

Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Гумарбека
Даукеева

УДК 621.318.43-047.37(043.3)

На правах рукописи

МУРАТ АЙБЕК ҚАЙРАТУЛЫ

**Разработка и исследование управляемых реакторов
трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током**

6D071800 - Электроэнергетика

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научные консультанты:

Кандидат технических наук,
Ассоциированный профессор Әмитов Е.Т.

Доктор технических наук,
профессор Долгополов А.Г.

Республика Казахстан
Алматы, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	12
1.1 Состояние вопроса по разработке УШР.....	13
1.2 Принцип действия и особенности конструкции управляемых реакторов трансформаторного типа подмагничиванием постоянным током. .	16
1.3 Описание режима полупериодного насыщения и его использование в трехстержневой конструкции.....	19
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ.....	24
2.1 Описание физических моделей УШР и специализированного стенда для комплексных электротехнических исследований	24
2.2 Электромагнитные параметры модели в режиме холостого хода	26
2.3 Электромагнитные параметры модели в режимах подмагничивания	30
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ.....	37
3.1 Описание математической модели в программном комплексе Matlab Simulink	37
3.2 Проверка полученных результатов моделирования работы трехфазного УШР в Matlab Simulink с экспериментальными исследованиями.	44
3.3 Выводы и анализ результатов моделирования	51
4 УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕАКТОР С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ (УШР) НА ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ МАГНИТОПРОВОДАХ	54
4.1 Расчет основных параметров реактора.....	54
4.2 Расчет оптимального соотношения сечения ярем и стержней.....	58
4.3 Моделирование УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр..	62
4.4 Изменение индукции переменного магнитного потока B_1 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.	66
4.5 Изменение индукции постоянного магнитного потока B_2 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.	70
4.6 Изменение сечений стержней и ярем при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.....	74

4.7	Изменение высоты стержней при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.....	84
4.8	Улучшение характеристик быстродействия УШР	88
5	РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	93
5.1	Расчет основных параметров реактора	93
5.2	Количество витков обмоток и сечение проводников.....	94
5.3	Расчет изоляции.....	96
5.4	Геометрические размеры обмоток.....	98
6	ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЁХСТЕРЖНЕВОГО УШР	103
6.1	Постановка задачи оптимизации.....	103
6.2	Двухэтапный алгоритм оптимизации	104
6.3	Инвариантность THD_min к геометрии магнитопровода.....	105
6.6	Параметры оптимальной конструкции УШР	111
6.7	Сравнительный анализ трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций	112
6.7.1	Методологическое обоснование сравнения.	112
6.7.2	Конструктивные варианты четырёхстержневой схемы.	112
6.7.3	Результаты сравнения.	112
6.7.4	Анализ причин различий.....	113
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	115
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	118
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	123
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	125
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	131
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	134
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е	205
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	209

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

НЭС Казахстана - Национальные электрические сети Казахстана;

ЕЭС РК - Единая электроэнергетическая система Республики Казахстан;

тнэ/тыс.долл. - тонн нефтяного эквивалента/тыс. долл. США;

СВН - Линии электропередач сверхвысокого напряжения;

СН - собственные нужды;

FACTS (flexible alternating current transmission system) - Гибкая система передачи переменного тока;

УШР - управляемые подмагничиванием постоянным током шунтирующие реакторы;

УШРТ - реакторы трансформаторного типа, управляемые путем коммутации магнитного потока;

РПН – регулирование под нагрузкой;

АО «КазНИПИИТЭС «Энергия» – АО «Казахстанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт топливно-энергетических систем «Энергия».

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический сектор Казахстана, как и его развитие, играет важную роль в обеспечении энергетической безопасности и имеет стратегическое значение для развития Казахстана. В своем послании народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» от 1 сентября 2023 года Президент РК Касым-Жомарт Токаев определил цели по развитию сектора электроэнергетики. Необходимо повысить эффективность функционирования ЕЭС РК с обеспечением надежности и экологичности. Одной из задач является снижение ключевых показателей энергоёмкости и энергопотребления на 15% [1].

Важнейшим параметром, определяющим энергетическую эффективность национальной экономики, является энергоёмкость ВВП. Показатели национальной экономики РК указывают на кратное превышение удельной энергоёмкости ВВП страны над аналогичным показателем развитых стран. Согласно концепции по переходу к «зелёной экономике» Правительству необходимо снизить показатели энергоёмкости ВВП РК не менее чем в два раза к 2050 году (от уровня 2008 года – 0,41 тнэ/тыс.долл. США в ценах 2015 г.). Энергоёмкость ВВП в 2022 году составила 0,32 тнэ/тыс.долл. США в ценах 2015 г. и по сравнению с 2008 годом снизилась на 21,95 %, что указывает на необходимость дальнейшей работы в данном направлении [2].

Для обеспечения надежности функционирования и устойчивого развития энергетического комплекса, Правительством РК утвержден «Прогнозный баланс электрической энергии ЕЭС Казахстана до 2035 года». Согласно данным прогнозного баланса объемы выработки электроэнергии необходимо увеличить к 2035 году до 152,9 млрд кВт/ч в год [3]. Задачу увеличения производственных мощностей по выработке электроэнергии планируется решить путем восстановления имеющихся и строительства новых станций (ввод мощностей на Экибастузской ГРЭС-1 (500 МВт), Топарской ГРЭС (130 МВт), Атырауской ТЭЦ (65 МВт), АЭС (2,4 ГВт), 11 станций ВИЭ общей генерируемой мощностью 259 МВт).

Реализуются проекты сетевого инфраструктурного строительства - присоединение электрических сетей Западного Казахстана к ЕЭС РК (исполнение проекта позволит использовать мощности газовых станций Западного Казахстана в энергетическом балансе и повысить энергобезопасность страны), усиление электрической сети Южной зоны ЕЭС Казахстана (строительство ВЛ 500 кВ Шу - Жамбыл – Шымкент).

Таким образом, для форсированного развития экономики РК и стимулирования продуктивных инноваций требуется обеспечение надежности работы энергетической системы и оптимизации потерь.

Выполнение задачи по обеспечению нормальных режимов работы электроэнергетической системы и стандартов качества электрической энергии невозможно без управляемых средств регулирования реактивной мощности и напряжения. Кроме того, поддержание оптимальных уровней напряжения на

шинах подстанций обеспечивает минимизацию потерь активной мощности в электрических сетях и тем самым повышает эффективность функционирования электрических сетей. Неотъемлемыми элементами электропередач нового поколения являются устройства FACTS [4].

Одним из устройств FACTS, выполняющих регулирование реактивной мощности является шунтирующий реактор (ШР). Основное свойство ШР поглощение зарядной мощности, образуемой в линиях электропередач за счет емкостной составляющей. Из всей линейки устройств регулирования реактивной мощности ШР выделяет относительная дешевизна и простота конструкции и эксплуатации. ШР могут быть управляемые и неуправляемые.

Вопрос ограничения избыточной реактивной мощности стоит как в протяженных межсистемных линиях, так и в городских электрических сетях высокого напряжения, которые зачастую являются сложнзамкнутыми. Вместе с развитием городов и ускоряющейся урбанизацией, увеличивается и количество заменяемых ВЛ на КЛ. Несмотря на все преимущества кабельных линий, они образуют больше реактивной мощности, чем воздушные линии, что еще больше повышает значимость шунтирующих реакторов для передачи электроэнергии в сети. Емкостная проводимость кабельных линий больше, чем у воздушных линий того же класса напряжения. К примеру, зарядная мощность кабельной линии номинальным напряжением 110 кВ составляет 8,4-18,0 МВАр на 100 км, а для воздушной линии того же номинала напряжения это значение составляет 3,4 – 4,0 МВАр на 100 км. Приведенные рассуждения свидетельствуют о необходимости использования компенсирующих устройств.

Показательным примером является электрическая сеть АО «Алатау Жарык Компаниясы» (АЖК) — крупнейшей региональной электросетевой компании Алматы и Алматинской области. В её составе насчитывается 47,45 км кабельных линий 220 кВ и 206,36 км кабельных линий 110 кВ, образующих кольцевую сеть города. Суммарная зарядная мощность кабельных линий 220 кВ составляет порядка 50–240 МВАр в зависимости от типа кабеля — величина, требующая постоянной управляемой компенсации во избежание недопустимых перенапряжений в периоды суток с малой нагрузкой. Потребность в УШР в сетях 110 и 220 кВ подтверждается планами развития АО «АЖК» по расширению кабельной инфраструктуры города.

Несмотря на высокую потребность, в электрических сетях 35 – 500 кВ РК, средств регулирования реактивной мощности и соответственно напряжения, их производство до сих пор не реализовано на предприятиях нашей страны. Поставка выполняется из стран ближнего и дальнего зарубежья, таких как – РФ, Испания, Италия, Украина и .т.д. Стоимость закупки, которая включается в себя помимо производства - транспортировку, чаще всего оказывается завышенной.

В соответствии с «Программой развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств», можно и необходимо наладить производство управляемых шунтирующих реакторов [5]. Потребность в управляемых шунтирующих реакторах внутри страны тем самым будет

обеспечена. В перспективе поставки реакторов в страны ближнего и дальнего зарубежья, будут являться неотъемлемой частью отрасли трансформаторостроения РК.

Производство управляемых шунтирующих реакторов нового поколения можно при приемлемых затратах наладить на трансформаторных заводах группы АО «Alageum Electric», поскольку производство таких реакторов полностью соответствует технологии трансформаторостроения. Для страны это имеет важное значение в связи с завершением строительства в г. Шымкент трансформаторного завода на классы напряжения 500 кВ (АО «Asia Trafo») и перспективным развитием АО «Кентауский трансформаторный завод», который выпускает трансформаторы на классы напряжения 110 кВ. Преимущество локализации производства обеспечит значительное удешевление продукта.

Концепция трёхстержневого реактора трансформаторного типа с управлением постоянным током не является принципиально новой. В 80-х годах прошлого столетия, впервые в СССР, два реактора такого типа были введены в эксплуатацию на подстанции «Таксимо» Западного участка электроснабжения БАМа ПЭО «Бурятэнерго». Реакторы были изготовлены на базе силовых трансформаторов мощностью 6,3 МВА напряжением 35 кВ производства Чирчикского трансформаторного завода путём реконструкции на предприятии «Южказэнергоремонт» в г. Алма-Ате. Однако принципиальным недостатком этих реакторов являлся высокий уровень высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки. В настоящей работе данный недостаток устраняется путём обеспечения режима полупериодного насыщения.

Освоение производства трёхстержневого УШР с режимом полупериодного насыщения требует решения ряда нерешённых научных задач. Трёхстержневая конструкция — технологически совместимая с производством силовых трансформаторов — исследована значительно меньше четырёхстержневой. Зависимости электромагнитных характеристик трёхстержневого УШР от геометрических параметров магнитопровода в научной литературе не установлены; не разработаны методы оптимизации конструкции по критерию минимума стоимости активных материалов при обеспечении номинального режима работы; сравнение трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций при одинаковых электромагнитных характеристиках в открытой литературе не выполнялось.

Таким образом, актуальность настоящей диссертационной работы определяется необходимостью установления взаимосвязи электромагнитных характеристик трёхстержневого УШР и конструктивных параметров магнитопровода, обеспечивающих режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока, и разработки метода оптимизации конструкции по критерию минимума стоимости активных материалов — как научной основы для организации отечественного производства.

Практическая значимость.

Результаты работы обеспечивают научную базу для разработки

технической документации на изготовление опытно-промышленного образца УШР 110 кВ, 25 МВАр на предприятиях АО «Asia Trafo» и АО «Кентауский трансформаторный завод». Установленные закономерности позволяют без итерационных расчётов оценивать смещение номинального режима реактора при изменении геометрических параметров магнитопровода, что существенно сокращает трудоёмкость проектирования. Потребителями результатов являются АО «KEGOC», АО «АЖК» и региональные электросетевые компании Республики Казахстан.

Отечественное производство управляемых шунтирующих реакторов увеличит Казахстанское наполнение в решении задач построения интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей и систем путем оптимизации режимов НЭС Казахстана и региональных электрических сетей.

Перечисленные факторы четко коррелируют с задачами поставленными главой государства и программами стратегического развития страны. Сложившаяся привлекательность и, что немаловажно, рентабельность решений по установке шунтирующих реакторов в электрические сети с одной стороны, и продолжающийся рост спроса на экономичные, надежные и вместе с тем «доступные» устройства регулирования реактивной мощности на базе шунтирующих реакторов, с другой стороны, подтверждают актуальность проводимого исследования по разработке управляемых шунтирующих реакторов.

Представленная диссертационная работа выполнялась на базе комплекса научно-исследовательских аналитических и экспериментальных работ, с выполнением экспериментов на производственной базе АО «КазНИПИИТЭС «Энергия» и Некоммерческого АО «АУЭС им. Ф. Даукеева».

Указанные предпосылки формируют **цель диссертационного исследования**, которая сформулирована следующим образом:

Повышение эффективности компенсации реактивной мощности в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения путём разработки трёхстержневого управляемого шунтирующего реактора с оптимальными конструктивными параметрами на основе установления взаимосвязи конструктивных и режимных параметров магнитопровода, обеспечивающих режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки.

В рамках выполнения диссертационной работы для достижения поставленной цели выполнялись следующие **научные задачи**:

- Провести анализ существующих методов компенсации реактивной мощности, конструкций УШР и современных исследований в данной области; сформулировать нерешённые научные задачи.

