменный, 0-2000 Гц Постоянный	30

Резистивные трансформатор тока, пояс Роговского, датчик тока на эффекте Холла эти датчики при высоком напряжении не применяется. У них хорошие показатели до 1кВ. Традиционный трансформатор тока и датчик тока на эффекте Фарадея(оптический трансформатор тока) хорошо показали результаты.

Для эффективного измерения использование оптических методов измерения тока позволяет получать измеренные значения сразу в цифровом виде, а примененная схема измерения напряжений дает возможность значительно повысить точность измерений и снизить погрешности. Внедрение на энергетических объектах этих электронных трансформаторов обеспечит технологию измерений на качественно новом уровне, приблизив такие объекты к полноценному переходу к цифровой подстанции и технологии Smart Grid.[10]

1.3 Виды оптических трансформаторов тока.

Логическим шагом для преодоления проблем, вызванных электромагнитными помехами в сигнале датчика, является использование передачи сигнала, неуязвимой для электромагнитных полей. Передача оптического сигнала с использованием оптических волокон является лучшим решением для этой цели. Обычно на оптический сигнал не влияют электромагнитные поля. Однако в подходящем сконструированном датчике можно влиять на некоторые свойства света, который используется в качестве носителя сигнала, например, интенсивность, состояние поляризации, спектральные свойства и фазовая задержка. В идеале сигнал датчика генерируется непосредственно при взаимодействии магнитного поля с сенсорной средой. Известно, что несколько таких магнитооптических эффектов имеют место в магнитооптических активных материалах. [11]

Преимущество прямых магнитооптических преобразователей, использующих оптомагнитные активные материалы, заключается в отсутствии дополнительных переменных возмущений, вызванных механическими или электрическими деталями датчика, такими как гистерезис, насыщение, индукция, влияние температуры и демпфирование.[12]

За последние 30 лет появилось множество современных измерительных систем, основанных на оптических были разработаны устройства. Оптический трансформатор тока обладают многочисленными потенциальными преимуществами перед обычными трансформаторами тока, в зависимости от их сенсорного принципа.

Потенциальные преимущества заключаются в следующем:

- невосприимчивость к электромагнитным помехам
- высокая электрическая изоляция
- большая пропускная способность
- высокая чувствительность
- легкость в передаче света сигнала

- будучи компактным и легким
 - потенциально недорогой
 - нет опасности взрыва
 - простота интеграции в цифровые системы управления
 - нет насыщенности
 - Безгистерезисного
 - пассивное измерение
- } (зависит от принципа)

Однако в большинстве областей применения оптического трансформатора тока должны конкурировать со зрелыми технологиями. Следовательно, многие клиенты просто хотят, чтобы сенсорные системы имели хорошую производительность при разумной цене (за исключением специального использования) и выбирали обычные технологии. Таким образом, только несколько оптических устройств, разработанных главным образом самим заказчиком, то есть электроэнергетическими компаниями и распределителями электроэнергии, или крупными промышленными компаниями, проходят полевые испытания и используются.[10]

Однако в ОСТ используются не только чувствительные к волокну элементы. Также были предложены другие геометрии и принципы или гибридные устройства. Оптические преобразователи тока в дальнейшем будут разделены на пять основных групп:

- Оптический трансформатор тока на основе эффекта Фарадея
- Интерферометрические принципы
- Оптический трансформатор тока на основе Брэгговских решеток
- Микромеханические датчики с оптическим считыванием
- Другие принципы измерения оптического тока

1.3.1 Оптический трансформатор тока на основе эффекта Фарадея

Эффект Фарадея - это магнитооптический эффект, вызывающий изменение состояния поляризации света. Таким образом, кратко объясняются концепции поляризации и двойного лучепреломления, чтобы лучше понять эффект Фарадея и проблемы, возникающие при применении датчиков.

Поляризация. Свет можно рассматривать как плоскую волну и, как и все электромагнитные волны, иметь электрическое и магнитное поля, перпендикулярные направлению распространения. Обычно, говоря о поляризации, описывается только вектор электрического поля E , поскольку магнитная вектор поля всегда перпендикулярен и пропорционален ему. Две компоненты вектора электрического поля определены как компоненты x и y . Для простой гармонической волны эти составляющие изменяются синусоидально с одной и той же частотой. Однако их амплитуда и фаза могут отличаться, сравните рисунок - 1.3.1.

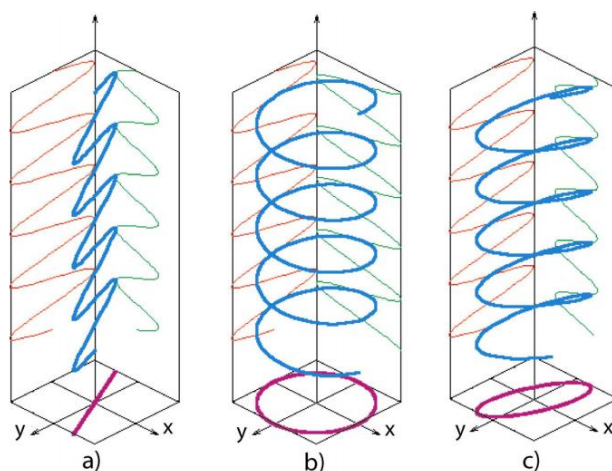


Рисунок - 1.3.1 - Линейная, круговая и эллиптическая поляризация

Особыми случаями поляризации являются линейная поляризация, которая возникает только тогда, когда обе компоненты имеют одинаковую фазу (рисунок - 1.3.1 а)), и круговая поляризация, при которой предполагается, что две компоненты сдвинуты по фазе точно на 90° и имеют одинаковую амплитуду, рисунок - 1.3.1 б). Направление вращения вектора зависит от того, какая из двух составляющих опережает другую на 90° . Эти случаи называются правой круговой поляризацией и левой круговой поляризацией. Все остальные случаи, когда две компоненты различаются по амплитуде или фазе, называются эллиптической поляризацией, рисунок - 1.3.1 в).

Магнитный концентратор с оптическим измерением. В этом подходе магнитный концентратор окружает проводник, но вместо этой магнитной петли, образующей сердечник трансформатора, поле внутри концентратора измеряется оптически в воздушном зазоре, рисунок - 1.3.2. Из-за воздушного зазора поле в сердечнике ограничено, и его насыщение не допускается. Однако при большем воздушном зазоре поле в зазоре становится зависимым от положения проводника с током.

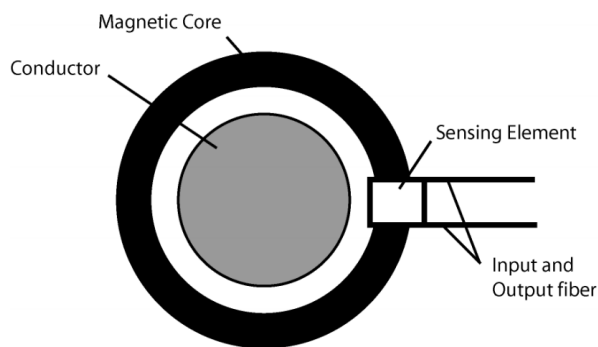


Рисунок - 1.3.2 - Схема датчика тока Фарадея с использованием магнитного концентратора

Было предложено много датчиков, использующих этот подход. Использование многократного отражения в объеме стекла, установленном в концентраторе ферромагнитного поля, увеличивает общий эффективный

оптический путь и, следовательно, чувствительность. Для предотвращения индуцированных отражением фазовых сдвигов, которые мешают вращению поляризации, были предложены два метода: отражение с критическим углом и двойное квадратурное отражение.[12]

1.3.2 Интерферометрические принципы

В интерферометре измеряется разница в длине между двумя оптическими путями. Чтобы использовать этот принцип для измерения тока или магнитного поля, его необходимо преобразовать в изменение длины пути. В большинстве случаев это изменение достигается за счет магнитострикции. Этот принцип был впервые предложен Яривом и другими исследователями в 1980 году: магнитострикционный материал механически связан с волокном. Когда этот материал подвергается воздействию магнитного поля, происходит изменение формы, которое вызывает деформацию волокна, что приводит к изменению длины волокна. Это изменение длины оптического пути можно измерить, поместив волокно в одно плечо интерферометра Мах-Цендера. Было реализовано множество различных дизайнов. Датчик, использующий магнитострикцию ферромагнитного сердечника с намотанным на него одномодовым волокном, представлен в рисунок - 1.3.3.[13]

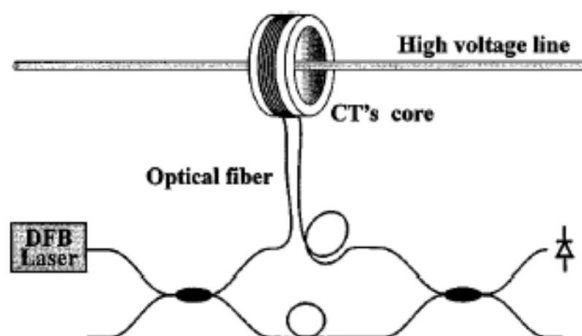


Рисунок - 1.3.3 - Оптоволоконный датчик тока

1.3.3 Оптический трансформатор тока на основе Брэгговских решеток

Этот принцип на самом деле является интерферометрическим, но он сгруппирован отдельно из-за различий в механизмах обнаружения и структуре. В последние годы было предложено несколько датчиков, которые измеряют механическую деформацию материала в магнитном поле с решеткой Брэгга. Брэгговская решетка - это оптическая решетка, которая работает как оптический фильтр. Волоконная решетка Брэгга - это периодическое или аperiodическое возмущение эффективного показателя преломления или эффективного коэффициента поглощения в сердцевине оптического волокна. Свет, распространяющийся в сердцевине, будет отражаться границами раздела между областями с разными показателями преломления. Но отраженный свет обычно не в фазе и гаснет. Однако для определенной длины волны, длины волны Брэгга λ , свет, отраженный периодически изменяющимся показателем преломления,

будет в одинаковой фазе и конструктивно сложен. Это приводит к отражению света в очень узком диапазоне длин волн. Волны других длин почти не подвержены влиянию и пропускают волокно. Когда такое волокно растягивается, изменяется постоянная решетки и, как следствие, изменяется отраженная длина волны. Это можно обнаружить как функцию напряжения и, следовательно, магнитного поля.[14]

Было разработано много различных типов датчиков тока Волоконная решетка Брэгга. Простой пример предложен с использованием магнестрикционного стержня с закрепленным на нем волокном решетка Брэгга для измерения изменения длины волны Брэгга, вызванного удлинением стержня, рисунок - 1.3.4.[15]

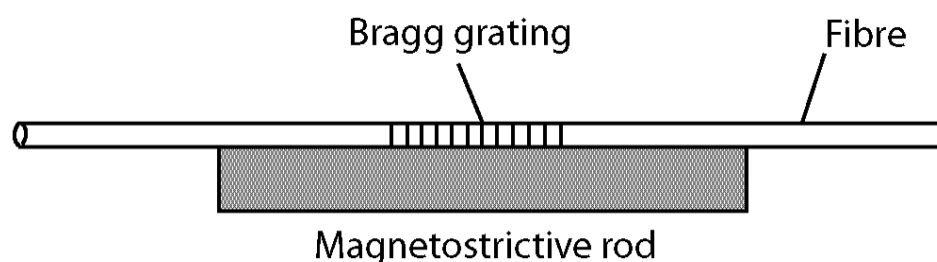


Рисунок - 1.3.4 - Схема датчика с волоконной брэгговской решеткой, перерисованная после

1.3.4 Микромеханические датчики с оптическим считыванием

С развитием микромеханические датчики с оптическим считыванием - индустрии в 1990-х годах для измерения магнитных полей и, следовательно, электрических токов стали применяться многие хорошо известные и понятные принципы. Большинство принципов используют механическую деформацию на основе стандартной кремниевой технологии и оптического считывания для обеспечения электромагнитной устойчивости. Однако коммерциализации этой технологии пока не наблюдается. Некоторые из принципов представлены ниже. Ученные предложили микромашинный оптоволоконный датчик тока, измеряющий магнитное поле вокруг проводника. Чувствительный элемент состоит из квадратной кремниевой мембраны, в центральной части которой закреплен цилиндрический постоянный магнит. Вибрация этой структуры в присутствии градиента магнитного поля, создаваемого переменным током, измеряется с помощью интерферометрии белого света. Для светодиодов и детекторов имеется большое преимущество в осуществимости и цене, поскольку нет ограничений на центральную длину волны и можно использовать стандартные одномодовые оптические волокна. Конструкция привода представляет собой простой процесс с одной маской. Принцип показан на рисунок - 1.3.5.[16]

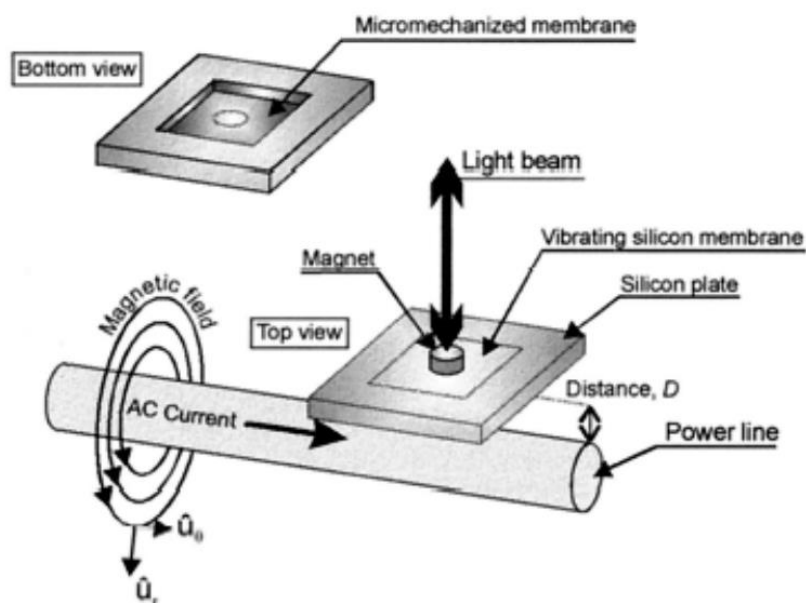


Рисунок - 1.3.5 - Микромеханический оптоволоконный датчик тока

1.3.5 Другие принципы измерения оптического тока

Далее кратко представлены некоторые принципы измерения электрических токов. Эти принципы довольно необычны и не могут быть коммерчески использованы для измерения тока.

Новый тип оптический трансформатор тока, основанный на новом физическом эффекте, магнитооптическом эффекте с термолинзой в феррожидкости, представлен в учениях. Когда лазерный луч фокусируется на поглощающей тонкой пленке феррожидкости, образуется эффективная вогнутая линза, которая рассеивает лучи в луче и заставляет их интерферировать. Следовательно, возникающий узор дифракционных колец может быть обнаружен двумя волокнами, которые обнаруживают соответствующее току изменение интенсивности света дифракционных колец.

Оптический трансформатор тока с использованием жидких кристаллов и хроматической модуляции представили исследователи, Рисунок - 1.3.6. Трансформатор тока ослабляет определенную часть падающего на него оптического спектра на величину, зависящую от тока, протекающего в линии электропередачи. Спектр анализируется двухслойным фотодиодом, и, таким образом, ток в линии электропередачи может быть косвенно измерен путем оценки отношения токов короткого замыкания фотодиода.[16]

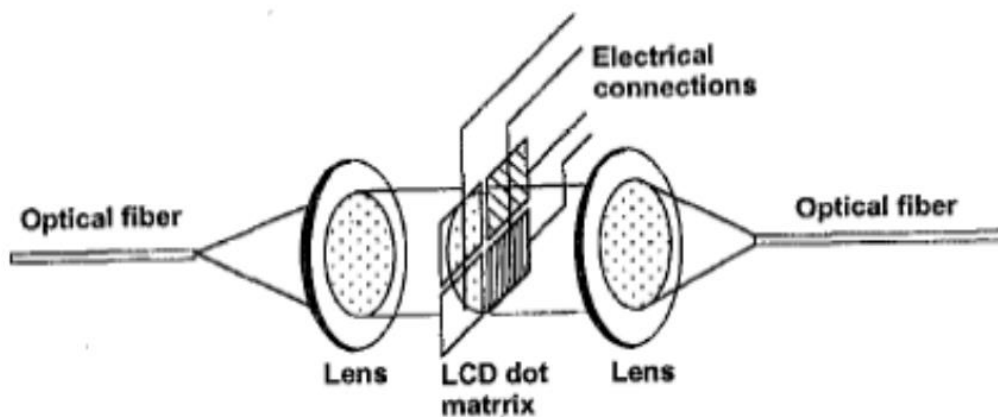


Рисунок - 1.3.6 - Жидкокристаллический модулятор на основе хроматической модуляции

2 Разработка моделей трансформаторов тока для цифровых подстанций в Matlab

2.1 Модель оптического трансформатора тока для аналогового выхода

Этот метод представляет собой аналоговую модель, рассматривая оптический трансформатор тока как черный ящик. Модель представлена передаточной функцией и схемой, производной от передаточной функции. Входными данными для этого метода являются измеренная частотная характеристика оптического трансформатора тока, которая состоит из двух частей: амплитуда в зависимости от частоты и фазовый угол в зависимости от частоты.

Этапы процедуры:

1. Получение амплитудно-частотная характеристика системы экспериментальным путем.
2. Аппроксимация коэффициентов полиномиальной передаточной функции с использованием данных частотной характеристики методом подбора комплексной кривой для минимизации ошибки.
3. Реконструкция разработанной передаточной функции в виде суммы рациональных функций первого порядка.
4. Сочетание передаточных функций первого порядка с передаточными функциями второго порядка.
5. Представление передаточных функций второго порядка схемами RLC и оставшихся передаточных функций первого порядка схемами RL.
6. Соединение цепей RLC и RL для формирования эквивалентной схемы, представляющей оптический трансформатор тока.
7. Валидация разработанных схем замещения.

2.1.1 Разработка передаточной функции с использованием данных частотной характеристики

Поскольку оптический трансформатор тока сложен и состоит из множества компонентов, желательно определить передаточную функцию на основе результатов тестирования для целей моделирования. Передаточная функция может быть определена двумя функциями, отношением амплитуд и фазовым углом, и может быть представлена отношением двух полиномов

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 s^1 + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n}{a_0 + a_1 s^1 + a_2 s^2 + \dots + a_m s^m} = \frac{\sum_n a_n s^n}{\sum_m b_m s^m} \quad (2.1)$$

Где:

«n» и «m» - это ранг многочленов (порядок знаменателя больше или равен порядку числителя).

«a» и «b» - постоянные коэффициенты.

Для построения передаточной функции $H(s)$ необходимо определение коэффициентов «a» и «b». Графики частотных характеристик, представленные на рисунок - 2.1.1, соответствуют передаточной функции $H(s)$. Для определения коэффициентов используется метод аппроксимации сложной кривой, представленный в [24]. Чтобы соответствовать данным измерений и функции $H(s)$, передаточная функция $G(s)$ формируется в полярной форме с точки зрения амплитуды и фазы для каждого частотного уровня. Числовая разница между передаточными функциями $G(s)$ и $H(s)$ представляет собой ошибку подгонки. Этот численный итерационный метод использует итерации Гаусса-Ньютона, которые ищут минимальную ошибку и оценивают передаточную функцию $H(s)$.

$$error(s) = G(s) - H(s) \quad (2.2)$$

На этом этапе используется программа Matlab. Эта функция выполняет аппроксимацию методом наименьших квадратов и определяет передаточную функцию с использованием данных амплитуды и фазы [20]. Частотный вектор, выбранный порядок числителя и знаменателя, а также выбранное количество итераций являются входными данными функции. Количество итераций установлено равным 50 для достижения достаточной точности менее 2%. Порядок числителя и знаменателя выбирается как 1, 2, 3 и 4 для числителя и 3, 4, 5 и 6 для знаменателя для оптимизации и поиска наилучшего соответствия. Некоторые коэффициенты и ошибки по амплитуде и фазе приведены в таблице 4-2. Результаты показывают, что лучший прогноз - 3 для числителя и 5 для знаменателя. Программа, используемая для процесса подбора, представлена в Приложении А. Экспериментальные значения изменяются вручную, чтобы проверить надежность программы. Программа использует ту же процедуру и разрабатывает новые передаточные функции с погрешностью менее 3%. Исходя из экспериментальных значений, приближенная передаточная функция равна

$$H(s) = \frac{-3.337 \cdot 10^9 s^3 + 4.911 \cdot 10^{14} s^2 - 6.259 \cdot 10^{19} s + 3.578 \cdot 10^{24}}{s^5 + 2.497 \cdot 10^5 s^4 + 4.564 \cdot 10^{10} s^3 + 4.487 \cdot 10^{15} s^2 + 2.115 \cdot 10^{20} s + 3.603 \cdot 10^{24}} \quad (2.3)$$

Ошибка в процессе оптимизации для каждого номера заказа вычисляется путем сравнения частотной характеристики полученной передаточной функции с измеренной частотной характеристикой. На рисунок - 2.1.1 показано сравнение для системы пяти порядков. Максимальная ошибка по амплитуде составляет 0,41%, а максимальная ошибка по фазе составляет 1,11%, как показано в таблице 4-2 для итерации номер 3 для числителя и 5 для знаменателя. Учитывая точность измерения в 2%, отклонение в 0,41% очень близко. Однако пользователь предлагаемого метода может выбрать значения, подходящие для конкретных приложений. Программа, используемая для итерации различных порядковых номеров, представлена в Приложении А.

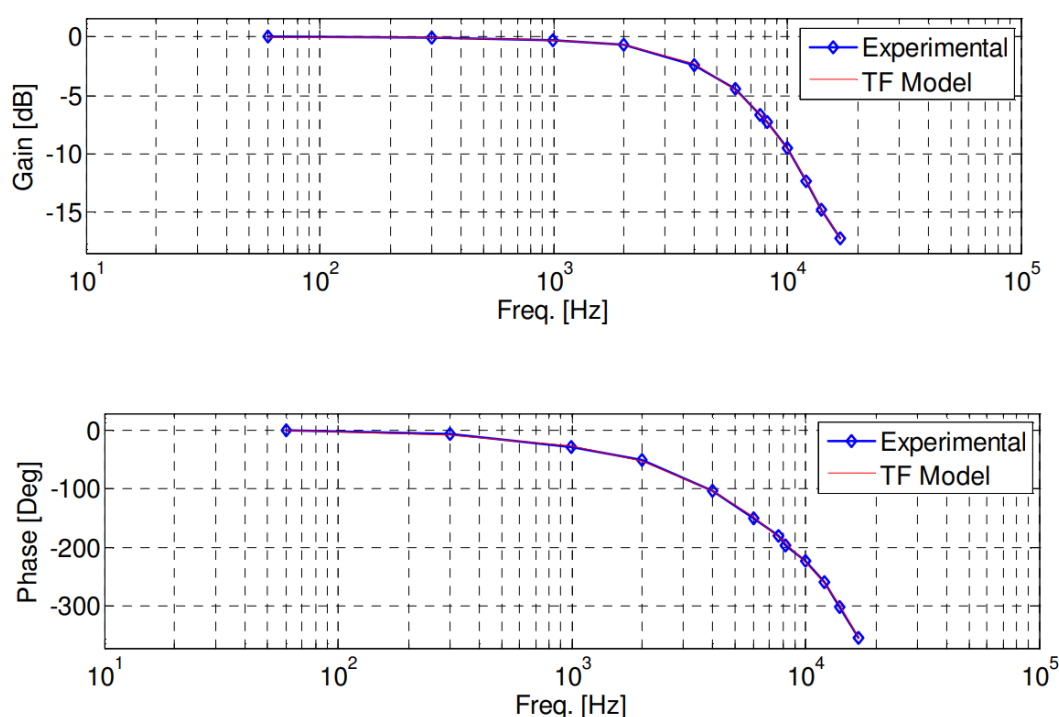


Рисунок - 2.1.1 - Сравнение амплитудно-частотная характеристика модели и экспериментальных результатов.

Таблица 4-2

Коэффициенты передаточной функции для различных итераций

коэффициенты	Номера для заказа (число / день)			
	3 / 4	4 / 5	3 / 5	4 / 6
a_0	2.608e19	1.686e23	3.603e24	3.603e24
b_0	2.586e19	1.685e23	3.578e24	9.923e29
a_1	1.467e15	2.976e19	2.115e20	1.756e26
b_1	-5.133e14	1.633e19	-6.259e19	9.651e25
a_2	2.908e10	1.302e15	4.487e15	7.694e21
b_2	4.275e9	-3.493e14	4.911e14	-2.055e21

a ₃	2.38e5	2.491e10	4.564e10	1.475e17
b ₃	-2.938e4	2.868e9	-3.337e9	1.685e16
a ₄	1	1.955e5	2.497e5	1.167e12
b ₄		-2.061e4	0	-1.211e11
a ₅		1	1	6.01e6
b ₅				0
a ₆				1
Максимальная ошибка (%) амплитудное	0.52	1.04	0.41	1.03
Максимальная ошибка (%) Фаза	1.20	1.13	1.11	1.12

2.1.2 Реконструкция развитой передаточной функции как суммы рациональных функций первого порядка и их схемных реализаций

Разработанная передаточная функция может быть записана в терминах рациональных функций с использованием действительных полюсов, комплексно сопряженных полюсов и вычетов следующим образом;

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s-a_n} + d \quad (2.4)$$

где c_n - вычеты, a_n - полюсы, а N - общее количество полюсов. Полюса и вычеты могут быть действительными или комплексно сопряженными парами, но d всегда вещественно [18]. Развитая передаточная функция имеет две комплексно сопряженные пары и один действительный полюс, как показано в таблице 4-3.

Комплексно сопряженные полюса и остатки состоят из двух частей: реальные (p_{rn} и c_{rn}) и мнимые (p_{in} и c_{in}). Остатки представлены как z и $c_{2n}=c_{rn}-j c_{in}$ где $n=1,2,\dots, K$ и K - количество комплексно сопряженных пар полюсов. Полюса представлены как $a_{2n-1}= -p_{rn} + j p_{in}$ и $a_{2n}= -p_{rn} - j p_{in}$ где $n=1,2,\dots, K$

Таблица 4-3
Полюсы и нули передаточной функции

Остаточные(c_n) ($\times 10^5$)	Полюсы(a_n) ($\times 10^5$)	Const(d)
-0.1261-j0.1297	-0.4610 + j1.4201	0
-0.1261+j0.129	-0.4610 - j1.4201	
-1.2140+j2.3843	-0.6015 - j0.2686	
-1.2140-j2.3843	-0.6015 - j0.2686	
2.6802	-0.3724	

Рациональные функции можно классифицировать следующим образом $\frac{c_n}{s-a_n}$ для реальных полюсов, $\frac{c_{rn}+jc_{in}}{-(p_{rn}+jp_{in})} + \frac{c_{rn}-jc_{in}}{s-(p_{rn}-jp_{in})}$ для пары комплексных сопряженных полюсов, и d – постоянная.