- Разработать физическую модель трёхстержневого УШР и экспериментально исследовать его электромагнитные характеристики при различных режимах подмагничивания постоянным током.

- Разработать верифицированную имитационную модель трёхстержневого УШР в программном комплексе Matlab Simulink.

– Исследовать влияние конструктивных параметров магнитопровода (сечения S и длины L_s рабочих стержней) на ток сетевой обмотки и коэффициент гармонических искажений; установить закономерности их влияния.

– Разработать методику оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР по критерию минимума стоимости активных материалов при обеспечении номинального режима и верифицировать её на примере реактора 110 кВ, 25 МВАр.

– На основе результатов оптимизации трёхстержневой конструкции выявить эквивалентную по электромагнитным характеристикам четырёхстержневую конструкцию и выполнить их количественное технико-экономическое сравнение.

– Исследовать динамические режимы УШР 110 кВ и определить метод повышения быстродействия без изменения конструкции реактора.

Методы исследования.

В работе использованы методы теоретической электротехники; физического и имитационного моделирования; гармонического анализа; планирования вычислительного эксперимента; суррогатного моделирования на основе Gaussian Process регрессии; Байесовской оптимизации с критерием Expected Improvement; технико-экономического анализа.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1 Разработана имитационная модель УШР на основе результатов экспериментальных исследований в программном комплексе Matlab Simulink. Предложена методика моделирования УШР.

2 Установлена взаимосвязь конструктивных и режимных параметров трёхстержневого УШР с подмагничиванием постоянным током, позволившая обеспечить режим полупериодного насыщения с минимальным уровнем высших гармонических составляющих тока сетевой обмотки.

3 2. Впервые установлена инвариантность минимального коэффициента гармонических составляющих тока сетевой обмотки, которая находится в допустимых пределах ГОСТ, к геометрическим параметрам магнитопровода трёхстержневого УШР.

4 Разработан двухэтапный метод оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР: полный перебор по равномерной сетке с аппроксимацией параболой и Байесовская оптимизация с суррогатной моделью Gaussian Process. Применение метода позволило определить конструкцию с оптимальными параметрами и подтвердить её глобальный характер.

5 На основе доказанной инвариантности минимального коэффициента гармонических составляющих тока сетевой обмотки впервые выполнено количественное сравнение трёхстержневой и четырёхстержневой броневого конструкций УШР при идентичных электромагнитных характеристиках.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

Экспериментальными исследованиями на физических моделях трёхстержневого УШР с использованием поверенных измерительных средств,

внесённых в реестр ГСИ РК.

Сходимостью результатов физического и имитационного моделирования по критерию средней абсолютной процентной погрешности (MAPE): не более 5.0% по току сетевой обмотки и 2.5% по коэффициенту гармонических искажений — что соответствует допустимым погрешностям для нелинейных ферромагнитных устройств.

Применением математически обоснованных методов оптимизации (Gaussian Process, Bayesian Optimization) с подтверждением глобального характера найденного оптимума.

По результатам выполненных работ и проведенных исследований, на защиту выносятся **следующие положения**:

1. Физические модели трёхстержневого УШР с подмагничиванием постоянным током и результаты экспериментального исследования их электромагнитных характеристик.

2. Верифицированная имитационная модель трёхстержневого УШР в Matlab Simulink и методика моделирования режимов подмагничивания постоянным током.

3. Результаты исследования оптимального соотношения длин и сечений стержней и ярем реактора, количества обмоток и их напряжения для получения режима полупериодного насыщения УШР.

4. Двухэтапный метод оптимизации конструктивных параметров УШР на основе GP и Байесовской оптимизации.

5. Результаты количественного сравнения трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций УШР при идентичных электромагнитных характеристиках: затраты на активные материалы трёхстержневой конструкции на 26.4% меньше.

Результаты реализации проекта могут оказаться прорывными в реализации концепции построения интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей и систем и в освоении нового электротехнического оборудования отечественного производства.

Потребителями полученных результатов могут быть системный оператор НЭС Казахстана АО «KEGOC», АО «АЖК» и другие региональные электросетевые компании.

Основные положения отражены в научных публикациях: 5 научных статьях, в том числе: 3 научные статьи в отечественном издании из списка рекомендованных КОКСОН; 1 научный доклад в сборниках в международных научно-технических конференций, в том числе с очным выступлением в зарубежной научной конференции с публикацией докладов в базе Scopus; 1 научная статьи, индексируемые в базе Scopus, в журнале «Electric Power Systems Research» с процентилем на момент публикации 78% по разделу «Electrical and Electronic Engineering» «Электротехника и электроника». В качестве соавтора результаты научно-исследовательской деятельности были зафиксированы в: 2 Патентах РК на полезную модель по тематике конструкций шунтирующих реакторов (Приложение Г).

Личный вклад автора в решении исследуемого вопроса определяется:

-В обосновании, формулировке и выборе методики исследования с применением физических моделей шунтирующих реакторов;

-Руководством на всех этапах создания и непосредственным исследованием (разработка задания на изготовление, участие в измерениях и обработке данных) физических моделей реакторов;

-В постановке и реализации имитационной модели по расчету с применением программного комплекса Matlab Simulink применительно к шунтирующим реакторам.

Диссертационная работа выполнена автором в соответствии с действующими требованиями оформления, структуры и содержания. Работа состоит из 6 основных глав, списка условных обозначений, введения, заключения, списка использованной литературы и приложений.

В первой главе представлено описание принципа действия шунтирующих реакторов и полупериодного насыщения магнитопровода реактора. Дан обзор литературы и современных исследований в области разработок шунтирующих реакторов.

Во второй главе описана физическая модель шунтирующего реактора и стенд для выполнения испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований физических моделей реакторов.

В третьей главе представлена методика моделирования УШР в программном комплексе Matlab Simulink, подробно описана имитационная модель реактора и этапы создания модели. Сопоставлены результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования работы шунтирующего реактора при разной степени подмагничивания постоянным током.

Четвертая глава содержит анализ и результаты расчетов модели реактора на 110 кВ. Приведены графики зависимости токов сетевой обмотки от параметров УШР, гармонический анализ токов сетевой обмотки при изменении сечения и высоты стержней магнитопровода УШР.

Глава 5 содержит расчёт конструктивных параметров обмоток оптимального УШР 110 кВ, 25 МВАр. Результаты главы служат основой модели стоимости активных материалов для задачи оптимизации главы 6.

Глава 6 посвящена двухэтапной оптимизации конструктивных параметров методом GP и Байесовской оптимизации, определению оптимальной конструкции ($S^*=0.155 \text{ м}^2$, $L_s^*=2.325 \text{ м}$) и количественному сравнению трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций УШР.

1 УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УШР тип устройств FACTS, широко используемый для обеспечения оптимизации перетоков реактивной мощности, повышения пропускной способности линий электропередачи, снижения потерь электроэнергии, снижения числа коммутаций выключателей и действия РПН трансформаторов [6]. Сочетание управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа с параллельно установленными батареями статических конденсаторов (БСК) позволяет обеспечить не только плавное регулирование компенсации (потребление) реактивной мощности, но и ее генерацию в соответствии с мощностью БСК [7]. Основное функциональное назначение УШР – снижение уровня напряжения, при одностороннем включении линии электропередач на шины питающей сети, до допустимого. Такие реакторы устанавливаются на линии и называются линейными.

Кроме этого, есть и другая функция УШР – это ограничение зарядной мощности, образуемой протяженными сетями высокого (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН). Реакторы такого типа относятся к подстанционным и устанавливаются на шинах подстанций или станций. Наконец, установка шунтирующих реакторов способствует снижению уровня коммутационных перенапряжений до допустимого.

УШР можно классифицировать по принципу действия на следующие типы:

- Шунтирующие реакторы, управляемые переключением отпаек (аналогично РПН трансформаторов);
- Шунтирующие реакторы трансформаторного типа, управляемые путем коммутации магнитного потока (УШРТ);
- Управляемые подмагничиванием постоянным током шунтирующие реакторы (УШР);

Шунтирующие реакторы, управляемые переключением отпаек, не получили широкого применения по причине недостаточной надежности РПН и неудовлетворительной скорости регулирования, хотя и применяются в странах Европейского союза и США. УШРТ также пока не находят широкого распространения вследствие относительно высокой стоимости и сложности в эксплуатации, хотя это единственный управляемый реактор, имеющий весьма высокое быстродействие. В связи с вышеизложенным наиболее широкое применение получили реакторы с подмагничиванием постоянным током.

Согласно статистическим данным, в настоящее время в Казахстане, странах СНГ и дальнего зарубежья введено в эксплуатацию управляемых реакторов общей мощностью более 12 ГВАр [8] напряжением от 6 кВ до 500 кВ производства Запорожского Трансформаторного завода, Московского электротехнического завода, турецкой компании «Best transformer», Тольятинского трансформаторного завода и др., в числе которых 6 УШРТ с

коммутацией магнитного потока и только один реактор с широким диапазоном РПН [9, 10].

Таким образом, подавляющее большинство эксплуатируемых управляемых шунтирующих реакторов - это реакторы с подмагничиванием постоянным током, которые работают по одному и тому же принципу, но отличаются конструктивными и схемными решениями, в зависимости от потребляемой мощности, номинального напряжения и завода изготовителя [11-13]. Стоит отметить, что независимо от аббревиатуры все управляемые шунтирующие реакторы с подмагничиванием постоянным током являются реакторами трансформаторного типа, поскольку изготавливаются с магнитопроводом трансформаторного типа с максимальным использованием технологии трансформаторостроения.

1.1 Состояние вопроса по разработке УШР

Разработка управляемых реакторов с подмагничиванием постоянным током началась более 60-ти лет назад, вместе с освоением и строительством линий электропередач ВН и СВН [14-17]. Тогда же были сформулированы и основные требования к таким устройствам:

- синусоидальность потребляемого тока;
- высокий коэффициент регулирования;
- возможность подключения к сетям ВН и СВН;
- оптимальный расход активных материалов и низкий уровень потерь;
- высокое быстродействие;
- простота конструкции и изготовления;
- ремонтпригодность и др.

На сегодняшний день перечисленные требования несколько видоизменились по причине того, что УШР представляют собой особую индивидуальную конструкцию, но в целом они определяют техническую пригодность устройства.

В научном мире на протяжении многих лет проводились и проводятся исследования по разработке и моделированию управляемых реакторов с подмагничиванием постоянным током [22, с.2]. В таблице № 1.1 представлены основные исследовательские статьи по теме шунтирующих реакторов различных конструкций.

Таблица 1.1 - Библиографические ссылки по теме шунтирующих реакторов различных конструкций

Четырехстержневая конструкция магнитопровода	Трехстержневая конструкция магнитопровода	«Racetrack» и «D-Type» конструкция магнитопровода
[11, с. 77], [12, с. 20], [18 - 29]	[30-41]	[42-51]

Авторы статьи [37, с.2] описывают поперечное намагничивание магнитной цепи трехстержневого реактора, которое обеспечивается размещением сетевой обмотки и обмотки управления так, что в магнитной цепи существуют два ортогональных поля. При поперечном намагничивании четные гармоники в потребляемом токе отсутствуют, а амплитудные значения нечетных уменьшаются, т.е. ток сетевой обмотки практически синусоидальный во всем диапазоне регулирования. Преимущество поперечного намагничивания – минимальные потери в стали. Однако практическая реализация поперечного намагничивания сталкивается со значительными трудностями. Необходимость размещения обмотки управления внутри ферромагнетика и изготовления стержней из отдельных вставок с немагнитными зазорами, а также невозможность использования обычных плоско шихтованных магнитопроводов существенно усложняют конструкцию и технологию изготовления. В основном по этим причинам реакторы с поперечным намагничиванием не получили широкого распространения.

В статьях [38, с.3; 39, с.2] приведены конструкции магнитопровода шунтирующего реактора, а также способы замыкания магнитных потоков постоянного и переменного поля, практически идентичные предложенной в диссертационном исследовании конструкции шунтирующего реактора. С одним лишь отличием - при соединении секций сетевой обмотки встречно-параллельно, как представлено на рисунке 1.5, переменный магнитный поток замыкается по рабочим крайним стержням и ярмам магнитопровода, а постоянный магнитный поток - через средний стержень. При соединении секций сетевой обмотки параллельно, как это сделали авторы статьи, переменный магнитный поток замыкается через средний стержень, а постоянный – по периметру магнитопровода, что ничего не меняет с точки зрения потерь и генерации высших гармоник, за исключением того, что в этом случае четные гармоники будут замыкаться через источник постоянного тока, что не желательно. Моделирование авторы выполнили в программном комплексе PSCAD, хотя следует отметить, что модели, используемые в PSCAD, не позволяют напрямую изменять параметры магнитной цепи [40, с.4]. Но авторы поставили перед собой другую задачу, а именно применение нового алгоритма управления, основанного на стратегии быстрого намагничивания и размагничивания (RMDM), которая требует лишь добавления усиленной схемы повышения напряжения в обмотке управления УШР.