Основываясь на этих классификациях, аппроксимированная передаточная функция может быть переписана следующим образом:

$$H(s) = \underbrace{\frac{(2.6802) \times 10^5}{s - (-0.3724) \times 10^5}}_{\text{Реальный полюс}} + \underbrace{\left\{ \frac{(-0.1261 - j0.1297) \times 10^5}{s - (-0.4610 + j1.4201) \times 10^5} + \frac{(-0.1261 + j0.1297) \times 10^5}{s - (-0.4610 - j1.4201) \times 10^5} + \frac{(-1.2140 + j2.3843) \times 10^5}{s - (-0.6015 + j0.1286) \times 10^5} + \frac{(-1.2140 - j2.3843) \times 10^5}{s - (-0.6015 - j0.1286) \times 10^5} \right\}}_{\text{Комплексно сопряженные пары полюсов}} \quad (2.5)$$

Модель электрической цепи для окт может быть разработана после формирования передаточной функции в терминах рациональных функций и константы. Суммирование рациональных передаточных функций означает наличие параллельных связей цепей каждой передаточной функции [23]. В качестве процесса реализации используется метод, представленный в работах [18] и [22], однако эти методы нуждаются в объяснении корректировке и дополнении. Первым этапом моделирования является схемная реализация каждой рациональной функции и константы. Каждая рациональная функция или пара рациональных функций реализуется в виде ряда элементов схемы. Реальные полюсы, имеющие характеристики фильтра нижних частот, реализуются как RL, а комплексно сопряженные пары полюсов, имеющие характеристики полосового фильтра, реализуются как схемы RLC. Каждый полюс реализуется следующим образом:

Реальные полюсы: реальные полюсы представлены в виде фильтра нижних частот с последовательным соединением L и R и источником управляющего напряжения (VCVS). Эта схема аналогична типичному фильтру нижних частот RL, где передаточная функция $A(s)$ находится в (рисунок - 2.1.2).

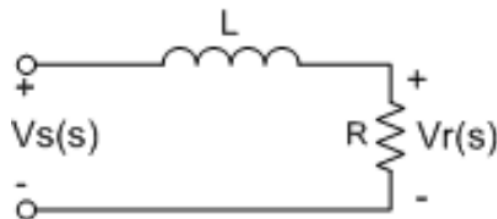


Рисунок - 2.1.2 - Типичная схема фильтра нижних частот

$$A(s) = \frac{V_r(s)}{V_s(s)} = \frac{R}{sL + R} \quad (2.6)$$

Подставляя 1Ω в передаточную функцию $A(s)$ вместо R , получаем

$A(s) = \frac{1}{sL+1}$. Действительная Полюсная рациональная функция передаточной функции является формой $F_1(s) = \frac{C_n}{s-a_n} = \frac{(2.6802) \times 10^5}{s-(-0.3724) \times 10^5}$. Эта функция аналогична передаточной функции $A(s)$

Схема RL; однако, она нуждается в некоторой манипуляции. Для того чтобы сделать $\frac{1}{sL+1} = \frac{C_n}{s-a_n}$ коэффициент умножения “G1 ” используется в качестве

$$\frac{1}{sL+1} = G_1 \frac{1}{\frac{s}{p_n}+1} \quad (2.7)$$

Где $G_1 = \frac{C_n}{p_n} = \frac{2.6802 \times 10^5}{0.3724 \times 10^5} = 7.1971$ и следовательно, $L = \frac{1}{p_n} = \frac{1}{0.3724 \times 10^5} = 26.85 \mu H$. G_1 можно назвать коэффициент умножения напряжения резистора 1Ω и представить его с помощью VCVS, где G1 - коэффициент усиления. В результате схема представляет собой типичную схему фильтра нижних частот RL с добавлением VCVS. Параметры схемы основаны для индуктора как $26,85$ МКЧ для резистора 1Ω , а для VCVS коэффициент усиления $7,1971$. На рисунок - 2.1.3 показана конечная схема представления рациональной функции реального полюса.

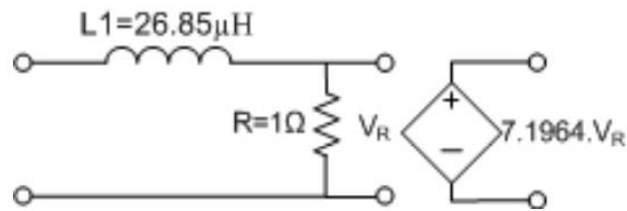


Рисунок - 2.1.3 - Схема реализации реального полюса

Комплексные полюса: передаточная функция имеет две комплексно сопряженные пары. Каждая пара переформулируется и суммируются две рациональные функции, чтобы сделать эту функцию аналогичной известным передаточным функциям в терминах s следующим образом:

$$\frac{c_{rn}+j c_{in}}{-(p_{rn}+j p_{in})} + \frac{c_{rn}-j c_{in}}{s-(p_{rn}-j p_{in})} = \frac{(-0.1261-j 0.1297) \times 10^5}{s-(-0.4610+j 1.4201) \times 10^5} + \frac{(-0.1261+j 0.1297) \times 10^5}{s-(-0.4610-j 1.4201) \times 10^5} \quad (2.8)$$

После дальнейших вычислений и формулировки функции как рациональной функции s , функция может быть переписана как сумма двух функций следующим образом:

$$F_2(s) = \frac{2 c_{rn} p_{rn} - 2 p_{in} c_{in}}{s^2 + 2 p_{rn} s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} + \frac{2 c_{rn} s}{s^2 + 2 p_{rn} s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} \quad (2.9)$$

$$F_2(s) = \frac{2.522 \times 10^9}{s^2 + 9022 \times 10^4 s + 2.229 \times 10^{10}} + \frac{-2.522 \times 10^4 s}{s^2 + 9022 \times 10^4 s + 2.229 \times 10^{10}}$$

Передаточная функция $F_2(s)$ формируется как сумма двух передаточных функций, $B_1(s) + B_2(s)$, где каждая функция имеет характеристики полосового фильтра. $B_1(s)$ реализована как набор полосовых колебательный контур фильтра и $B_2(s)$ реализуется в виде параллельных полосовых фильтров в схеме. В обеих схемах в качестве коэффициента умножения используется дополнительный VCVS. $B_1(s)$ реализация выглядит следующим образом:

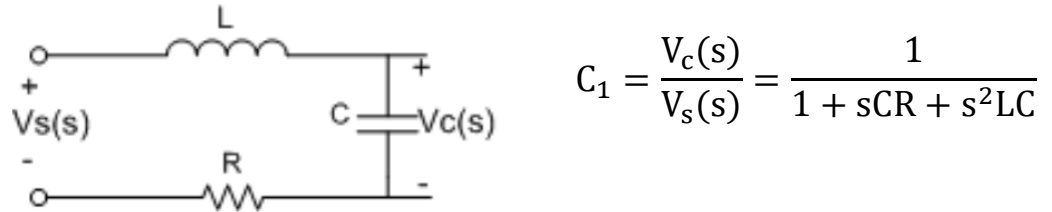


Рисунок - 2.1.4 - Типичная схема фильтра нижних частот и его передаточная функция

Типичный фильтр нижних частот RLC имеет схему и передаточную функцию, как показано на рисунке - 2.1.4. Если R выбран 1 тогда передаточная функция будет $C_1 = \frac{V_c(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{1 + sCR + s^2LC}$. С другой стороны, $B_1(s)$, одна из частей разработанных передаточных функций, имеет вид

$$B_1(s) = \frac{2c_{rn}p_{rn} - 2c_{in}p_{in}}{s^2 + 2p_{rn}s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{D}{E + sF + s^2G} = \frac{2.522 \times 10^9}{s^2 + 9.22 \times 10^4 s + 2.229 \times 10^{10}} \quad (2.10)$$

который похож на $C_1(s)$, но нуждается в некоторой манипуляции. Для того чтобы сделать $C_1(s) = B_1(s)$, коэффициент умножения “ G_2 ” используется в качестве

$$\frac{1}{1 + sC + s^2LC} = G_2 \frac{1}{1 + Ys + Ys^2} \quad (2.11)$$

где

$$\begin{aligned} G_2 &= 2 \frac{c_{rn}p_{rn} - p_{in}c_{in}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{2.522 \times 10^9}{2.229 \times 10^{10}} = 0.1131 \\ Y = C &= \frac{2p_{rn}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{9.2198 \times 10^4}{2.229 \times 10^{10}} = 4.1363 \mu F \\ X = LC &= \frac{1}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{1}{2.229 \times 10^{10}} = 4.4863 \times 10^{-11} \\ L = \frac{X}{C} &= \frac{1}{2p_n} = \frac{1}{9.2198 \times 10^4} = 10.846 \mu H \end{aligned}$$

(2.12)

В результате параметры схемы найдены для индуктора 10,846 μH , для конденсатора 4,1363 μF , для резистора 1 Ω и для коэффициента усиления VCVS 0,1131; они показаны на рисунок - 2.1.5.

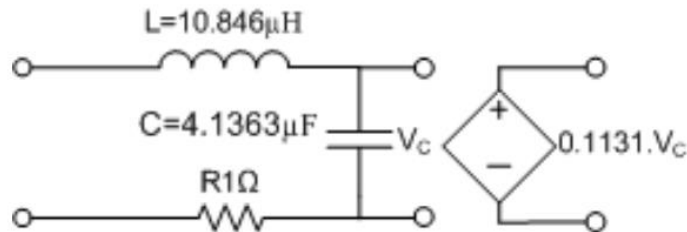


Рисунок - 2.1.5 - Схема реализации $B_1(s)$

Реализация $B_2(s)$ подразумевается аналогичным образом. Параллельное RLC-соединение полосовой схемы используется для реализации следующим образом:

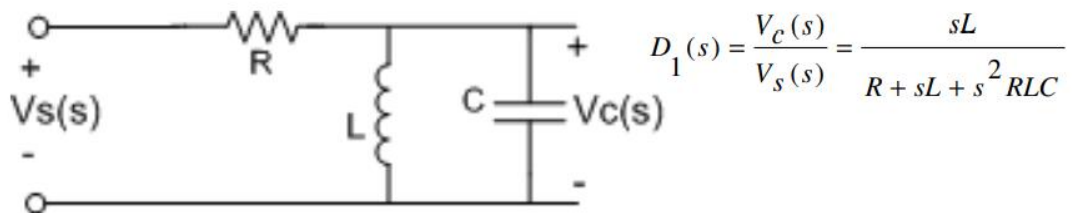


Рисунок - 2.1.6 - Типичная схема полосового фильтра и его передаточная функция

Типичный полосовой фильтр RLC имеет схему и передаточную функцию, как показано на рисунок - 2.1.6. Если R выбрано 1 Ω , то передаточная функция

$$D_1(s) = \frac{V_c(s)}{V_s(s)} = \frac{sL}{1 + sL + s^2 LC}.$$

цепи будет . С другой стороны, $B_2(s)$, одна из частей разработанной передаточной функции, имеет вид,

$$B_2(s) = \frac{2c_{rn}s}{s^2 + 2p_{rn}s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{Ds}{E + sF + s^2 G} = \frac{-2.522 \times 10^4 s}{s^2 + 9.22 \times 10^4 s + 2.229 \times 10^{10}} \quad (2.13)$$

что аналогично $D_1(s)$. Однако он нуждается в некоторой манипуляции. Для того чтобы сделать $D_1(s) = B_2(s)$, коэффициент умножения “ G_3 ” используется в качестве

$$\frac{sL}{1+sC+s^2LC} = G_3 \frac{Ys}{1+Ys+Xs^2} \quad (2.14)$$

где

$$\begin{aligned} G_3 &= \frac{c_{rn}}{p_{rn}} = \frac{-1.2609 \times 10^4}{4.6099 \times 10^4} = -0.2735 \\ Y = L &= \frac{2p_{rn}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{9.2198 \times 10^4}{2.229 \times 10^{10}} = 4.1363 \mu H \\ X = LC &= \frac{1}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{1}{2.229 \times 10^{10}} = 4.4863 \times 10^{-11} \\ C = \frac{X}{L} &= \frac{1}{2p_n} = \frac{1}{9.2198 \times 10^4} = 10.846 \mu F \end{aligned} \quad (2.15)$$

В результате параметры схемы найдены для индуктора как 4,4863 μ Н, для конденсатора как 10,846 μ F, для резистора 1 Ω и для коэффициента усиления VCVS -0,2735; схема приведена на рисунок - 2.1.7.

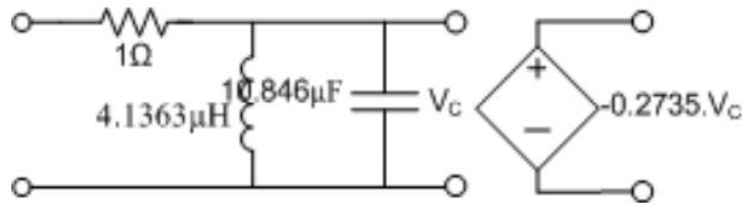


Рисунок - 2.1.7 - Схема реализации $B_2(s)$

Та же процедура применяется для второго комплексно сопряженного парного полюса следующим образом:

$$\begin{aligned} &\frac{c_{rn} + jc_{in}}{s - (p_{rn} + jp_{in})} + \frac{c_{rn} - jc_{in}}{s - (p_{rn} - jp_{in})} \\ &= \frac{(-1.2140 + j2.3843) \times 10^5}{s - (-0.6015 + j0.1286) \times 10^5} + \frac{(-1.2140 - j2.3843) \times 10^5}{s - (-0.6015 - j0.1286) \times 10^5} \end{aligned} \quad (2.16)$$

После дальнейших вычислений и составления функции в виде рациональных функций s , функция может быть переписана как сумма двух функций следующим образом:

$$F_3(s) = \underbrace{\frac{-2.741 \times 10^{10}}{s^2 + 1.203 \times 10^5 s + 4.34 \times 10^9}}_{B_3(s)} + \underbrace{\frac{-2.428 \times 10^5 s}{s^2 + 1.203 \times 10^5 s + 4.34 \times 10^9}}_{B_4(s)} \quad (2.17)$$

Передаточная функция $F_3(s)$ формируется как сумма двух передаточных функций, $B_3(s) + B_4(s)$. Каждая часть реализована в виде серии схем RLC. Для $B_3(s)$ рассматривается следующая схема:

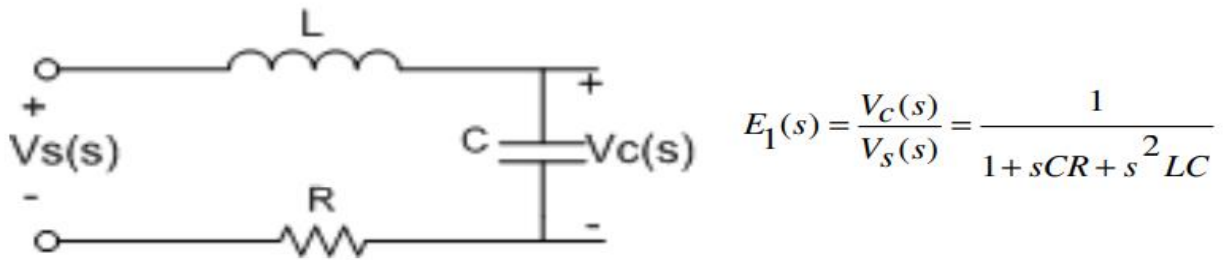


Рисунок - 2.1.8 - Типичная схема фильтра нижних частот и его передаточная функция

Если R выбрано 1Ω , то передаточная функция будет другой стороны, $B_3(s)$ в (рисунок - 2.1.8) имеет вид

$$B_3(s) = \frac{2c_{rn}p_{rn} - 2p_{in}c_{in}}{s^2 + 2p_{rn}s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{D}{E + sF + s^2G} = \frac{-2.741 \times 10^{10}}{s^2 + 1.203 \times 10^5 s + 4.34 \times 10^9} \quad (2.18)$$

который похож на $E_1(s)$; однако он нуждается в некоторой манипуляции. Для того чтобы сделать $E_1(s) = B_3(s)$, коэффициент умножения " G_4 " используется в качестве

$$\frac{1}{1 + sC + s^2LC} = G_4 \frac{1}{1 + Ys + Xs^2} \quad (2.19)$$

где

$$\begin{aligned}
G_4 &= 2 \frac{c_{rn} p_{rn} - p_{in} c_{in}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{-2.741 \times 10^{10}}{4.34 \times 10^9} = -6.3157 \\
Y &= C = \frac{2 p_{rn}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{2.4061 \times 10^5}{4.34 \times 10^9} = 27.721 \mu F \\
X &= LC = \frac{1}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{1}{4.34 \times 10^9} = 2.304 \times 10^{-10} \\
L &= \frac{X}{C} = \frac{1}{2 p_n} = \frac{1}{1.2031 \times 10^5} = 8.3121 \mu H
\end{aligned}
\tag{2.20}$$

В результате параметры схемы найдены для индуктора как 8.3121 μH, для конденсатора как 27.721 μF, для резистора 1Ω, а для VCVS коэффициент усиления равен -6.3157.



Рисунок - 2.1.9 - Схема реализации $V_3(s)$

Реализация $V_4(s)$ разрабатывается аналогичным образом. Параллельное RLC-соединение полосовой схемы используется для реализации следующим образом:

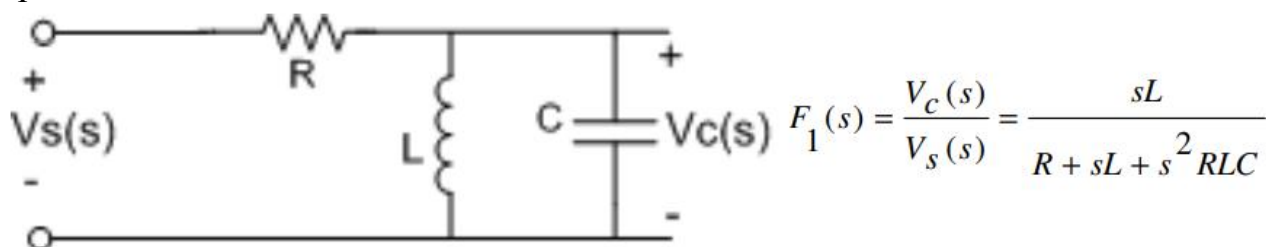


Рисунок - 2.1.10 - Типичная схема полосового фильтра и его передаточная функция

$$F_1(s) = \frac{V_c(s)}{V_s(s)} = \frac{sL}{1 + sL + s^2 LC}.$$

Если R выбрано 1Ω, то передаточная функция будет
. С другой стороны, $V_4(s)$ имеет вид

$$B_4(s) = \frac{2 c_{rn} s}{s^2 + 2 p_{rn} s + p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{Ds}{E + sF + s^2 G} = \frac{-2.428 \times 10^5 s}{s^2 + 1.203 \times 10^5 s + 4.34 \times 10^9}
\tag{2.21}$$

который похож на $F_1(s)$; однако он нуждается в некоторой манипуляции. Для того чтобы сделать $F_1(s) = B_4(s)$, коэффициент умножения " G_5 " используется в качестве

$$\frac{sL}{1+sC+s^2LC} = G_5 \frac{Ys}{1+Ys+Xs^2} \quad (2.22)$$

где

$$\begin{aligned} G_5 &= \frac{c_{rn}}{p_{rn}} = \frac{-1.214 \times 10^5}{6.0154 \times 10^4} = -2.0182 \\ Y = L &= \frac{2p_{rn}}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{1.2031 \times 10^5}{4.3398 \times 10^9} = 27.722 \mu\text{H} \\ X = LC &= \frac{1}{p_{rn}^2 + p_{in}^2} = \frac{1}{4.3398 \times 10^9} = 2.3043 \times 10^{-10} \\ C = \frac{X}{L} &= \frac{1}{2p_n} = \frac{1}{1.2031 \times 10^5} = 8.3121 \mu\text{F} \end{aligned} \quad (2.23)$$

В результате параметры схемы определяются для индуктора как 27,722 μH , для конденсатора как 8,3121 μF , для резистора 1 Ω и для коэффициента усиления VCVS -2,0182.

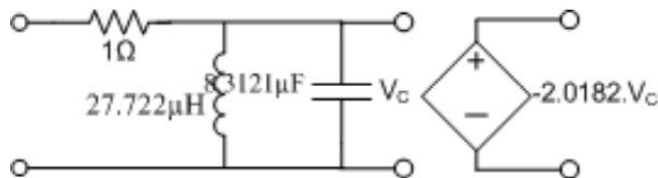


Рисунок - 2.1.11 - Схема реализации $B_4(s)$

2.2 Цифровая модель для оптических измерительных трансформаторов

Поскольку оптический трансформатор тока базируется на электронике и включает в себя блок обработки сигналов, он будет полезно использовать цифровое представление аналогового выхода в дополнение к аналоговой модели для целей моделирования. Существуют широко используемые методы проектирования цифрового фильтра, который представляет собой аналоговый фильтр. Одним из таких методов является согласование частотной характеристики цифрового фильтра (частотная характеристика аналогового фильтра). Для преобразования используется метод билинейного преобразования

функции переноса s-домена, разработанная в предыдущем разделе, $H(s)$, в Z-домен передаточной функции, $H(z)$. Билинейное преобразование - это точное отображение плоскости z на s -плоскость, выполнив следующее преобразование:

$$s \rightarrow \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \text{ or } z \rightarrow \frac{2+sT_s}{2-sT_s}$$

где T -время выборки. Этот метод успешно преобразует любое стабильное непрерывное время системы в устойчивую дискретную временную систему [57]. Выполняется преобразование из $H(s)$ в $H(z)$ используя команды Matlab "c2d" с частотой дискретизации 7,8125 МКС и выбирается метод расчета как "Tustin." $H(z)$ находится в виде:

$$H(z) = \frac{-0.0110z^5 + 0.0176z^4 + 0.0156z^3 - 0.0329z^2 + 0.0128z + 0.03276}{z^5 - 2.738z^4 + 3.394z^3 - 2.425z^2 + 0.9712z - 0.1669}$$

Частотные характеристики $H(s)$ и $H(z)$ сравниваются с экспериментальными данными и показаны на рисунок – 2.1.1. Видно, что эти два ответа совпадают и успешно следуют друг за другом. Вычеты и полюса передаточной функции $H(z)$ рассчитаны и представлены таблице 4-6. Путем поиска на полюсах, нулях и z -карте передаточной функции видно, что все полюса являются внутри единичного круга и система стабильна.

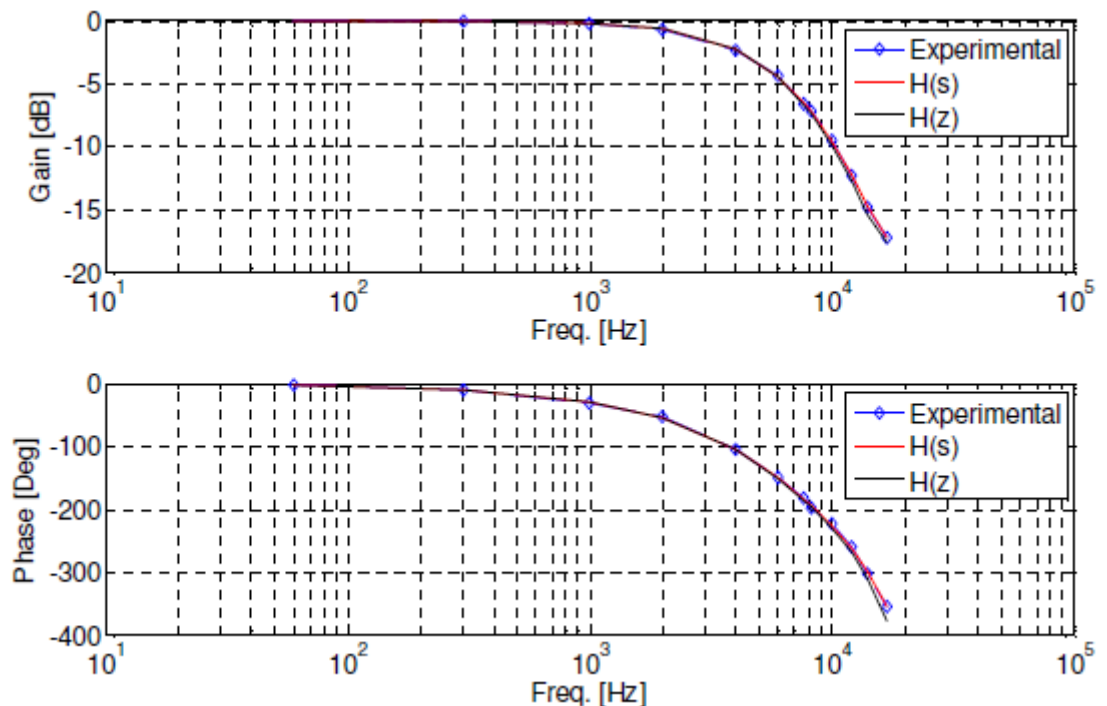


Рисунок 2.2.1 - Сравнение частотных характеристик $H(s)$ и $H(z)$

Таблица 4-6
Полюсы и вычеты передаточной функции

<i>Residues</i>	<i>Poles</i>	<i>Constant</i>
0.0089-j0.0826	0.3881+j0.6525	-0.0110
0.0089+j0.0826	0.3881-j0.6525	
1.5958	0.7460	
-0.8131+j1.0910	0.6079+j0.1366	
-0.8131-j1.0910	0.6079-j0.1366	

2.2.1 Реализация цифровой модели

Передаточная функция цифрового фильтра рассчитывается как $H(z)$, а структура фильтра должна быть реализована с помощью блок-схемы. Реализация с блок-схемой представляет собой схему потока сигналов. Он включает в себя задержки, сложения, умножения и постоянные коэффициенты. Порядок операций, масштабирование и точность игнорируются. Разработанный фильтр может быть реализован разными способами с разными свойствами. Некоторые из форм реализации: прямая форма I и II, каскад, параллель, лестница, решетка и мульти-обратная связь [24]. Прямая форма I используется для реализации передаточной функции $H(z)$.

Три основных типа элементов для реализации - это единичная задержка, сумматор и умножитель. Блок задержки удерживает входной сигнал в течение единицы времени и доставляет его на выход. Обозначается значком оператор задержки « Z^{-1} » в z -области. Сумматор добавляет два или более входных сигнала, а множитель умножает сигнал постоянным числом.