Что касается трехстержневой конструкции, то китайскими коллегами были проведены исследования [45, с.2; 46, с.3; 47, с.3], а именно разработка и подготовка документации по изготовлению трехстержневого УШР с рабочим напряжением 35 кВ. Также предлагаются различные конструкции для выполнения трехстержневого УШР – шунтирующий реактор с конструкцией магнитопровода схожей с гоночной трассой «Racetrack-Core Reactor», трехстержневой реактор и шунтирующий реактор с конструкцией магнитопровода D-типа. Авторы провели технико-экономическое сравнение всех трех конструкций, в результате чего конструкция в виде Racetrack-Core

была предложена как оптимальная [41, с.5]. В конструкциях магнитопровода УШР соответственно две основные сетевые обмотки установлены на двух крайних стержнях и соединены последовательно в электрическую цепь. Сверхпроводящая обмотка управления постоянного тока окружена соседними внутренними стержнями магнитопровода посередине. Сечение всех участков магнитопровода (стержней и ярем) одинаковое, кроме среднего стержня. Хотя сечение среднего стержня в два раза больше остальной части магнитопровода, управление тока сетевой обмотки шунтирующего реактора осуществляется путем изменения магнитной индукции постоянного магнитного потока в среднем стержне. В конструкции и схеме соединения обмоток реактора пути прохождения переменного и постоянного магнитных потоков совпадают по направлению по всей длине магнитопровода, что обуславливает одинаковую степень насыщения всего магнитопровода. Недостатками данного решения являются регулирование за счет насыщения всего магнитопровода, что приводит к увеличению потерь и необходимости компенсации высших гармоник схемными способами.

Сегодня проблема компенсации зарядной мощности линий СВН и регулирования напряжения и реактивной мощности в электрических сетях напряжением 35 кВ – 220 кВ успешно решается использованием плавно регулируемых управляемых реакторов, производство которых осуществляется в России, Украине, Турции, Индии, Китае, Испании и других странах.

Каждый из производителей предлагает потребителям «свою» «оригинальную» конструкцию, обладающую высокими технико - экономическими характеристиками, при этом во всех конструкциях разделение рабочего стержня на два полустержня используется как способ разделения путей замыкания постоянного и переменного магнитных потоков, что необходимо для обеспечения равенства нулю переменной эдс на выводах управляющей обмотки постоянного тока. Также одинаков и способ компенсации гармоник нулевой последовательности, путем соединения секций компенсационной обмотки в треугольник. Исключением является только реакторы с коммутацией магнитного потока, освоение и производство которых находится в начальной стадии (Индия, Россия).

В настоящее время в разработке и производстве реакторов с подмагничиванием постоянным током существуют два направления:

- с одинаковой степенью насыщения всех участков магнитопровода (стержней и ярем) с использованием магнитопроводов, практически идентичных магнитопроводам силовых трансформаторов;
- с разной степенью насыщения стержней и ярем, с использованием принципа предельного и полупериодного насыщения стержней магнитопровода.

1.2 Принцип действия и особенности конструкции управляемых реакторов трансформаторного типа подмагничиванием постоянным током.

Управляемый шунтирующий реактор – это ферромагнитное устройство, принцип действия которого основан на явлении электромагнитной индукции. УШР работает по принципу магнитного усилителя. Изменение насыщения стержней магнитопровода позволяет влиять на индуктивность сетевой обмотки, на которой она расположена. По мере насыщения стержней, индуктивность катушки снижается, тем самым потребляемый ток из сети увеличивается.

Вследствие нелинейного характера кривой намагничивания, при подмагничивании постоянным током ферромагнитного устройства в сеть генерируются все высшие гармоники, в том числе четные, амплитуда которых достигает значительных величин. Одинаковая степень намагничивания частей магнитопровода УШР как переменным, так и постоянным магнитными полями, обуславливает применение схемных способов компенсации гармоник потребляемого тока [52].

Встречно параллельное соединение секций сетевой обмотки, расположенных на стержнях (полустержнях) одной фазы (рисунок 1.1), позволяет компенсировать четные гармоники тока. Данное схемное решение носит название - двойное симметричное намагничивание по четным гармоникам.

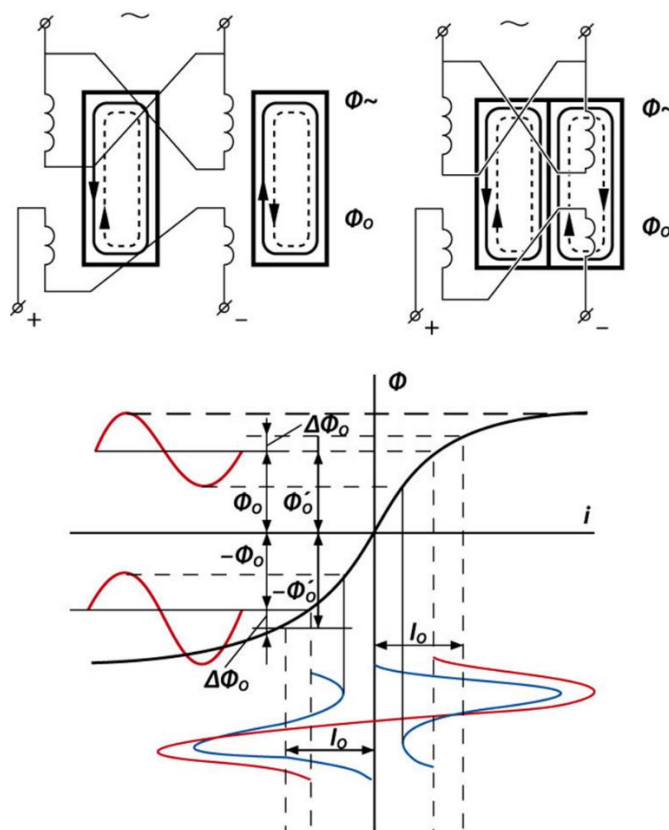


Рисунок 1.1 –Двойное симметричное намагничивание

по четным гармоникам

Установка дополнительной обмотки, соединенной по схеме треугольника, позволяет скомпенсировать гармоники кратные трем. Общепринятое название данной обмотки – компенсационная. Гармоники нулевой последовательности (кратные трем) замыкаются в компенсационной обмотке и тем самым не присутствуют в потребляемом реактором токе. Извлечение гармоник кратных трем из общего тока путем соединения одной из обмоток в треугольник известно из теории трансформаторостроения.

Компенсация 5-й, 7-ой гармоник обуславливает необходимость удвоения магнитной системы и применения схем зигзага, параллельного соединения звезды и треугольника, что было неприемлемо (рисунок 1.2).

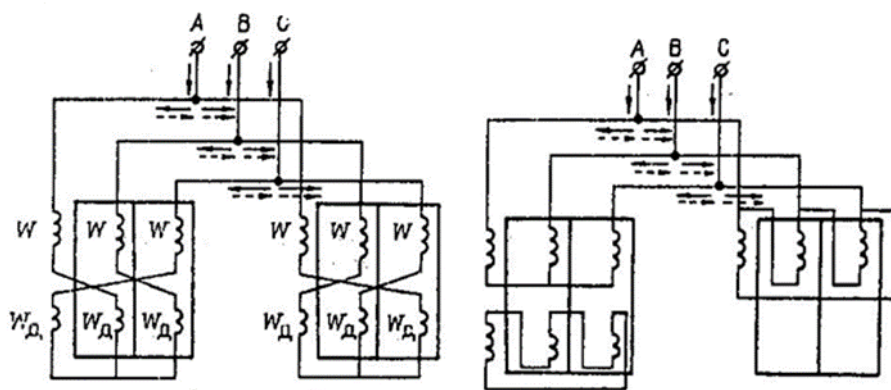
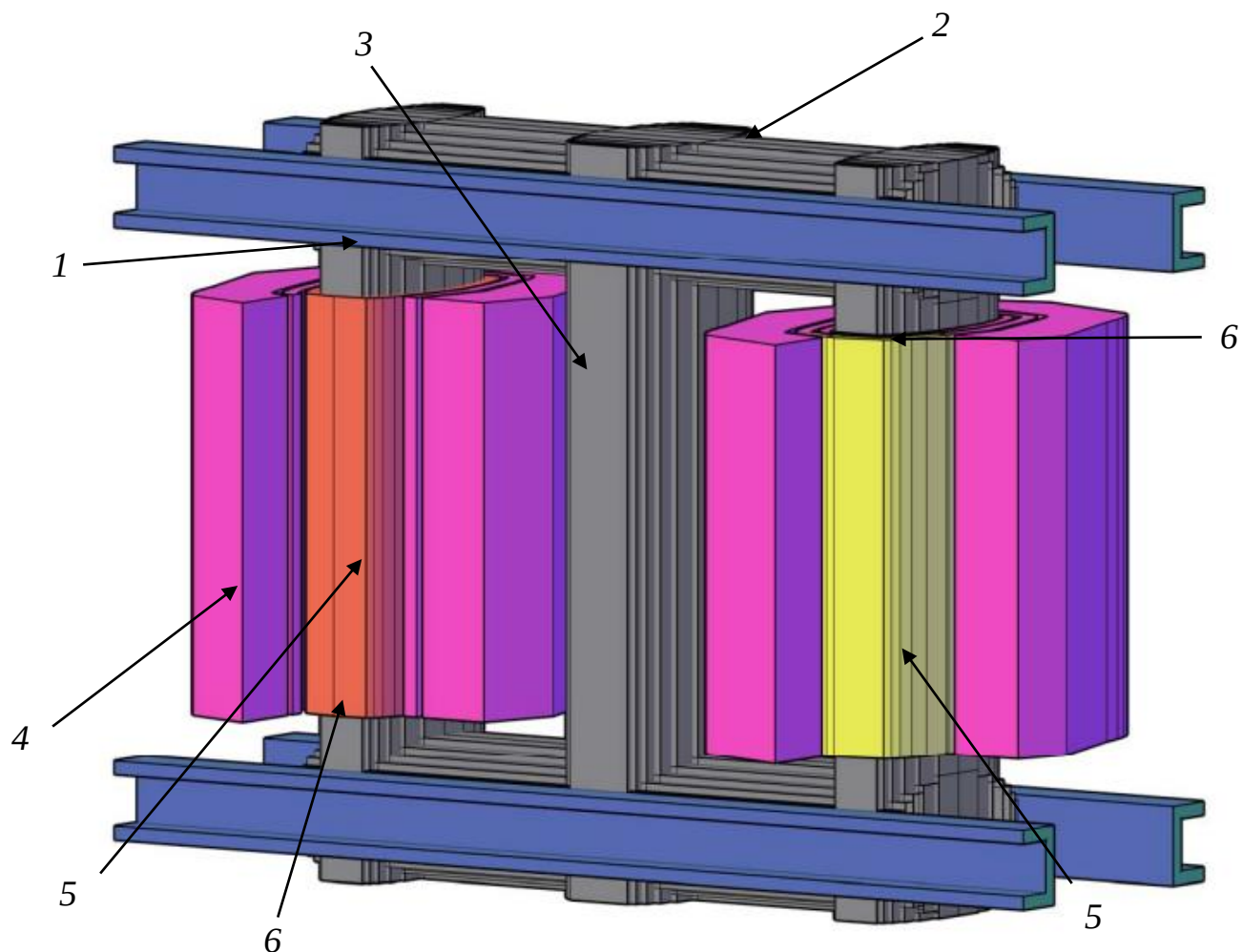


Рисунок 1.2 – Схемные способы компенсации нечетных гармоник

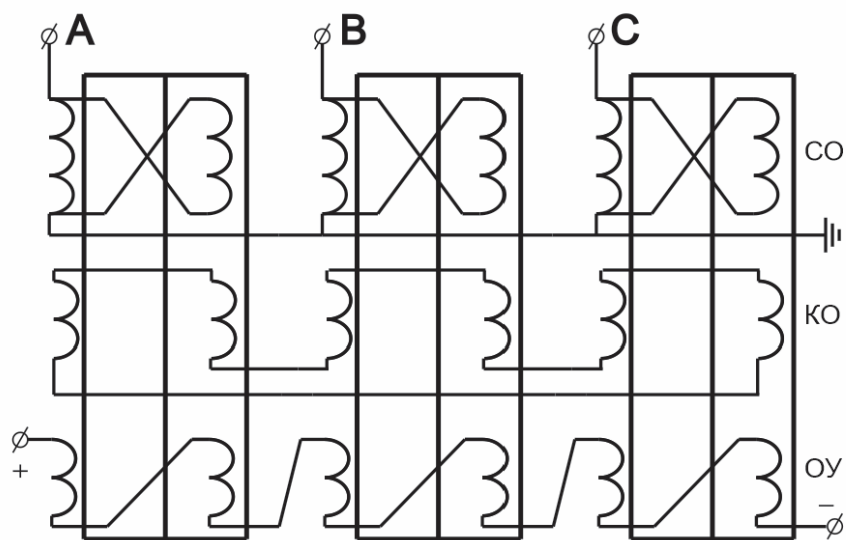
Схемные способы компенсации 11-ой, 13-ой и кратных им гармоник обуславливают необходимость еще одного удвоения магнитной системы, что также неприемлемо.

Схемно - конструктивное исполнение такого реактора приведено на рисунке 1.3. В 80 – х годах прошлого столетия, впервые в СССР, два таких шунтирующих реактора, сконструированных на базе типовых трансформаторов, были установлены на Западном участке электроснабжения Байкало-Амурская магистрали - подстанция «Таксимо».

Пофазное исполнение реакторов было выполнено на базе силовых трансформаторов напряжением 35 кВ, мощностью 6,3 кВА, производства Чирчикского трансформаторного завода путем их реконструкции на ремонтном предприятии «Южказэнергоремонт» г. Алматы. Реконструкция трансформаторов и дальнейшее их преобразование в реактор заключалось в следующем - демонтированы устройство РПН и регулировочная часть обмотки высокого напряжения, демонтированы обмотки со среднего стержня, обмотка управления намотана на крайние рабочие стержни, демонтированы нефункциональные вводы и в соответствии с этим конструкция бака подверглась изменениям.



a



б

Рисунок 1.3 – Упрощенная конструкция однофазного УШР с трехстержневой конструкцией магнитопровода (а) и схема соединения обмоток (б). 1 – Рабочий стержень, 2 – ярма, 3 – средней стержень, 4 – сетевая обмотка, 5 – компенсационная обмотка, 6 – обмотка управления

Преобразователи, запитанные от системы собственных нужд подстанции 0,4 кВ, были использованы в качестве источников постоянного тока для обмотки управления. Подключение обмотки управления к источникам постоянного тока выполнено кабелем. Эксплуатация данных двух шунтирующих реакторов производится по настоящее время и работоспособность их подтверждена.

Очевидно, что с точки зрения технико-экономической эффективности эти реакторы не были столь оптимальными, и в те годы сравнивать было не с чем, но их изготовление и эксплуатация показали возможность производства управляемых подмагничиванием постоянным током шунтирующих реакторов любого класса напряжения и мощности [53]. Недостатками такого решения является регулирование путем подмагничивания постоянным током всей конструкции магнитопровода, что приводит к увеличению потерь и необходимости компенсации высших гармоник схемными способами.

При соединении секций сетевой обмотки встречно параллельно, как представлено на рисунке 1.2, путь замыкания переменного магнитного потока проходит по крайним рабочим стержням и ярмам магнитопровода, а постоянного магнитного потока через средний стержень, тем самым подмагничивается практически весь магнитопровод. Увеличение потерь при наложении постоянного магнитного потока будет иметь место практически во всем объеме электротехнической стали. Для компенсации четных гармоник, амплитуда которых составляет 60–70 % от первой, требуется встречно параллельное соединение секций сетевой обмотки, в контуре которых замыкаются четные гармоники. Это, в свою очередь, требует увеличения сечения сетевой обмотки.

Таким образом, классический способ подмагничивания, когда сечение и индукция суммарного магнитного потока на всех участках магнитопровода (стержни и ярма) практически одинаковы, является причиной увеличения потерь и генерации всех высших гармоник включая четные.

Устранение указанных недостатков возможно путем применения принципа предельного (полупериодного) насыщения участков магнитопровода.

1.3 Описание режима полупериодного насыщения и его использование в трехстержневой конструкции

Работа УШР на линейной части кривой намагничивания, за точкой перегиба, на которой отсутствуют гармоники, определяет режим полупериодного насыщения или близкого к предельному. Магнитная проницаемость стержней магнитопровода практически становится равной магнитной проницаемости воздуха. При этом конструкция магнитопровода в целом не меняется. Те же два стержня (полустержня) на одну фазу, необходимость создания отдельных путей для переменного и постоянного магнитных потоков и наличие вторичной обмотки, соединенной в треугольник [54].

Регулирование тока сетевой обмотки УШР осуществляется путем изменения тока обмотки управления, регулирующего степень насыщения рабочих стержней магнитопровода. В соседних стержнях фазы этот поток направлен в разные стороны. Так как на поток подмагничивания накладывается переменный поток, результирующий поток в каждом из стержней будет больше индукции насыщения стали некоторую часть периода. В режиме, в котором синусоидальный магнитный поток полностью переходит на прямую часть характеристики за точкой перегиба (коленом) и суммарное значение индукции в каждом из стержней больше индукции насыщения стали ровно на половину периода, называется режимом полупериодного насыщения. Вместе с тем будет иметь место увеличение добавочных потерь в элементах конструкции и обмотках УШР, по причине появления потоков рассеяния переменного магнитного потока. В мощных УШР (более 60 МВАр) производства Запорожского трансформаторного завода (ЗТЗ) вопрос увеличения потерь решается установкой приставных ярем, в которых локализуются потоки рассеяния. В УШР меньшей мощности такое мероприятие не предусматривается.

Конструкция магнитопровода УШР, при реализации принципа полупериодного насыщения, принципиально отличается увеличенным сечением ярма (в 1,5-2 раза) по сравнению с сечением рабочих стержней. При подмагничивании ярем и других частей магнитопровода увеличенного сечения, ток УШР и намагничивающая сила частично формируются по кривой намагничивания до точки перегиба. При подмагничивании рабочих стержней, ток и намагничивающая сила формируются по линейной части кривой намагничивания за точкой перегиба. Таким образом при насыщении стержней УШР, влияние насыщения ярем на синусоидальность потребляемого тока из сети сводится к нулю. Следовательно, существенно уменьшается содержание высших гармоник тока и потери в стали.

Особенностью такого режима является то, что при синусоидальной форме приложенного напряжения форма кривой м.д.с фазы и, следовательно, форма кривой тока должна быть синусоидальной (рисунок 1.3, а). Преобладающая в треугольнике КО третья гармоника имеет максимум в области 40-50% нагрузки УШР, а в режиме номинальной нагрузки при синусоидальном питающем напряжении практически равна нулю, как и остальные высшие гармоники в токе СО.

Конструктивно магнитопровод одной фазы УШР на базе типового трансформатора представлен на рисунке 1.3 б. Легко заметить, что конструкция магнитопровода УШР аналогична магнитопроводу силового трансформатора соответствующей мощности, также как и технология изготовления его обмоток. Реализация режима полупериодного насыщения осуществляется путем увеличения сечения среднего стержня и ярем. При индукции в рабочих стержнях порядка 1,7 Тл, индукция в среднем стержне и ярмах будет порядка 0,85-1,1 Тл.

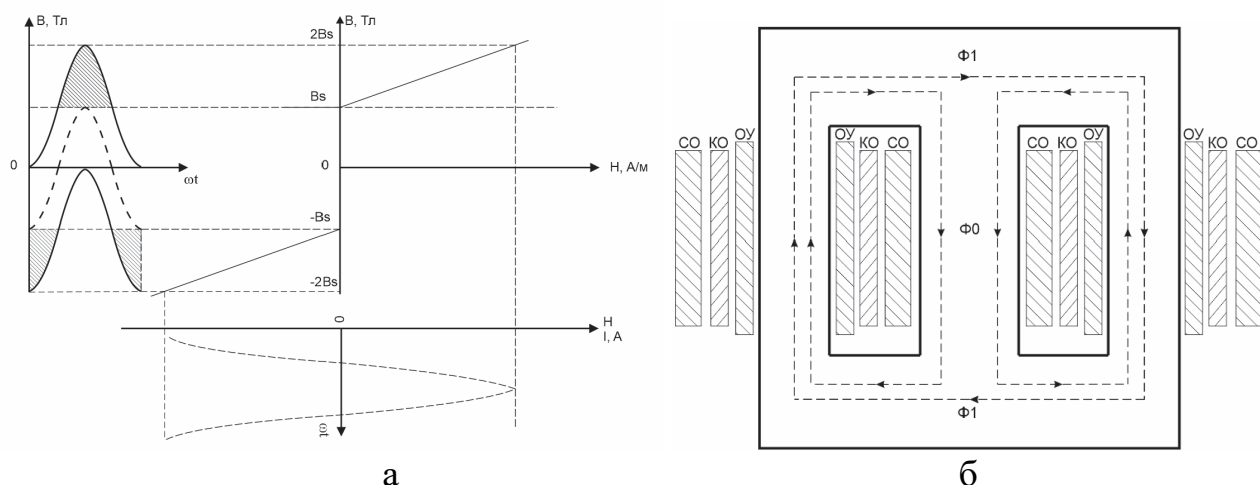


Рисунок 1.4- Принцип предельного насыщения магнитной цепи (а) и возможная конструкция фазы управляемого реактора (б)

Причем магнитодвижущая сила рабочих стержней будет определять форму тока, и значение коэффициента гармоник будет сведено к минимуму, а перемагничивание будет происходить без гистерезиса.

В УШР производства основного большинства заводов изготовителей (Запорожского трансформаторного завода, «Best transformer» и т.д.), конструктивно-схемное решение основано на применении бронестержневой конструкции магнитопровода, как это показано на рисунке 1.5 [55]. УШР с бронестержневым магнитопроводом состоит из сетевой обмотки (СО) переменного тока, подключаемой к электрической сети переменного тока, и обмотки управления (ОУ), подключаемой к регулируемому источнику постоянного напряжения (рисунок 1.5) и компенсационной обмотки (КО). Магнитопровод состоит из двух рабочих стержней (полустержней), верхних и боковых ярем.

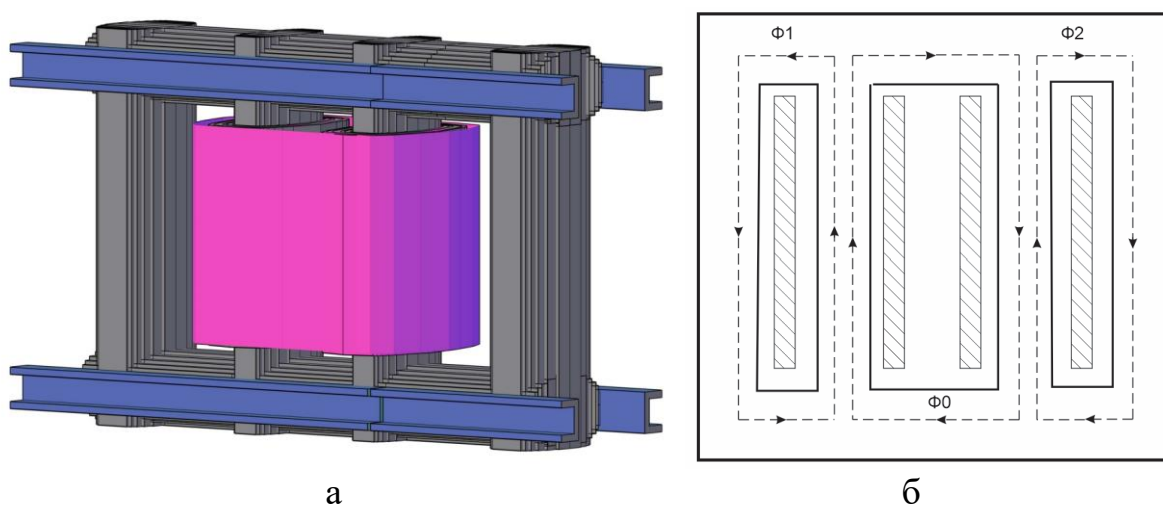
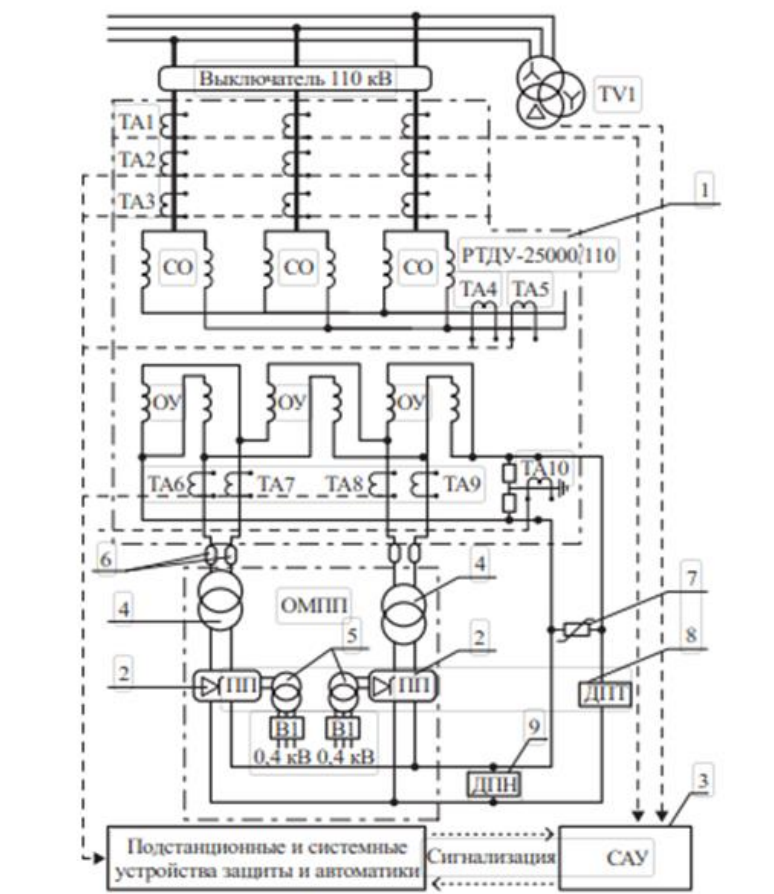


Рисунок 1.5 - Упрощенная конструкция (а) и электромагнитная схема (б) однофазного УШР с бронестержневым магнитопроводом

Постоянный поток подмагничивания, создаваемый током ОУ, замыкается между центральными полустержнями. Переменный магнитный поток при соединении секций сетевой обмотки параллельно согласно замыкается через верхние и боковые ярма магнитопровода и складывается в полустержнях с постоянным потоком.