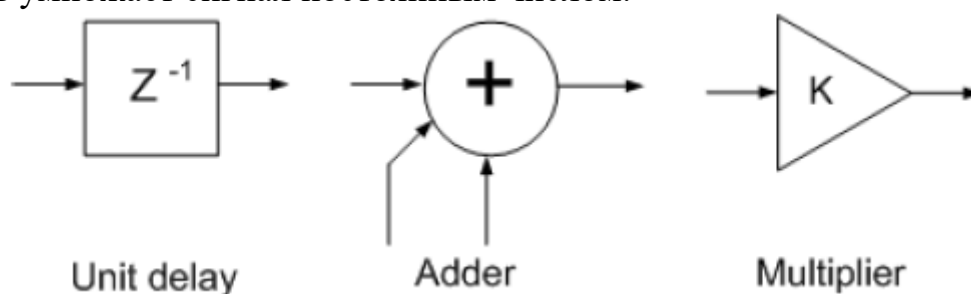


Рисунок - 2.2.2 - Элементы блок-схемы

Первым шагом в реализации цифрового фильтра является преобразование передаточной функции в разностное уравнение. Передаточная функция - это отношение выходного z -преобразования к входному z -преобразованию. $H(z)$ передаточная функция делится на наивысший порядок z и переписывается как:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{-0.01102 + 0.01763z^{-1} + 0.0156z^{-2} - 0.03298z^{-3} + 0.01282z^{-4} + 0.03276z^{-5}}{1 - 2.738z^{-1} + 3.394z^{-2} - 2.425z^{-3} + 0.9712z^{-4} - 0.1669z^{-5}}$$

Получение результатов перекрестного умножения:

$$X(z)(-0.01102 + 0.01763z^{-1} + 0.0156z^{-2} - 0.03298z^{-3} + 0.01282z^{-4} + 0.03276z^{-5}) = Y(z)(1 - 2.738z^{-1} + 3.394z^{-2} - 2.425z^{-3} + 0.9712z^{-4} - 0.1669z^{-5})$$

Обратное преобразование дает:

$$\begin{aligned} & -0.01102x[n] + 0.01763x[n-1] + 0.0156x[n-2] - 0.03298x[n-3] \\ & + 0.01282x[n-4] + 0.03276x[n-5] = y[n] - 2.738y[n-1] + 3.394y[n-2] \\ & - 2.425y[n-3] + 0.9712y[n-4] - 0.1669y[n-5] \end{aligned}$$

и, наконец, решение относительно $y[n]$ дает:

$$\begin{aligned} y[n] = & -0.01102x[n] + 0.01763x[n-1] + 0.0156x[n-2] - 0.03298x[n-3] \\ & + 0.01282x[n-4] + 0.03276x[n-5] + 2.738y[n-1] - 3.394y[n-2] \\ & + 2.425y[n-3] - 0.9712y[n-4] + 0.1669y[n-5] \end{aligned}$$

Используя прямую форму I, для цифровой модели построена блок-схема на рисунок - 2.2.3. Эта блок-схема протестирована в Matlab Simulink и сравнивается с выходной функцией передаточной функции $H(z)$. Выходные данные блок-схемы соответствуют выходным данным передаточной функции, а символ представляет передаточную функцию успешно.

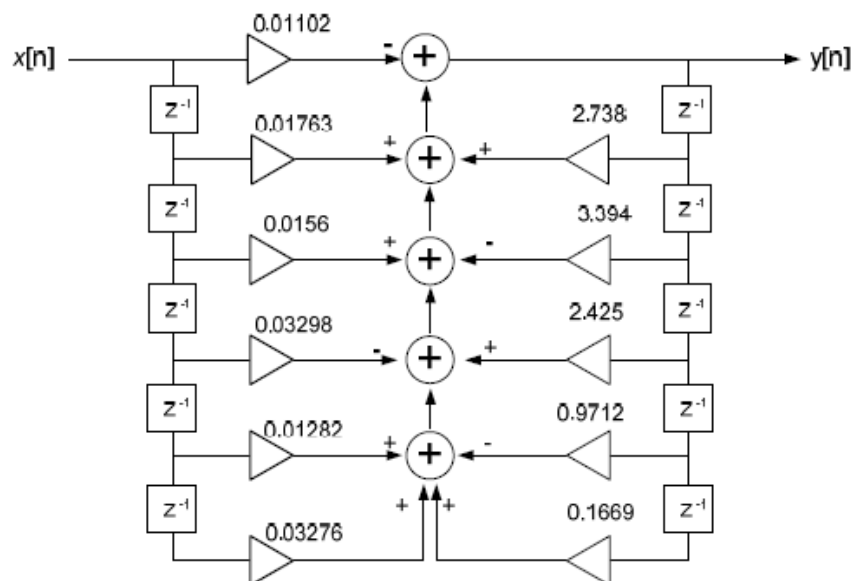


Рисунок - 2.2.3 - Цифровое представление аналогового выхода оптический трансформатор тока

2.3 Полная модель оптического трансформатора тока

Литература показывает много исследований по моделированию оптических частей оптических трансформаторов тока [25] - [27]. Поскольку принципы работы систем различны, разработанные модели различны. В большинстве исследований используется метод исчисления Джонса для моделирования оптических элементов трансформаторов и повышения точности систем. Однако все они сосредоточены только на оптических элементах и не учитывают электронную часть оптического трансформатора тока. В этом разделе представлена полная модель оптического трансформатора тока, которая включает в себя его электронные части, а также его оптические элементы. Метод исчисления Джонса, представленный в [25], используется для моделирования оптических частей оптического трансформатора тока.

Оптическая блок-схема оптического ТТ NxtPhase показана на рисунке - 2.3.1. Свет от источника света, в основном светоизлучающего диода (LED), поступает в оптоволоконный поляризатор. Свет поляризуется и затем расщепляется на две ортогонально поляризованные световые волны в поляризаторе. Свет входит в чувствительную головку, которая включает в себя четвертьволновую пластину, которая преобразует две линейные ортогональные волны в круговую волну правой и левой поляризованных световых волн соответственно.

Две волны движутся с разными скоростями через чувствительное волокно. Разница в скоростях пропорциональна напряженности магнитного поля, выровненного с чувствительным волокном. После завершения их путешествия в чувствительной области две волны отражаются от зеркала. Отражение вызывает обмен или изменение круговой поляризации двух волн, и две волны затем движутся в противоположном направлении относительно магнитного поля. При движении в противоположном направлении две волны продолжают сохранять свои разности скоростей для обратного пути через чувствительное волокно.

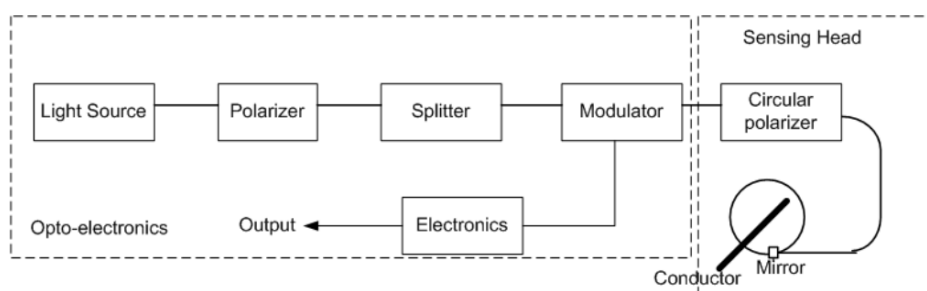


Рисунок - 2.3.1 - Блок-схема оптического трансформатора тока [38]

Во время их обратного пути, как только свет проследует свой путь через чувствительную область, две волны снова сталкиваются с четвертьволновой пластиной, которая преобразует их обратно в состояния линейной поляризации. Изменения в состояниях двух линейно поляризованных источников сравниваются, и измеряется разность фаз между ними. Эта разница пропорциональна току, проходящему через проводник из-за эффекта Фарадея.

Учитывая матрицы Джонса оптических элементов в оптический трансформатор тока, матрицы переноса системы, которые представляют конечные состояния двух волн, можно записать в виде:

$$E_{y1} = M_p^y M_p^b M_F^b M_m M_F^f M_q^f E_{x0}$$

$$E_{x1} = M_p^x M_q^b M_F^b M_m M_F^f M_q^f E_{y0}$$

где E_{x0} и E_{y0} - входные источники света, а E_{y1} и E_{x1} - конечные состояния векторов Джонса обратного света. M_q^f и M_q^b - матрицы четвертьволнового (кругового поляризатора) для прямого и обратного проходов. Дополнительный коэффициент умножения (фазовращатель) $e^{i(\pi/2)}$ добавляется к этим матрицам для того, чтобы сделать расчеты подходящими. M_m - матрица для зеркала. M_F^f и M_F^b - матрицы ротатора Фарадея для проходов вперед и назад. M_p^x и M_p^y - уменьшенные поляризующие матрицы от 2×2 до 1×2 , где нули исключены, чтобы сделать расчеты подходящими. Матрицы, представленные в таблице 4-7, используются для расчетов, и выполняются следующие расчеты.

$$E_{y1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} e^{i(\frac{\pi}{2})} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} e^{i(\pi/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{y1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} e^{i(\frac{\pi}{2})} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} e^{i(\pi/2)} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Вращающие матрицы Фарадея M_F^f и M_F^b включают угол поворота, который представляет собой величину вращения света в присутствии магнитного поля, и может быть представлен как

$$\theta = VNI \quad (4.40)$$

где V - постоянная Верде волокна, N - число витков волокна, а I - ток, проходящий через проводник с током.

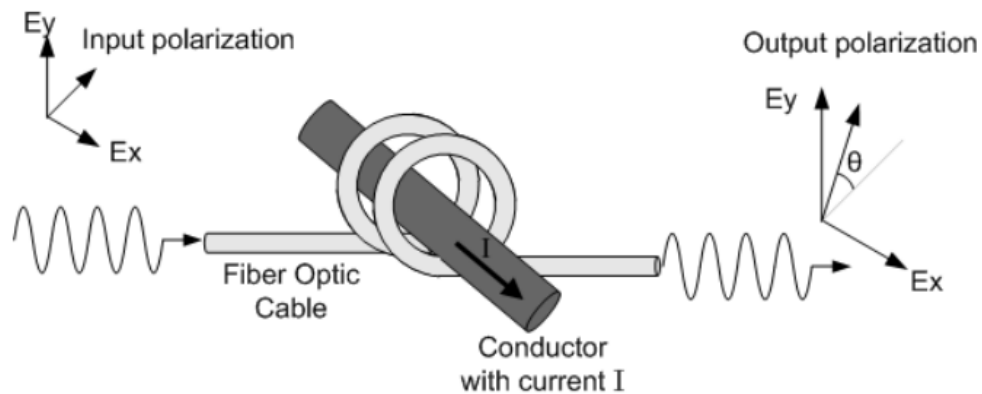


Рисунок - 2.3.2 - Эффект Фарадея [65]

Результирующие состояния света, E_{y1} и E_{x1} рассчитываются как комплексные числа. Результирующий сдвиг фазы между двумя волнами является углом между двумя комплексными числами, и он в четыре раза больше, чем одиночное вращение Фарадея θ [25], [28].

$$\varphi = \angle E_{y1} - \angle E_{x1} \quad (4.40)$$

Программа Matlab рассчитывает конечные состояния световых волн и находит окончательный сдвиг фазы между ними в соответствии с входным током. Эта программа интегрирована с Matlab Simulink и показана на рисунок - 2.3.3. Программа приведена в приложении Б.

Выход модели (сдвиг фазы в градусах) сравнивается с входным сигналом (ток в амперах). Результаты показывают, что выходной сигнал пропорционален входному сигналу тока и имеет те же характеристики. Рисунок - 2.3.4 показывает сравнение. Результаты показывают, что выходной сигнал представляет текущий сигнал с различной амплитудой. Сдвиг фазы нормализуется с помощью входного тока, чтобы правильно выполнить расчеты. Входной ток и нормализованный сдвиг фазы на выходе изображены вместе, и видно, что они перекрываются. По этой причине этот нормированный выход представляет входной сигнал, и его можно использовать в качестве входа для электроники системы. Поскольку трудно увидеть разницу между нормированным выходным сигналом и входным током, это не показано на рисунке.

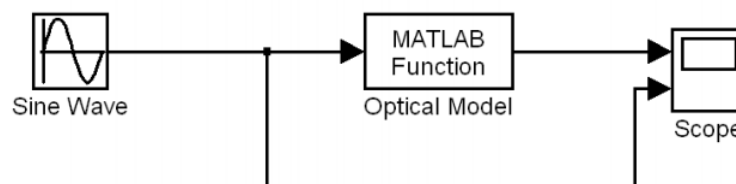


Рисунок - 2.3.3 - Matlab моделирование оптической модели

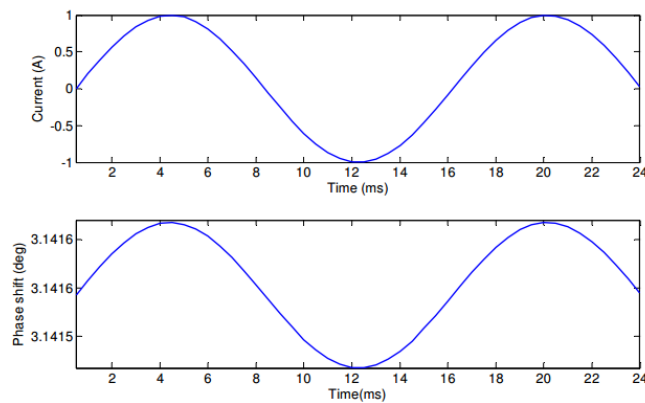


Рисунок - 2.3.4 - Окончательное изменение сдвига фазы по входному току

Частотные характеристики оптического трансформатора тока были получены и представлены ранее. Поскольку оптическая часть системы не зависит от частоты [29], полученные характеристики принадлежат электронике системы. Электроника включает в себя блок обработки сигнала, который обрабатывает информацию, поступающую от оптических частей, и генерирует выходной сигнал через схемы фильтра. Полученная частотная характеристика имеет аналогичную характеристику фильтра; следовательно, он используется для моделирования электроники системы. Оцененная ранее передаточная функция (которая может быть в s -области или z -области) представляет характеристики электроники и объединяется здесь с оптической моделью. На рисунок - 2.3.5 показана полная разработанная модель и ее реализация в схемотехническом моделировании. Ток в цепи измеряется через оптическую модель, и электроника генерирует выходной сигнал, который сравнивается с входным сигналом тока. Рисунок - 2.3.6 показывает сравнение. Результаты показывают, что оптическая модель трансформатора тока успешно воспроизводит входной ток.