Схема трехфазного УШР производства ЗТЗ напряжением 110 кВ и мощностью 25 МВАр показана на рисунке 1.6. Реактор производится в пофазном исполнении и трехфазном.



1 – электромагнитная часть; 2 – полупроводниковый трехфазный преобразователь ППМ 200 /750; 3 – система автоматического управления САУ; 4 - трансформатор преобразователя ОМ-200/22/0,22; 5 – трансформатор начального подмагничивания ТМО-2,5/0,4/ 0,012; 6 – предохранитель ПКТ 101-10=31,5-12,5; 7 - устройство защиты от перенапряжений; 8, 9 - датчики постоянного тока и напряжения; 10- ТА1-ТА9 –встроенные трансформаторы тока

Рисунок 1.6 – Принципиальная схема управляемого реактора серии РТУ 25000-110 производства ЗТЗ

Реализация реактора на базе планарного трехстержневого шихтованного магнитопровода не рассматривалась, хотя несложно заметить, что в данном случае объем электротехнической стали, массогабаритные характеристики УШР в целом и потери на холостой ход будут меньше (рисунок 1.7)

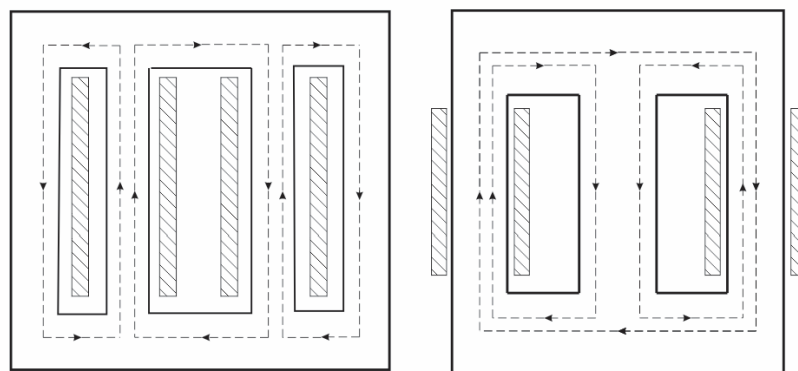


Рисунок 1.7 – Сравнительные размеры магнитопроводов бронестержневой и трехстержневой конструкций

Выводы к разделу 1

Таким образом, УШР может быть изготовлен, либо на базе трехстержневых магнитопроводов, либо на базе четырехстержневых магнитопроводов броневого типа. Общим недостатком обеих конструкций является несинусоидальность тока сетевой обмотки при наложении постоянного магнитного потока на переменный.

Способы компенсации гармонических составляющих тока сетевой обмотки, и значение THD (коэффициента гармоник) влияют на технико-экономические показатели и являются отличительной частью разных конструкций управляемых шунтирующих реакторов.

Задачу выбора оптимальной конструкции шунтирующего реактора, которая отвечает требованиям и обладает наилучшими технико-экономическими показателями, предстоит решить. Однако оптимизация существующих реакторов и сравнительный анализ разных конструкций при одинаковом напряжении и мощности путем подробных расчетов и изготовления опытно промышленных образцов практически не представляется возможным.

В то же время, вопросы оптимизации и выбора наиболее целесообразной конструкции реакторов могут быть решены на основе математического моделирования, в частности, путем использования комплекса Matlab Simulink, в котором представлены все элементы ферромагнитных устройств, как электрические, так и магнитные. Каждый участок магнитопровода может быть представлен отдельным элементом и моделируется в соответствии с его реальными физическими характеристиками.

При этом критерием точности математического моделирования могут служить экспериментальные данные, полученные на физических моделях относительно небольшой мощности.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

2.1 Описание физических моделей УШР и специализированного стенда для комплексных электротехнических исследований

В качестве физической модели УШР была использована модель группового управляемого шунтирующего реактора. Пофазное исполнение было выполнено на базе ТСЗИ (трехфазный трансформатор, мощность 1,6 кВА). Характеристики трансформатора можно принять за основу при выборе конструкции и вполне сопоставимы с реактором. Задание на изготовление физических моделей приведено в приложении А.

Испытательный стенд был изготовлен на предприятии ТОО «Алматинский электромеханический завод» (ТОО «АЭМЗ»). Схема и размещение оборудования испытательного стенда приведены в приложении Б. Протоколы заводских испытаний физических моделей приведены в Приложении В.



Рисунок 2.1 – Испытательный стенд

Экспериментальные исследования производились с применением анализатора качества электрической энергии Энергомонитор 3.3Т1 (производство НПП Марс-Энерго, Россия), с действующим сертификатом о поверке на момент производства работ.



Рисунок 2.2 – Общий вид физических моделей УШР

Размеры магнитопровода и конструкция показаны на рисунке 2.3. Сечение рабочих стержней равно $0,251 \text{ м}^2$, а площадь поперечного сечения ярем и среднего стержня увеличено с $0,26 \text{ м}^2$ до $0,46 \text{ м}^2$ по сравнению со стандартными размерами магнитопровода трансформатора ТСЗИ. Модель реактора включает в себя больше трех обмоток, что позволяет изменять значение магнитной индукции в стержнях магнитопровода от 1,4 Тл до 2,0 Тл. Обмоточные данные моделей идентичны.

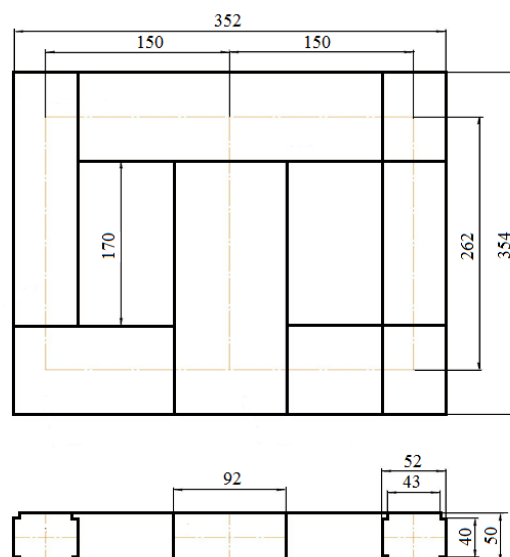
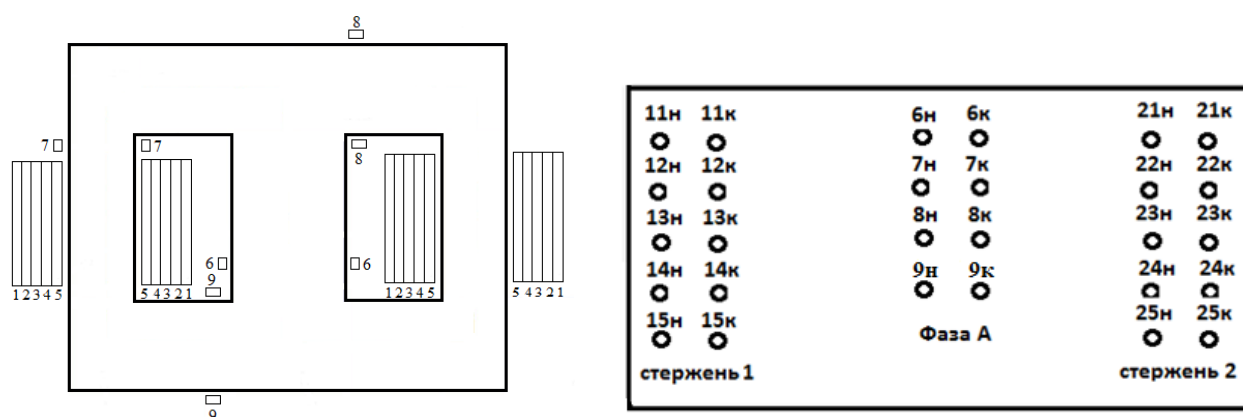


Рисунок 2.3 – Общий вид и размеры одной фазы физической модели реактора



1 – первая обмотка – 380 В (275 витков); 2 – вторая обмотка – 220 В (160 витков); 3 – третья обмотка – 127 В (93 витка); 4 – четвертая обмотка – 42 В (31 виток); 5 – пятая обмотка – 36 В (26 витков); 6,7,8,9 – измерительные обмотки (10 витков)

Рисунок 2.4 - Расположение обмоток, клеммник выводов

В таблице 2.1 приведены напряжения на обмотках фаз при подключении модели на трехфазное напряжение 380 В (холостой ход).

Таблица 2.1 – Напряжение на обмотках фаз модели

Обмотки	Отводы обмоток	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
Первая	11н – 11к	221	226,7	225
	21н – 21к	221	226,7	225
Вторая	12н – 12к	129,7	130,4	130
	22н – 22к	129,7	130,4	130
Третья	13н – 13к	75,1	75,5	75,3
	23н – 23к	75,1	75,5	75,4
Четвертая	14н – 14к	25,2	25,32	25,27
	24н – 24к	25,17	25,56	25,25
Пятая	15н – 15к	21,11	21,22	21,19
	25н – 25к	21,13	21,22	21,18
Изм. обмотки	6н – 6к	0	0	0
	7н – 7к	7,19	8,07	8
	8н – 8к	8,03	8,09	8
	9н – 9к	7,96	8,01	7,98

2.2 Электромагнитные параметры модели в режиме холостого хода

Возможные схемы соединения сетевой обмотки 1, подключенной к сети синусоидального напряжения ($W = 275$ витков, $U = 380 В$) при наличии и отсутствии компенсационной обмотки, соединенной в треугольник, показаны на рисунке 2.5 (а, б). В качестве компенсационной обмотки использована вторая обмотка реактора ($W=160$). Токи холостого хода по фазам показаны в таблице

2.2.

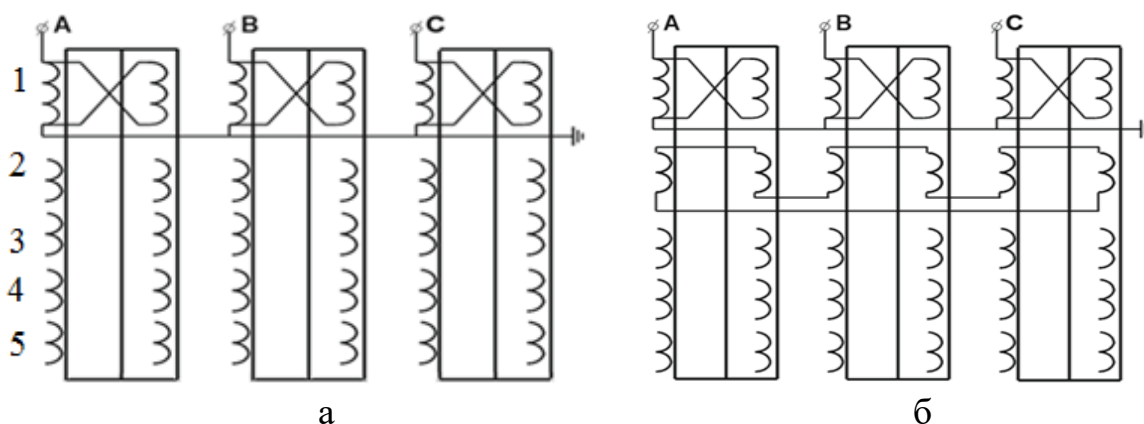


Рисунок 2.5 – Схемы соединения обмоток
а – сетевая обмотка, б – сетевая и компенсационная обмотки

Таблица 2.2 – Результаты опыта холостого хода

	Схема 2.6 а			Схема 2.6 б (число витков КО W = 160)		
Фазы	А	В	С	А	В	С
Напряжение СО, В	222,76	227,79	225,92	222,6	227,8	225,8
Ток СО I, А	0,84	0,65	0,69	0,77	0,74	0,57

Анализируя результаты согласно таблице, следует вывод что присутствует несимметрия токов фаз при небольшой несимметрии сетевого напряжения. Данное обстоятельство можно объяснить оказанием влияния несимметрии фазного напряжения и неидентичностью конструкций каждой фазы модели реактора, связанной с отклонением числа витков и сечений участков (стержней и ярем) магнитопровода.

Значение магнитной индукции на участках магнитопровода реактора рассчитывалась согласно следующей формуле:

$$B = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot \Pi \cdot W_i} \quad (1.1)$$

где, Π – сечение магнитопровода,

f – частота сети, равна 50 Гц,

U_i – напряжение обмоток реактора,

W_i – количество витков обмотки.

На рисунке 2.6 представлены результаты расчетов распределения индукции по участкам магнитопровода для схем 2.5 а и 2.5 б.