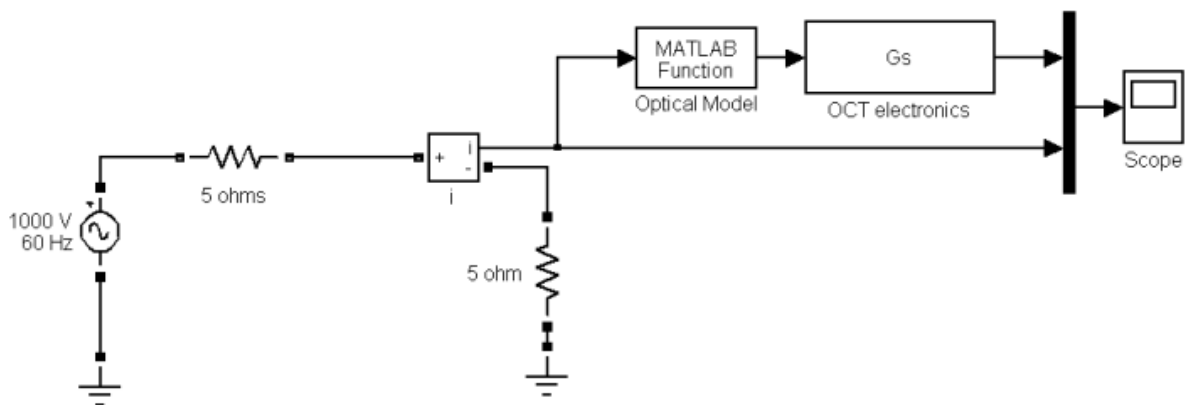


Рисунок - 2.3.6 - Полная модель и ее реализация

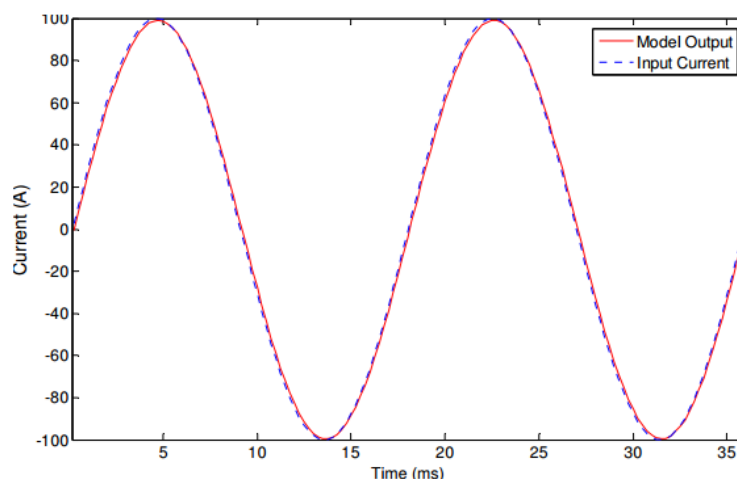


Рисунок - 2.3.7 - Сравнение входного тока и выходной модели

Полные характеристики частотной характеристики модели сравниваются с экспериментальными данными. Те же экспериментальные частоты применяются к модели, и получаются амплитудные и фазовые характеристики. На рисунок - 2.3.8 показано сравнение экспериментальных данных и полных результатов модели. Максимальная разница 0,88% рассчитывается по величине, а максимальная разница 2,41% - по фазе.

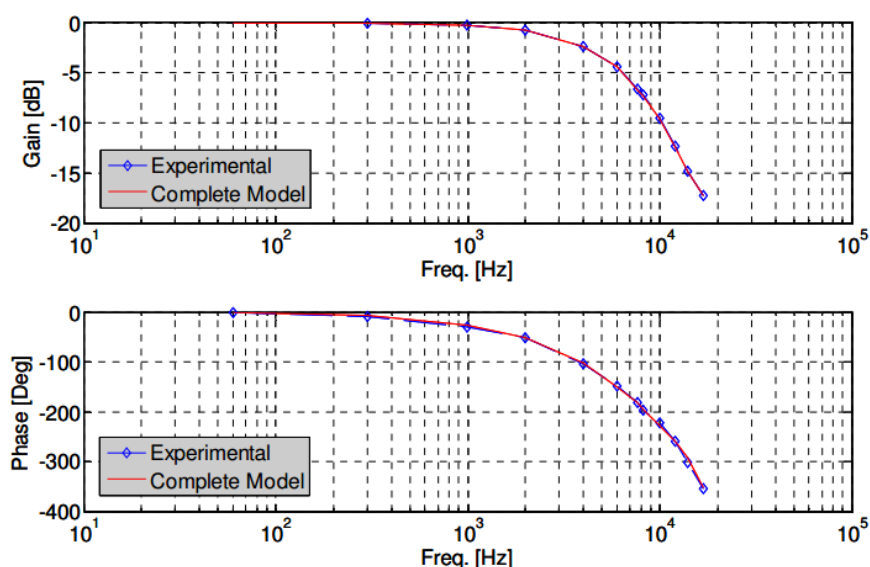


Рисунок - 2.3.8 - Сравнение частотных характеристик экспериментальных данных и полного вывода модели

3. Исследование режимов работы трансформаторов тока для цифровых подстанций

3.1 Имитация короткого замыкания

Реле устанавливается в режим защиты от перегрузки по току с использованием обратных характеристик МЭК с порогом 100 А или током срабатывания. Любое значение выше 100 А отключает реле, которое выдает сигнал тревоги. Рисунок - 3.1.1 показывает работу реле, когда ток короткого замыкания составляет только 101 А среднеквадратичное значение с высоким током смещения постоянного тока. Мгновенное значение тока повреждения выше 100 А, и в результате реле выдает сигнал тревоги и рассчитывает время задержки, которое значительно больше 60 циклов из-за обратных характеристик с задержкой по времени. На рисунке показано, что этот ток отключается генератором сильного тока после 60 циклов; следовательно, реле не выдает сигнал отключения. Однако реле регистрирует помехи, как показано на рисунок - 3.1.1. Запись включает текущий сигнал и сигнал отключения. На рисунке показан только текущий сигнал, но не сигнал отключения.

Тест повторяется с использованием того же тока; однако ток не отключается через 60 циклов, а поддерживается в течение примерно 10,5 секунд. Результаты показывают, что реле выдает сигнал отключения квадратной формы примерно через 10,1 секунды. Продолжительность сбоя составляет 10 540 мс, а длительность сигнала отключения - 1 687. Это делает время отключения около $10\,540 - 1687 = 8\,853$ мс = 8,8 с.

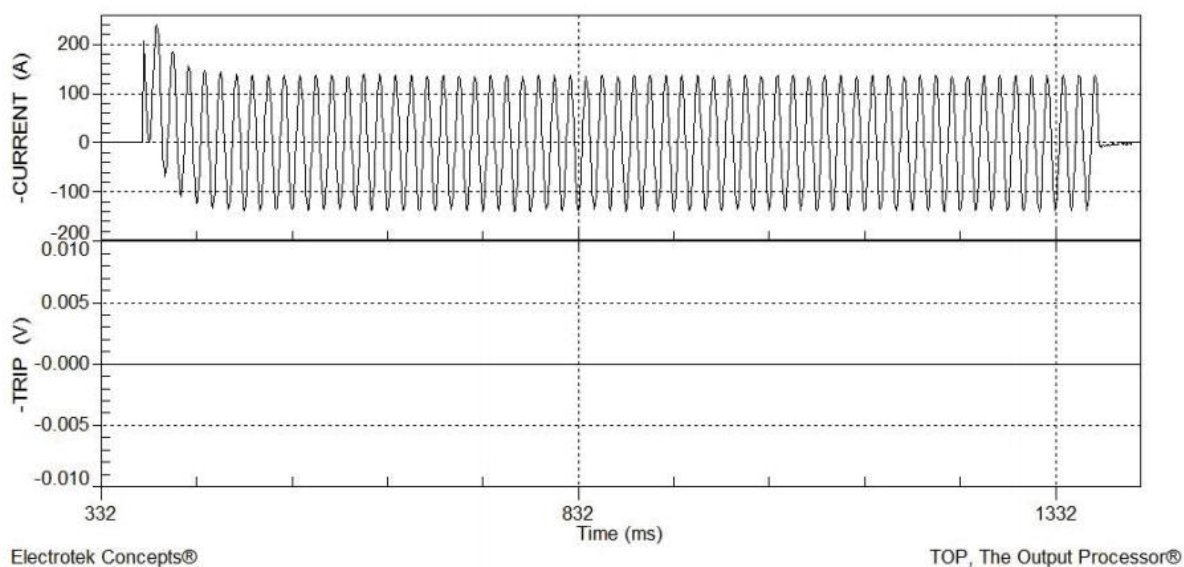


Рисунок - 3.1.1 - 100 А непрерывный ток

Применяемый ток короткого замыкания увеличивается до 500 А. Применяется в течение 60 циклов для отключения реле. Реле срабатывает через 95,7 мс после возникновения неисправности, что намного короче, чем время отключения неисправности 100 А. На Рисунок 3.1.2 показана релейная запись

тока повреждения и квадратная форма сигнала отключения. На рисунке показано, что реле срабатывает примерно после 6-го цикла повреждения и заканчивается, когда ток повреждения становится равным нулю. Это то же самое, что и при отключении 100 А.

Применяемый ток короткого замыкания увеличивается до 2200 А среднеквадратичных значений, что в 22 раза превышает пороговое значение тока 100 А. Реле срабатывает через очень короткое время после возникновения неисправности. Он срабатывает через 15,4 мс и в первом цикле сбоя.

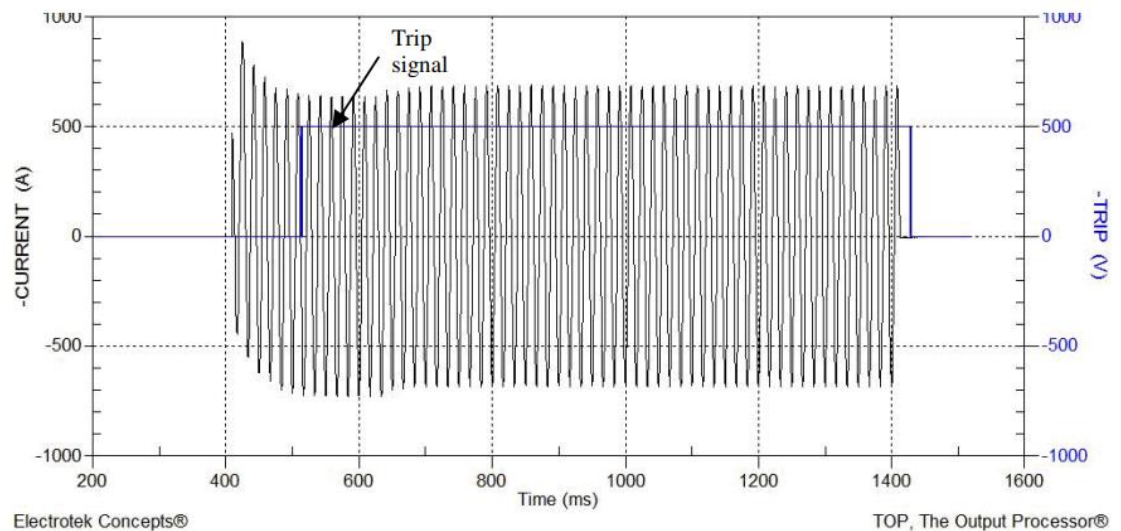


Рисунок - 3.1.2 - 500 А симуляция неисправностей

Та же методика и шаги, описанные выше, повторяются для четырех временных обратных характеристик. Для каждой характеристики время срабатывания реле записывается тремя способами: вычисление времени срабатывания с использованием записанных на компьютере синусоидальных данных, использование информации о неисправности на ЖК-дисплее реле и вычисление времени срабатывания с помощью уравнения.

Три рассчитанные кривые построены вместе, чтобы показать четыре характеристики; это показано на рисунок - 3.1.3, рисунок - 3.1.4, рисунок - 3.1.5 и рисунок - 3.1.6. Расчет времени отключения по зарегистрированной синусоиде практически идентичен показаниям реле. Однако расчет времени отключения с помощью существенно отличается от двух других кривых.

На рисунках ниже показано, что на кривых МЭК рассчитанные и записанные значения совпадают; однако на кривых обратной характеристики IEEE рассчитанные значения не соответствуют показаниям и записям реле.