Для схемы рисунка 2.5 а

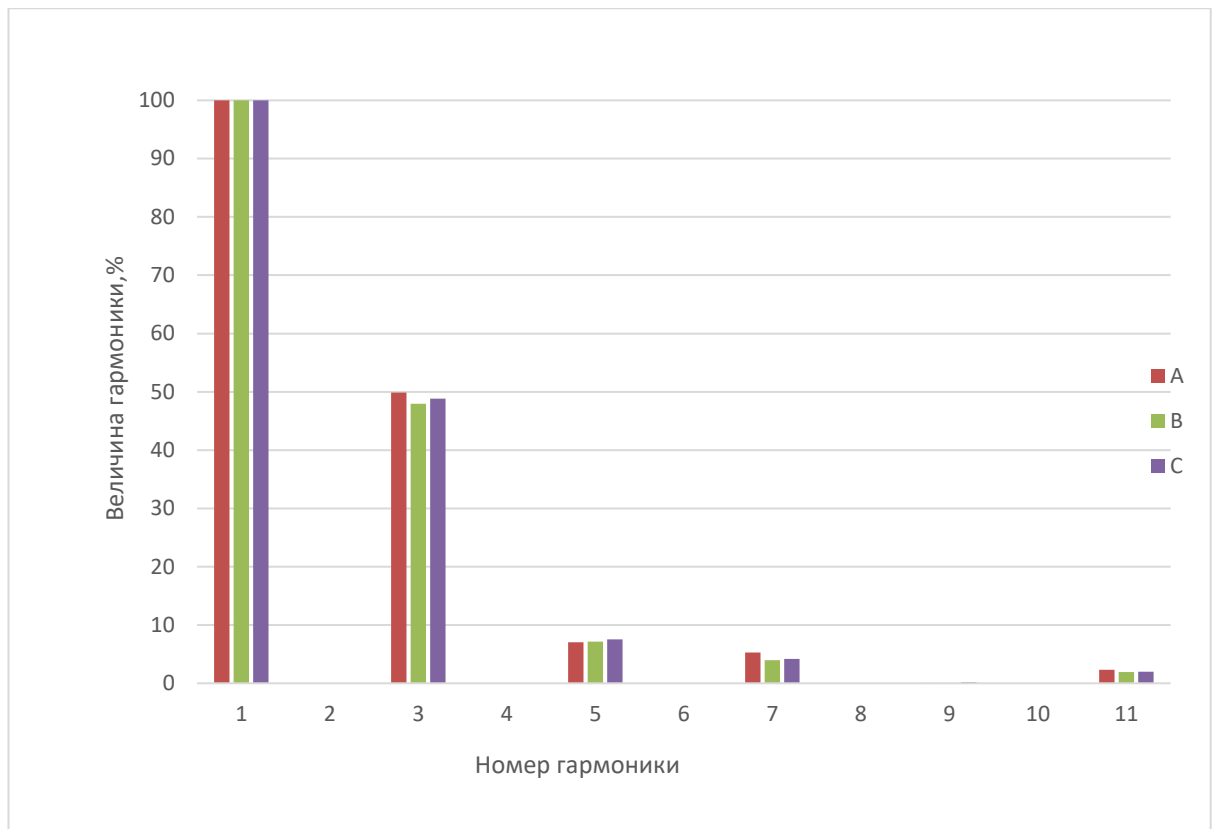


Рисунок 2.8 – График гармонического состава фазных токов холостого хода сетевой обмотки при отсутствии компенсационной обмотки

На рисунках 2.9, 2.10 представлены кривые и графики гармонического состава тока холостого хода сетевой обмотки при наличии компенсационной обмотки 2, замкнутой в треугольник (схема 2.5 б).

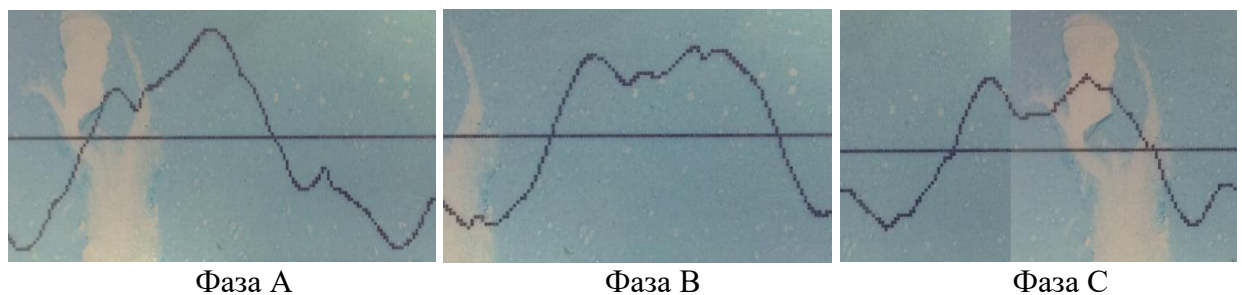


Рисунок 2.9 - Формы кривых тока холостого хода сетевой обмотки

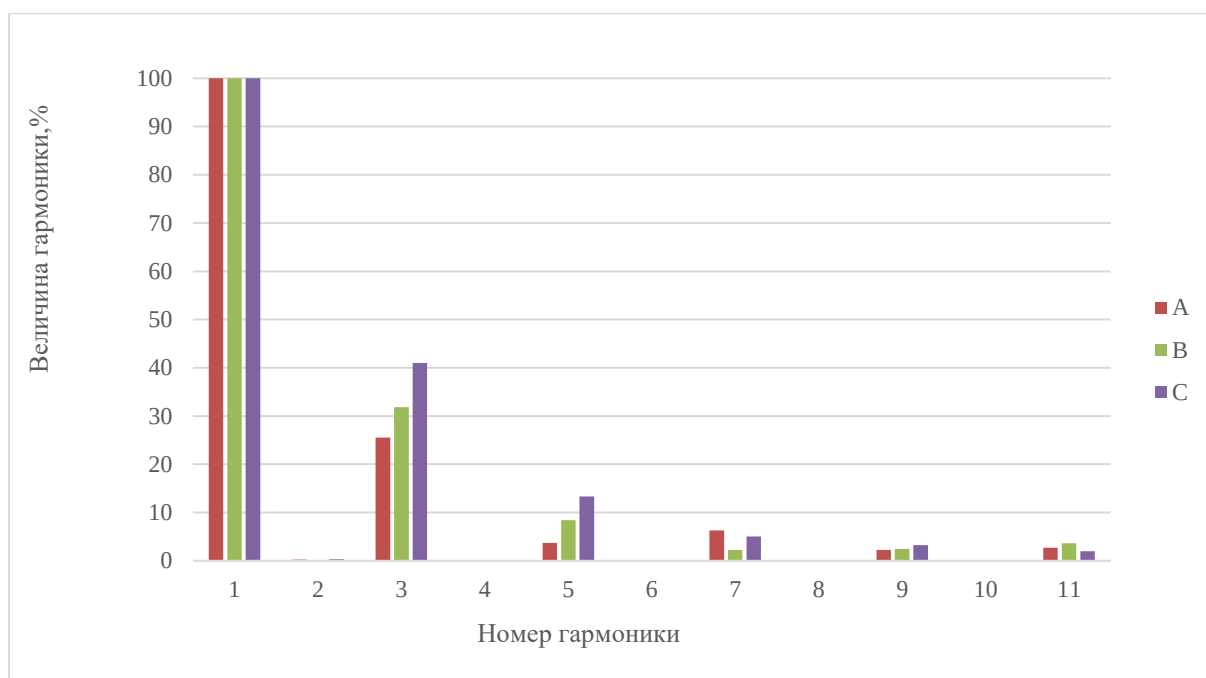


Рисунок 2.10 – Гармонический состав фазных токов холостого хода сетевой обмотки с компенсационной обмоткой

Изменение распределения магнитной индукции по участкам магнитопровода и токов холостого хода, как и следовало ожидать, для схем 2.5 и 2.5б незначительно. Однако гармонический состав тока сетевой обмотки значительно улучшается при подключении одной из обмоток в схему треугольника, что подтверждает рабочее схемно-техническое решение. При этом третья гармоника тока сетевой обмотки полностью не компенсируется, и гармоники нулевой последовательности имеют место и в контуре параллельных ветвей сетевой обмотки, предназначенных для замыкания четных гармоник при подмагничивании постоянным током.

2.3 Электромагнитные параметры модели в режимах подмагничивания

Результаты экспериментальных исследований гармонического состава тока сетевой обмотки при подмагничивании постоянным током приведены ниже. В качестве компенсационной обмотки использована вторая обмотка модели, в качестве обмотки управления третья обмотка модели.

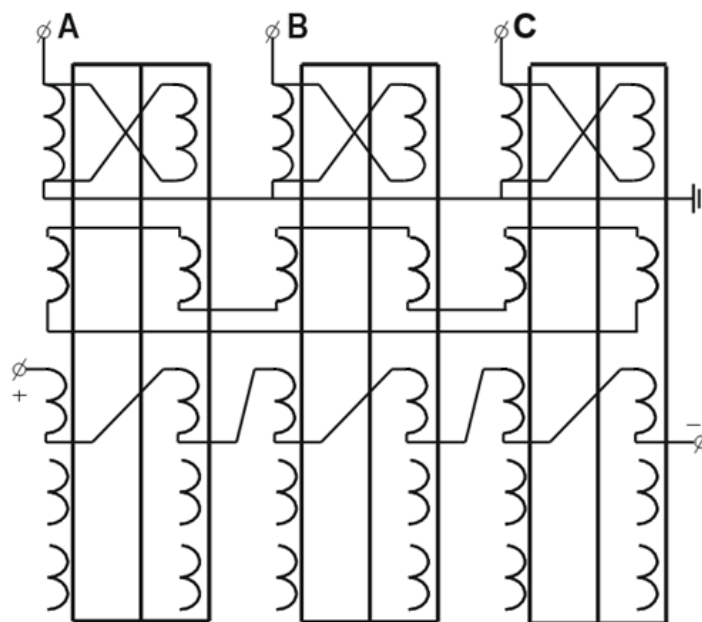


Рисунок 2.11 – Схемы соединения обмоток УШР

Токи по фазам сетевой обмотки, при подмагничивании постоянным током 6 А (магнитодвижущая сила $F_0 = 558$ А), приведены в таблице 2.3. Форма кривых тока и гармонический состав приведены на рисунках 2.12–2.13.

Таблица 2.3 – Фазные токи сетевой обмотки при подмагничивании 6 А

Фазы	A	B	C
Напряжение СО, В	219,3	226,8	224,4
Ток СО I, А	5,6	5,9	5,7

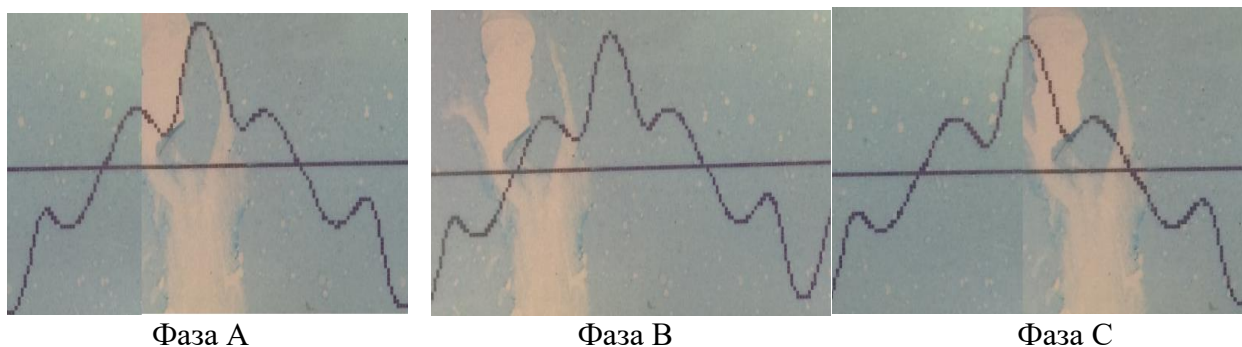


Рисунок 2.12 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 6 А

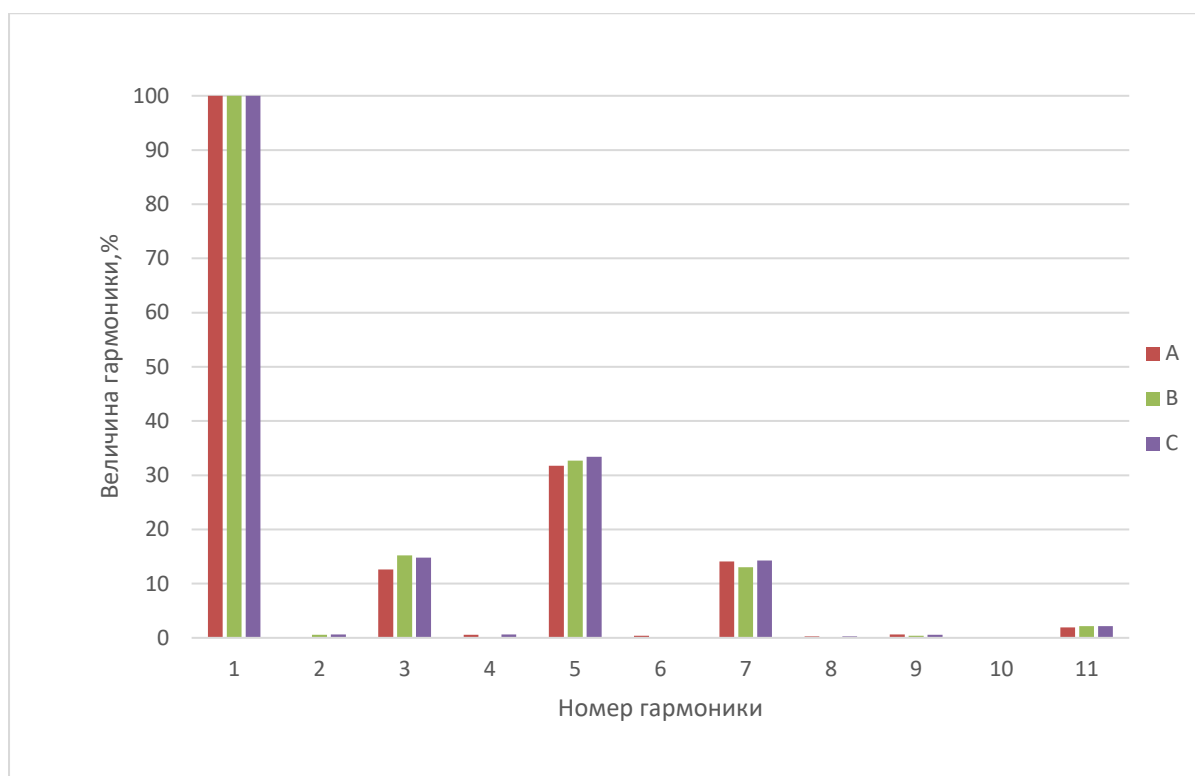


Рисунок 2.13 – Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 6 А

Ток в обмотке управления 10 А, магнитодвижущая сила $F_0 = 930$ А.