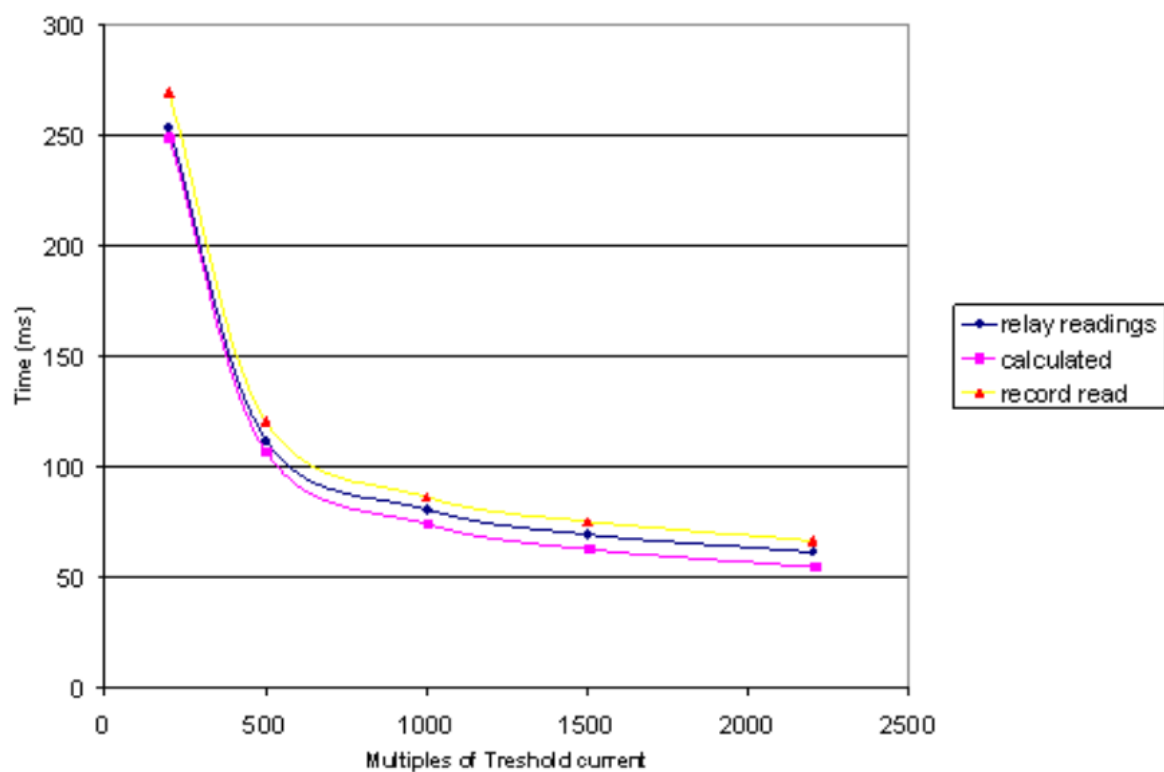


Рисунок - 3.1.3 - Первая обратная характеристика

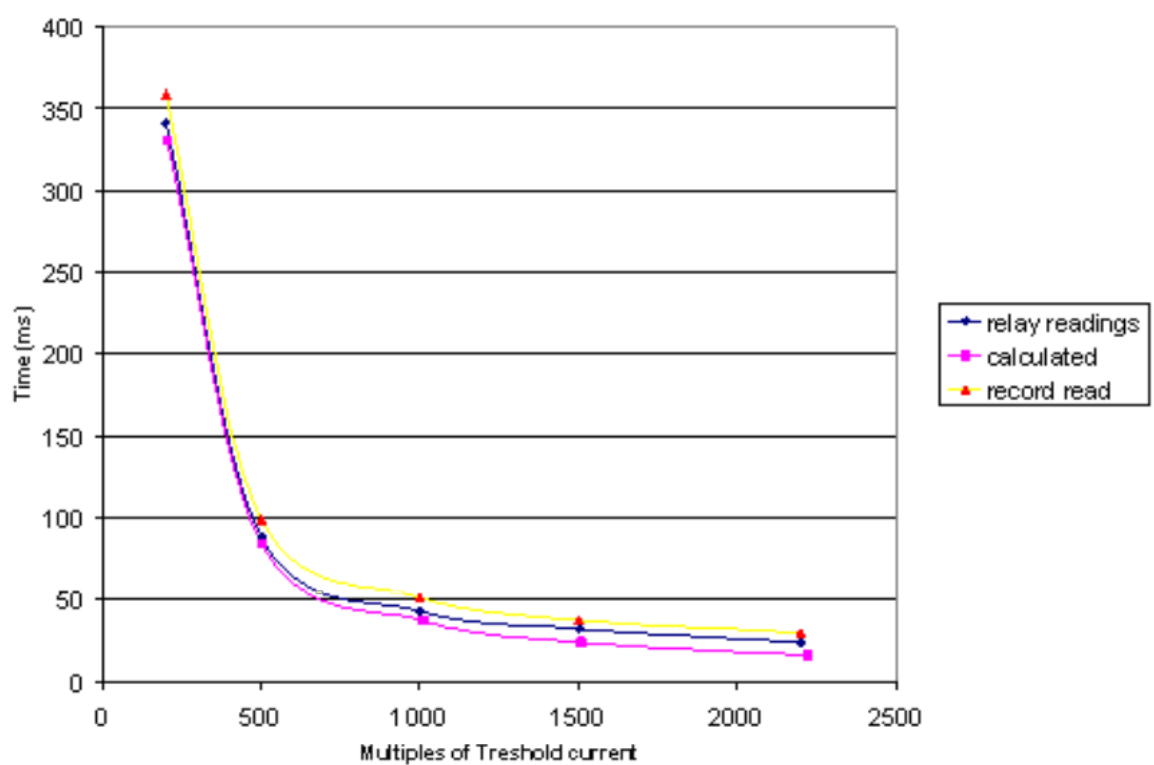


Рисунок - 3.1.4 - Вторая обратная характеристика

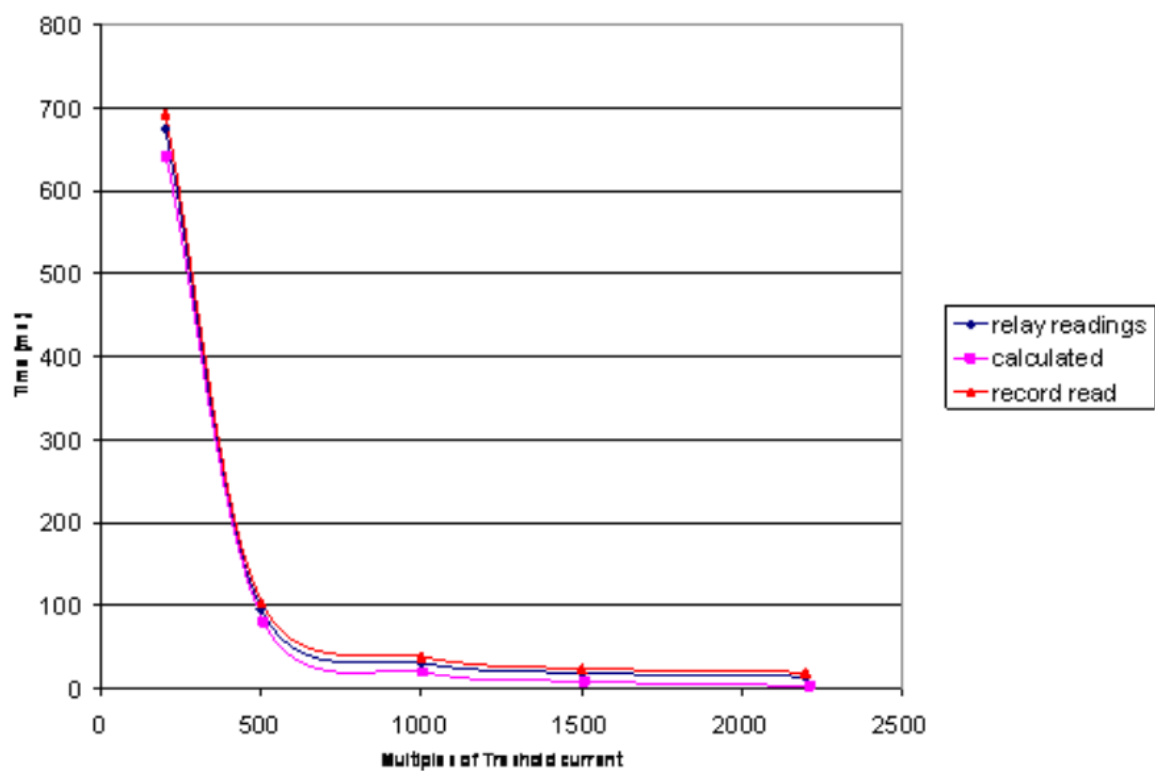


Рисунок - 3.1.5 - Третья обратная характеристика

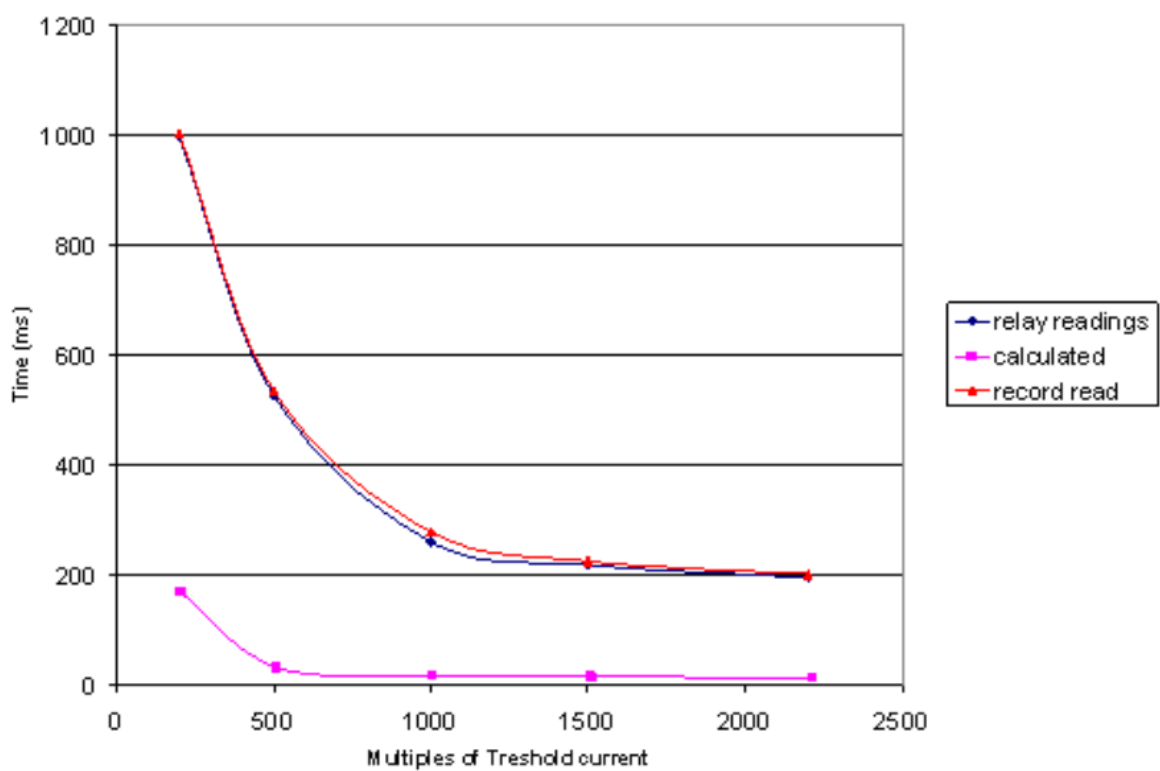


Рисунок - 3.1.6 - Четвёртая обратная характеристика

3.2 Моделирование тока нагрузки и тока короткого замыкания

Все эксперименты проводятся без тока нагрузки, чтобы убедиться, что ток нагрузки не влияет на работу реле. Новый тест выполняется с использованием тока нагрузки 60 А и тока повреждения 700 А со смещением постоянного тока. Реле настроено на 100 А порогового тока. Эксперимент проводится с использованием тестовой установки. Реле выдает аварийный сигнал, поскольку ток повреждения превышает пороговое значение и после определенной задержки генерирует сигнал отключения.

Помеха, записанная ретранслятором, загружается. Результаты показывают записанный синусоидальный ток и решение об отключении реле. Реле срабатывает в соответствии с характеристиками, описанными в предыдущих разделах. Тест показывает, что ток нагрузки не влияет на работу реле, если он меньше порогового значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы были успешно решены все поставленные задачи. В данной работе проведен сравнительный анализ различных типов датчиков тока, получивших наиболее широкое применение в промышленности. Рассмотрено применение датчиков тока на все классы напряжения. Описаны достоинства и недостатки современных датчиков тока.

Рассмотрены и проанализированы состояния измерения тока в цифровых подстанциях, разработаны модели трансформаторов тока для цифровых подстанций в программе MatLab, исследованы режимы работы трансформаторов тока для цифровых подстанций.