Значения напряжений и токов сетевой обмотки по фазам при подмагничивании 10 А приведены ниже, в таблице 2.4. Скриншот формы кривых токов сетевой обмотки и график гармонического состава приведены на рисунках 2.14 и 2.15.

Таблица 2.4 – Фазные токи сетевой обмотки при подмагничивании 10 А

Фазы	А	В	С
Напряжение СО, В	217,4	226,3	223,6
Ток СО I, А	9,5	9,7	9,4

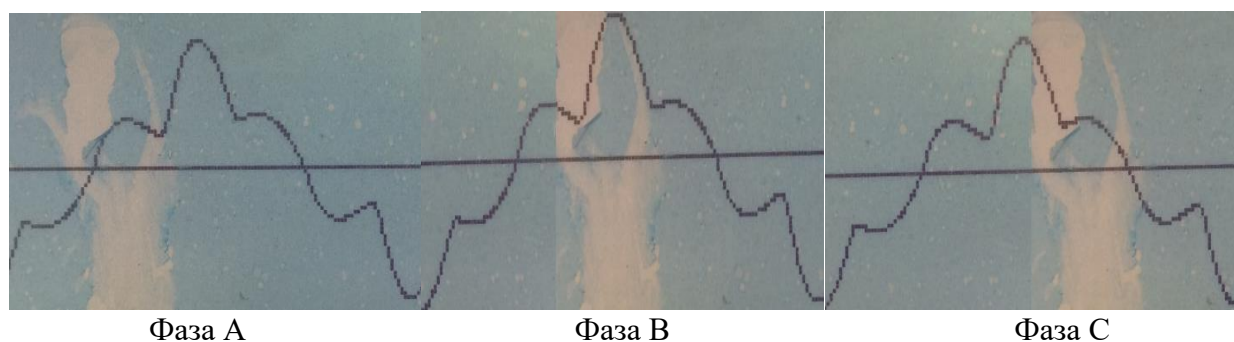


Рисунок 2.14 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 10 А

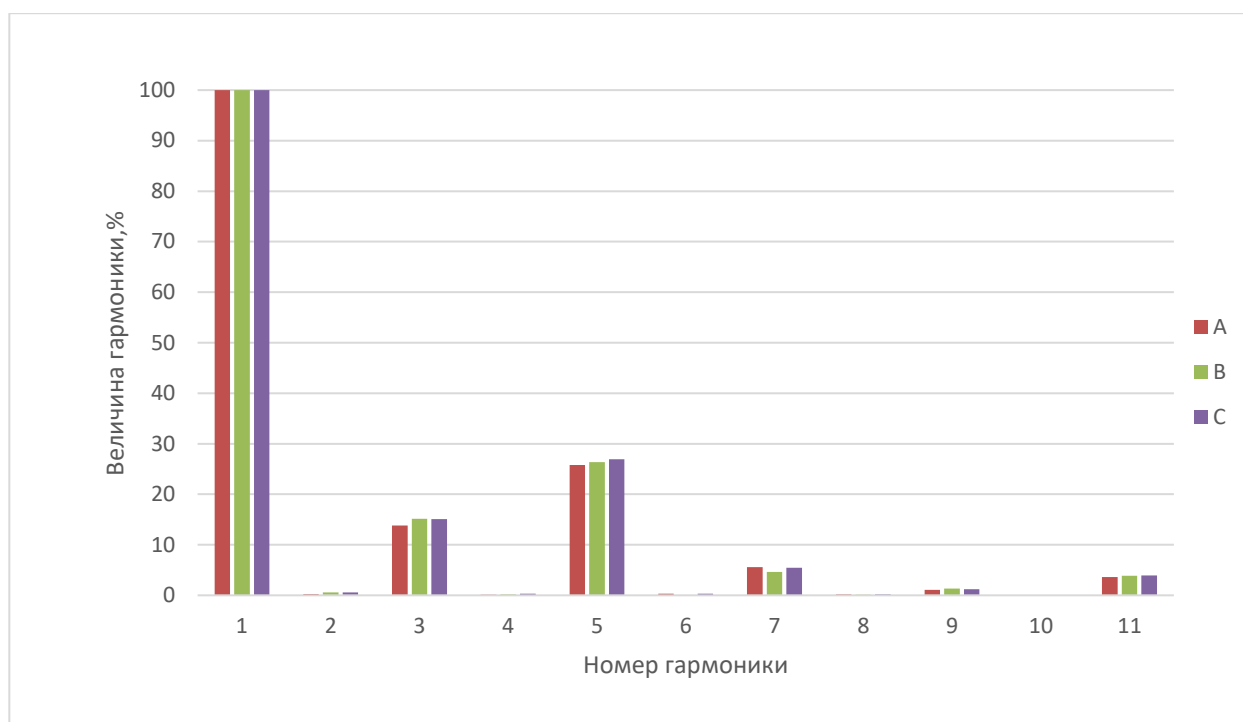


Рисунок 2.15 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 10 А

Ток в обмотке управления 15 А, магнитодвижущая сила $F_0 = 1395$ А.

Значения напряжения и токов сетевой обмотки по фазам при подмагничивании 15 А приведены ниже, в таблице 2.5. Формы кривых токов сетевой обмотки и график гармонического состава приведены на рисунках 2.16 и 2.17.

Таблица 2.5 – Фазные токи сетевой обмотки при подмагничивании 15 А

Фазы	А	В	С
Напряжение СО, В	217,3	226,0	223,3
Ток СО I, А	14,1	14,1	13,9

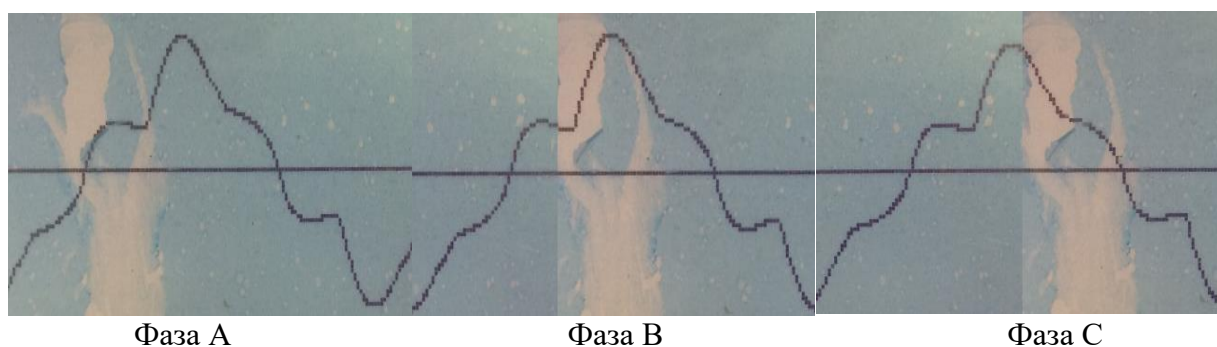


Рисунок 2.16 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 15 А

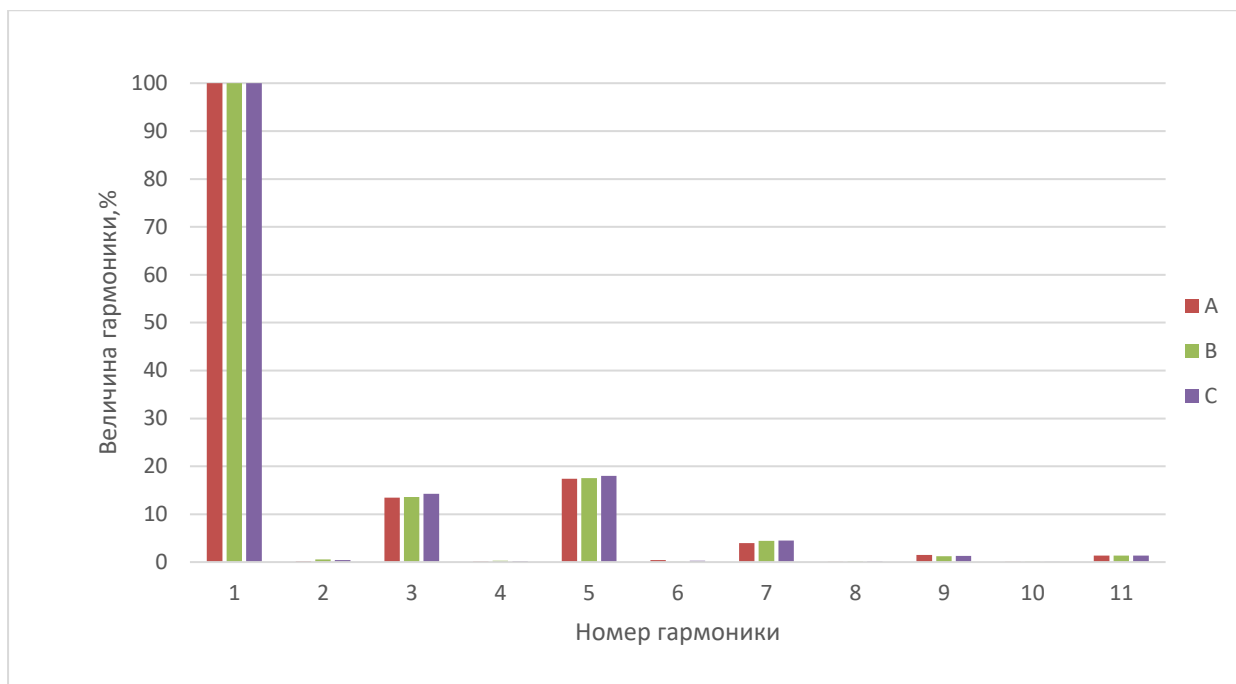


Рисунок 2.17 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 15 А

Ток в обмотке управления 20 А, магнитодвижущая сила $F_0 = 1860$ А.

Значения напряжения и токов сетевой обмотки по фазам при подмагничивании 20 А приведены ниже, в таблице 2.6. Скриншот формы кривых токов сетевой обмотки и график гармонического состава приведены на рисунках 2.18 и 2.19.