Все результаты анализа состояния измерения тока в подстанции доложены и обсуждены на международной конференции «Сатпаевские чтения 2020».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Стандарт МЭК 61850
- 2 <https://digitrans.ru/ctt/> цифровые измерительные трансформаторы
- 3 http://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/elegazovye-transformatory-toka-serii-togf-110-220-330-500/togf-110-togf-220 182113, г. Великие Луки, Псковская область, пр-т Октябрьский, 79, ЗАО «ЗЭТО».
- 4 catalog “Smart Digital Optic OCT. DIGITAL MEASUREMENT TECHNOLOGY”
- 5 Donald G. Fink, H. Wayne Beatty (ed), Standard Handbook for Electrical Engineers, Eleventh Edition, Mc-Graw Hill, 1978, 0-07-020974-X, pp. 10-51 - 10-57
- 6 John G. Webster, Halit Eren (ed.), Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement, CRC Press, 2014, [ISBN 1-439-84891-2](#), pp. 16-6 to 16-7.
- 7^ Jump up to: ^a ^b ^c Klaus Schon, High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques: Fundamentals – Measuring Instruments – Measuring Methods, Springer Science & Business Media, 2013, [ISBN 3-319-00378-X](#), p. 193.
- 8 J. Y. Wang, Z. Z. Guo, and H. B. Li, “Structure optimization of optical current transformer with magnetic concentrator ring,” Electric Power Automation Equipment. Nanjing, vol. 31, pp. 23–26, Sept 2011.
- 9 H. L. Guan, Q. F Shang, and Y. H. Yang, “Ferromagnetic ring concentrator sensor head of hybrid optical current transformer,” Electric Power Automation Equipment. Nanjin, vol.25, pp. 30–32, Feb 2005.
- 10 H. Katsukawa, H. Ishikawa, H. Okajima, T. W. Cease, “Development of an optical current transducer with a bulk type faraday sensor for metering,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, pp. 702–707, April 1996.
- 11 J. Blake, W. Williams, C. Glasow, R. Bergh, K. Fetting, E. Hadley, G. Sanders, “Optical current transducers for high voltage applications,” Intelligent Processing and Manufacturing of Materials 3rd International Conference, Vancouver, July 29, 2001.
- 12 Chiang, Kin Seng; Kancheti, R.; Rastogi, V.: Temperature-compensated fiber-Bragg-grating-based magnetostrictive sensor for dc and ac currents. In: Optical Engineering, Vol. 42 (2003), S. 1906-1909, 2003
- 13 Deeter, M.N.; Day, G.W.: Magneto-Optic Magnetic Field Sensors Based on Uniaxial Iron Garnet Films in Optical Waveguide Geometry. In: IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29 (1993), No. 6, S. 3402- 3404, 1993
- 15 Cruden, A.; Richardson, Z.J.; McDonald, J.R.; Andonovic, I.: Optical crystal based devices for current and voltoge measurement. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10 (1995), No. 3, S. 1217-1223, 1995
- 16 Itoh, Nobuki; Minemoto, H.; Ishiko, D.; Ishizuka, S.: Small optical magnetic-field sensor that uses rare-earth iron garnet films based on the Faraday effect. In: Applied Optics, Vol. 38 (1999), No. 10, April 1999
- 17 Dennison, Eric: Magnet formulas Web site www.netdenizen.com/emagnet/solenoids/solenoidonaxis.htm, 2005

- 18 M. Wu, X. Cui, "Wide frequency model for transfer function of potential transformer in substation," in Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003, pp. 327-330.
- 19 J. D. Greene, C. A. Gross, "Nonlinear modeling of transformers," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 24, May 1988, pp. 434-438.
- 20 User's Guide Version 7 on Signal Processing Toolbox Matlab.
- 21 E.C. Levi, "Complex-Curve Fitting," IRE Trans. on Automatic Control, vol.AC-4, 1959, pp.37-44. 123
- 22 X. Zhang, G. Liang, Q. Xie, H. Sun, "Modeling of the transfer function windings under VFT based on transfer function," in Proc. IEEE Power System Technology, 2006, pp.1-4.
- 23 Series and Parallel Transfer Functions, available at: http://ccrma.stanford.edu/~jos/fp/Series_Parallel_Transfer_Functions.html
- 24 Digital filter realizations, lecture notes, available at: http://www.kemt.fei.tuke.sk/Predmety/KEMT421_DF/_materialy/Lectures/df_lesson_08.pdf
- 25 S. Zhou, X. Zhang, "Simulation of linear birefringe reduction in fiber-optical current sensor," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, October 2007, pp. 1568-1570.
- 26 W. Zhengping, K.Chong, H. Zongjun, Z. Xueyuan, "Faraday mirror-typed optical current transformers and its theoretical analysis," Trans. Optics&Laser Technology, vol. 39, , March 2007, pp. 368-371.
- 27 T. Bosselmann, "Electric and magnetic field sensing for high voltage applications," in Proc. SPIE, 1997, pp. 305-316.
- 28 J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, "In-line sagnac interferometer current sensor," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, January 1996, pp. 116-121.
- 29 M. Berwick, J. D. C. Jones, D. A. Jackson, "Alternating-current measurement and noninvasive data ring utilizing the Faraday effect in a closed-loop fiber magnetometer," Optics Letters, vol. 12, April 1987, pp. 293-295.

Приложение А

Разработка оптической модели оптического трансформатора тока.

```

##### Transfer function model development #####
clear
clc
##### Experimental values #####
%Hz %Magnitude %Phase
Bode = [
60 1 -0.86
300 0.992074 -7.78
1000 0.971343 -29.2118
2000 0.924321 -52.42
4000 0.763616 -104.54
6000 0.601726 -149.47
7670 0.466982 -181.13
8200 0.435284 -197.05
10000 0.335722 -223.20
12000 0.242624 -259.78
14000 0.181836 -301.54
16800 0.137844 -353.95 ];
w = (2*pi)*Bode(:,1); %rad/sec
mag = Bode(:,2);
phase = Bode(:,3)*(pi/180);
H = mag .* exp(j*phase);
[b,a] = invfreqs(H,w,3,5,[],50,0.001); % TF coefficients
Gs=tf(b,a) %developeped TF
figure
bode(Gs)
#####Bode plot comparison of develeoped TF and exp measurements
#####
% Experimental frequencies applied to TF
Freq=[377;1885;6283;1.257*10^4;2.513*10^4;3.77*10^4;4.819*10^4;5.
152*10^4;6.283*10^4;7.54*10^4;8.796*10^4;1.056*10^5];
[mag,phase] = bode(Gs,Freq);
mag = mag(:); phase = phase(:);
% Experimental valeues in db and degree
Mag_Exp_dB=[0;-0.06912;-0.2525;-0.6835;-2.342;-4.412;-6.614;-
7.225;-9.48;-12.3;-14.81;-17.21];
Phase_Exp_deg=[-0.86;-7.78;-29.2118;-52.42;-104.54;-149.47;-
181.13;-197.05;-223.2;-259.78;-301.54;-353.95];
FreqExp=Freq*60/377; %Convert to Hz
Mag_Model_dB=db(mag);
Phase_Model_deg=phase-720;
127
FreqModel=Freq*60/377; %Convert to Hz
% Comparison plot
figure
subplot(2,1,1)
set(gca,'FontSize',16)
semilogx(FreqExp, Mag_Exp_dB,'--d',FreqModel, Mag_Model_dB,
'r')
ylabel('Gain [dB]'); xlabel('Freq. [Hz]');grid on
Caxes = copyobj(gca,gcf);
set(Caxes, 'color', 'none', 'xcolor', 'k', 'xgrid', 'off', 'ycolor', '
k', 'ygrid', 'off');
subplot(2,1,2)
set(gca,'FontSize',16)
semilogx(FreqExp,Phase_Exp_deg,'--d',FreqModel,
Phase_Model_deg,'r')
ylabel('Phase [Deg]'); xlabel('Freq. [Hz]'); grid on
Caxes = copyobj(gca,gcf);

```

```

set(Caxes, 'color', 'none', 'xcolor', 'k', 'xgrid', 'off', 'ycolor', 'k', 'ygrid', 'off');
%%% difference ( errors) %%%%
M_dif=Mag_Model_dB-Mag_Exp_dB;
P_dif=Phase_Model_deg-Phase_Exp_deg;
% percentage
M_dif_error= 100*max(M_dif)/min(Mag_Exp_dB)
P_dif_error= 100*max(P_dif)/min(Phase_Exp_deg)
% error plot %%
figure
subplot(2,1,1)
set(gca, 'FontSize', 16)
semilogx(Freq, M_dif, 'r')
ylabel('Gain dB'); xlabel('Freq. [rad/sec]'); %grid
subplot(2,1,2)
set(gca, 'FontSize', 16)
semilogx(Freq, P_dif, 'r' )
ylabel('Phase [Deg]'); xlabel('Freq. [rad/sec]'); %grid
%%%%%%%% circuit parameters %%%%%%%%%
[r,p,k]=residue(b,a) % residues and poles
128
figure
pzmap(Gs)
c1r=real(r(1,:)); c1im=imag(r(1,:));
c2r=real(r(2,:)); c2im=imag(r(2,:));
c3r=real(r(3,:)); c3im=imag(r(3,:));
c4r=real(r(4,:)); c4im=imag(r(4,:));
c5r=real(r(5,:)); c5im=imag(r(5,:));
p1r=-real(p(1,:)); p1im=-imag(p(1,:));
p2r=-real(p(2,:)); p2im=-imag(p(2,:));
p3r=-real(p(3,:)); p3im=-imag(p(3,:));
p4r=-real(p(4,:)); p4im=-imag(p(4,:));
p5r=-real(p(5,:)); p5im=-imag(p(5,:));
% Circuit elements calculation
H11=2*((c2r*p2r-p1im*c2im)/(p2r^2+p2im^2))
L11=1/(2*p2r)
C11=(2*p2r)/(p2r^2+p1im^2)
H11_2=(c2r)/(p2r)
H22=2*(c4r*p4r-p3im*c4im)/(p4r^2+p4im^2)
L22=1/(2*p4r)
C22=(2*p4r)/(p4r^2+p3im^2)
H22_2=c4r/p4r
H33=c5r/p5r
L33=1/p5r
H44=k
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% transfer function check %%%
[r,p,k]=residue(b,a)
TF1=tf(r(1,:),[1 -p(1,:)])
TF2=tf(r(2,:),[1 -p(2,:)])
TF3=tf(r(3,:),[1 -p(3,:)])
TF4=tf(r(4,:),[1 -p(4,:)])
TF5=tf(r(5,:),[1 -p(5,:)])
TFF=TF1+TF2+TF3+TF4+TF5
TF12=TF1+TF2
TF34=TF3+TF4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Results
% Comparison Pspice
129
% frequency response circuit model
OCTmodeldata = xlsread('OCT_model_ospice.xls');
octMfreq=OCTmodeldata(:,1);
octMfreq=octMfreq(1:246);
octMamp=OCTmodeldata(:,2);

```

```

octMamp=octMamp(1:246);
octMphase=OCTModeldata(:,3);
octMphase=octMphase(1:246);
%%BODE PLOT COMPARISON exp, transfer function, circuit model
%%
figure
subplot(2,1,1)
set(gca,'FontSize',16)
semilogx(FreqExp, Mag_Exp_dB, '--d',...
FreqModel, Mag_Model_dB, '-.r',...
octMfreq, octMamp, '-k')%,octMfreq_Cad, oct-
Mamp_Cad, 'g')
ylabel('Gain [dB]'); xlabel('Freq. [Hz]');grid on
legend
subplot(2,1,2)
set(gca,'FontSize',16)
semilogx(FreqExp, Phase_Exp_deg, '--d',...
FreqModel, Phase_Model_deg, '-.r',...
octMfreq, octMphase, '-k') %,octMfreq_Cad,
octMphase_Cad, 'g' )
ylabel('Phase [Deg]'); xlabel('Freq. [Hz]'); grid
%Errors: exp is base
%TF
TFamp_diff=Mag_Model_dB-Mag_Exp_dB;
TFphase_diff=Phase_Model_deg-Phase_Exp_deg;
TFamp_error= 100*max(TFamp_diff)/min(Mag_Exp_dB)
TFphase_error=100*max(TFphase_diff)/min(Phase_Exp_deg)
%Circuit
Cramp_diff=-1.273-(-1.52);%manuel found. exp avarge of two
points taken
130
Crphase_diff=-76.57-(-79.14);%manuel found. exp avarge of two
points taken
Cramp_error= 100*min(Cramp_diff)/min(Mag_Exp_dB)
Crphase_error=100*min(Crphase_diff)/min(Phase_Exp_deg)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%% test signal comparison %%%%%
%%%%% Load data%%%%%%%%
%Sampling time 1.00E-05
%exp
input=load('OCTSTEPinput.txt');
output=load('OCTSTEPoutput.txt');
time_exp=load('time_exp_oct.txt');
time_exp=time_exp*10^-5;
%circuit model
circuitout=xlsread('OCTstepCircuitoutput.xls');
time_cr=circuitout(:,1);
crouT=circuitout(:,2);
%TF out
Gz=c2d(Gs,0.00001,'tustin')
TFMoutput= lsim(Gz,input);
%Comparison
figure
plot(time_exp,TFMoutput)
hold on
plot(time_exp,output,'m')
plot(time_cr,crouT,'--k')
%% Error based on exp signal
% considering crouT=TFMoutput. because crouT has more number than
the
% others we can not subtract them since the matrix dimensions
are not
% equal.

```

```
errorModels=output-TFMoutput;  
errorModels=100*max(errorModels)/max(output)  
%%% END %%%
```

Приложение Б

Разработка оптической модели оптического трансформатора тока.

```
function P = opModelct(I)
%Jones vector
Ex=[1 0]'; % x polarized light
Ey=[0 1]'; % y polarized light
%Faraday rotation angle
V=4.68*10^-6; % Verdet constant of fiber optic cable [rad/A]
N=2; % number of fiber optic cable turns around conductor
Theta=1/2*4*V*N*I; % rotation angle
%Jones matrices
Mq_f=1/sqrt(2)*[1 -i;-i 1]*exp(i*pi/2); % Forward quarter wave
plate
Mcoil_f=[cos(Theta) -sin(Theta);...
sin(Theta) cos(Theta)]; % Forward Faraday rotator
Mm=[-1 0;...
0 1]; % Mirror
Mcoil_b=[cos(Theta) sin(Theta);...
-sin(Theta) cos(Theta)]; % Back Faraday rotator
Mq_b=1/sqrt(2)*[1 i;i 1]*exp(i*pi/2); % Back quarter wave plate
Mp_y=[0 1]; % Linear polarizer, y
Mp_x=[1 0]; % Linear polarizer, x
%Final states of lights
Eyy=Mp_y*Mq_b*Mcoil_b*Mm*Mcoil_f*Mq_f*Ex; % Final state of x polarized
light
Exx=Mp_x*Mq_b*Mcoil_b*Mm*Mcoil_f*Mq_f*Ey; % Final state of y polarized
light
P1=angle(Eyy)-angle(Exx); %angle between the two final states of
the lights
P=(I/P1)*1/0.3183; %Normalization (0.3183 is the maximum of P1)
end
```