Таблица 2.6 – Фазные токи сетевой обмотки при подмагничивании 20 А

Фазы	А	В	С
Напряжение СО, В	217,6	225,3	222,2
Ток СО I, А	18,7	18,4	18,3

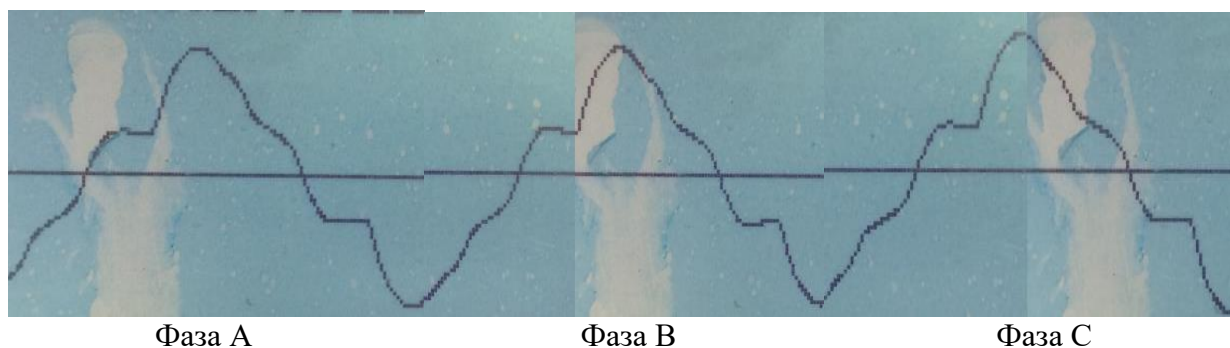


Рисунок 2.18 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 20 А

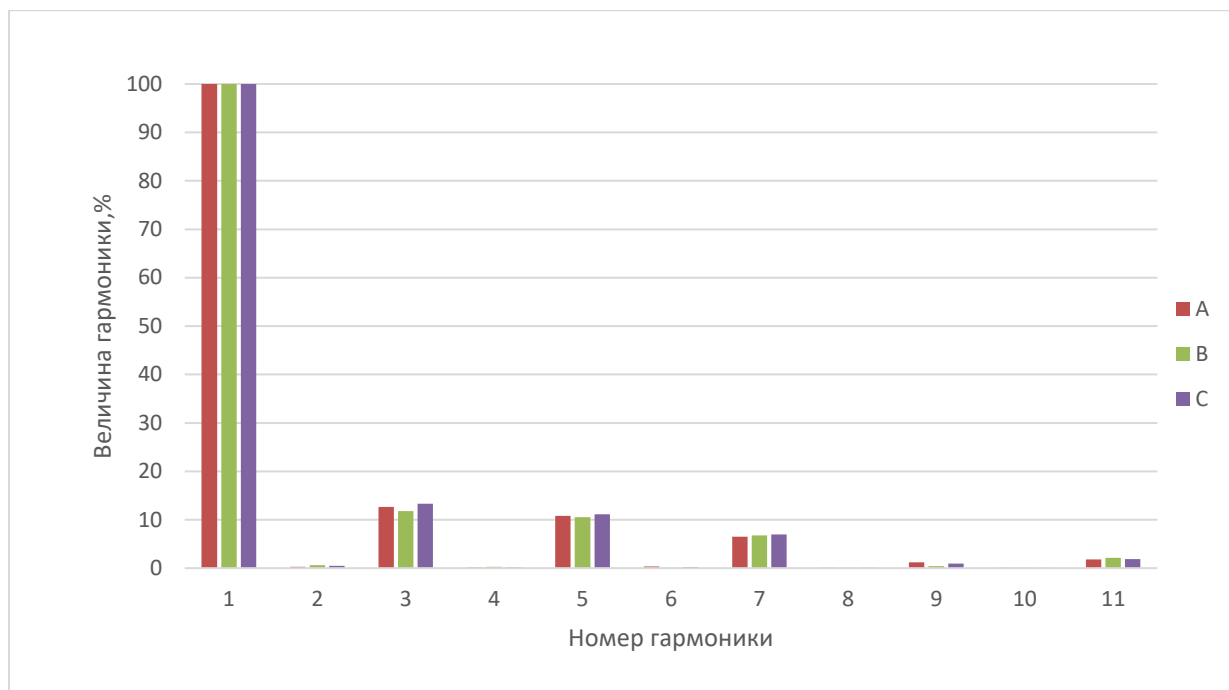


Рисунок 2.19 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 20 А

Сравнивая формы кривых при холостом ходе и подмагничивании магнитопровода реактора можно заметить снижение третьей гармоники до 11-12 % и увеличение пятой и седьмой до 32 % и 15 % соответственно.

Наличие дополнительных обмоток на модели позволяет оценить влияние сопротивления (числа витков) компенсационной обмотки на уровень симметрии сетевого тока и степень компенсации гармоник нулевой последовательности в сетевом токе реактора. С уменьшением количества витков компенсационной обмотки форма тока в сетевой обмотке существенно улучшается, уменьшается и несимметрия фазных токов, но полной компенсации гармоник кратных трем в сетевом токе нет и эти же гармоники присутствуют и в токе параллельных ветвей. Кроме того, в токе компенсационной имеет место первая гармоника.

Лучшие результаты с точки зрения симметрии фазных токов и компенсации гармоник тока сетевой обмотки кратных трем получены при использовании в качестве компенсационной четвертой обмотки модели с числом витков ($W = 31$), то есть относительно сетевой обмотки коэффициент трансформации должен быть не менее 8-9.

Вывод:

Анализируя графики на рисунках 2.12 – 2.19 можно сделать вывод о том, что при увеличении постоянного тока подмагничивания уровень гармоник значительно снижается. При разомкнутой компенсационной обмотке уровень гармоник составлял 49 %, при замкнутой 40 - 45 % (на холостом ходу). Общий уровень гармоник снижается при подмагничивании 15 А до $K = 19\%$. При подмагничивании 5 А эффект снижения общего уровня не наблюдается по причине роста пятой и седьмой гармоник.

Третья гармоника при режиме холостого хода составляла 26 % для фазы А и практически 40 % для двух других фаз. При подмагничивании 5 и 15 А третья гармоника снижается до 12 %, для всех фаз. Видно, что снижение третьей гармоники при подмагничивании имеет место быть до 5 А, далее при увеличении тока подмагничивания эффект снижения уровня гармоники снижается.

Что касается пятой и седьмой гармоник – при холостом ходе они незначительные, не доходят до 10 %. Однако при подмагничивании 5 А возрастают до 32 % и 15 % соответственно. При подмагничивании 15 А пятая и седьмая гармоники снижаются до 15 % и 5 % соответственно.

При холостом ходе в токе компенсационной обмотки присутствуют гармоники: третья – 99%, девятая – 27 % и пятнадцатая – 8%. При подмагничивании током 5 А в токе появляются четные гармоники – вторая гармоника 14%, четвертая – 25%, восьмая – 7% и так далее. Также появляются пятая – 37 %, седьмая – 10%. Девятая гармоника увеличивается до 99%, 15 до 66%, 21 до 12%. При подмагничивании 15 А картина не сильно меняется. Можно сделать однозначный вывод что при подмагничивании все гармоники кратные трем увеличиваются в разы, также появляются четные и 5 гармоники. Седьмая гармоника при подмагничивании уменьшается.

Экспериментальная часть диссертационного исследования выполнена на специализированном испытательном стенде с использованием физических моделей реакторов. Испытательная площадка полностью оборудована необходимым минимумом комплекса основного и вспомогательного оборудования и средств измерения. Экспериментальные исследования выполнены с присутствием гармоник в сети, а также с несимметрией напряжения.

Для проведения испытаний были использованы сертифицированные средства измерения, обеспечивающие минимальную погрешность измерений при получении результатов.

Помимо приведенных результатов экспериментальных исследований, было выполнено множество других исследований – исследование работы реактора на моделях ТСЗИ мощностью 1,6 кВА без изменения сечения стержней и ярем, исследование работы реактора при изменении напряжения обмоток. Все исследования, проведенные над моделями реакторов дают данные, подтверждающие теоретические выводы о работе УШР.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

3.1 Описание математической модели в программном комплексе Matlab Simulink

В настоящее время существует несколько методов математического моделирования ферромагнитных устройств. Наиболее часто используемыми являются аналитический метод, принцип двойственности электрических и магнитных цепей и имитационное моделирование [28, с.4; 55].

Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки, однако в настоящей работе используется именно метод имитационного моделирования из-за простоты и понятности работы. Существует два типа имитационного моделирования ферромагнитных устройств. Первый тип основан на использовании готовых имитационных моделей трансформаторов, содержащих характеристики насыщения стали, для моделирования работы шунтирующего реактора в различных программах - Matlab [56-67], PSCAD с использованием трансформаторов UMEC [68-70], EMTP и др. Ранее автором была проделана работа по моделированию работы шунтирующего реактора в программе PSCAD [40, с.5]. Этот метод не позволял непосредственно изменять размеры магнитопровода шунтирующего реактора и не подходил для дальнейшей работы из-за необходимости выполнять расчеты вольт-амперных характеристик моделей однофазных трансформаторов каждый раз при изменении параметров магнитопровода УШР.

Второй тип — это моделирование цепей с магнитной связью. Моделирование сводится к созданию моделей электрической и магнитной цепей, соединенных с помощью магнитного потока Φ . Этот метод моделирования был использован в [68, с.3; 69, с.4] с использованием Matlab Simulink, [67, с.3] с использованием EMTP и [70, с.3] с использованием Ansoft Maxwell. В настоящей работе для имитационного моделирования в Matlab Simulink применен тот же подход, но использовались блоки электромагнитного преобразователя (Electromagnetic converter) и линейного магнитного сопротивления, что облегчает процесс формирования модели и избавляет от необходимости составлять схему из большого количества блоков интегрирования, усиления и т.д.

Представленная ниже модель в среде Matlab Simulink позволяет не только оптимизировать конструкцию конкретного шунтирующего реактора, но и предоставляет возможность моделирования УШР другой конструкции, которая может быть лучше с точки зрения технических и экономических показателей.

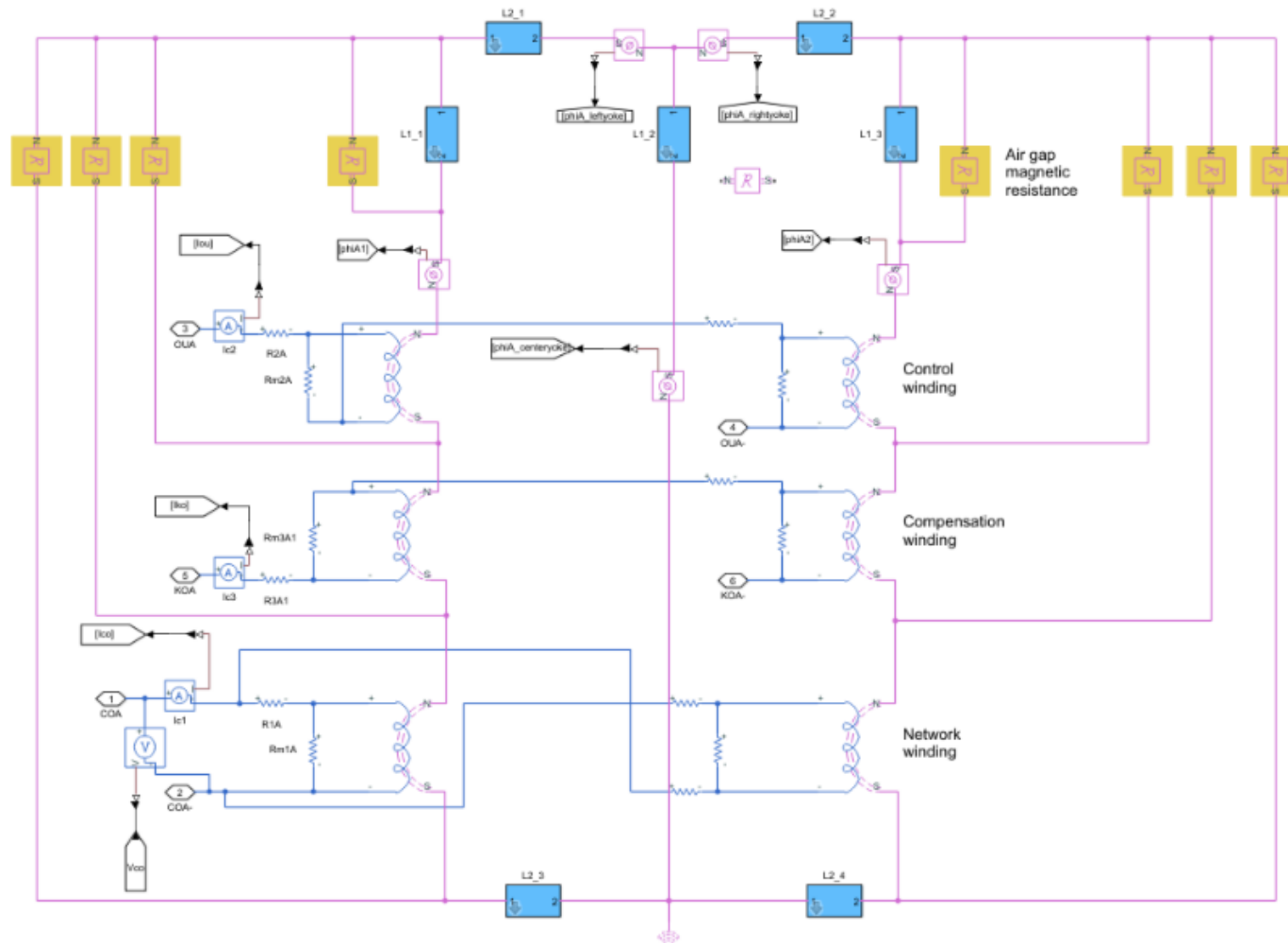


Рисунок 3.1 - Модель однофазного УШР с магнитной (розовой) и электрической (синей) цепями.

Моделирование основано на использовании блока электромагнитного преобразователя, который является интерфейсом между электрической и магнитной системами Simscape. Блок состоит из двух составляющих с двумя выводами на каждой: одна сторона подключается к электрической цепи, другая - к магнитной цепи.

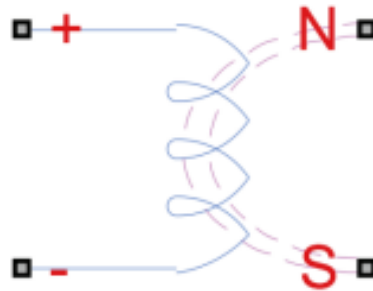


Рисунок 3.2 - Блок электромагнитного преобразователя библиотеки Simscape Foundation

Когда ток и напряжение подаются на электрическую сторону, поток и магнитодвижущая сила F генерируются на магнитной стороне и наоборот, в соответствии с известными законами:

$$\begin{cases} F = N \cdot I \\ U = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$

где: F – магнитодвижущая сила, ампервитки;

N - количество витков и обмоток моделируемого шунтирующего реактора;

I – ток, создаваемый обмоткой, А;

Φ – магнитный поток, Вб;

U - напряжение, В.

Поскольку блок представляет собой и имитирует работу обмоток УШР, количество витков различных блоков должно соответствовать реальным параметрам обмоток физической модели.

Все блоки электромагнитных преобразователей имеют магнитное сопротивление, параллельное блоку электромагнитных преобразователей, установленному на магнитной стороне. Это сопротивление было установлено для моделирования утечки магнитного потока в воздушном зазоре между обмотками и между обмоткой и магнитопроводом УШР. В параметрах блока магнитного сопротивления указаны относительная магнитная проницаемость окружающей среды, длина и поперечное сечение зазора.

Электрическая схема состоит из 6 блоков электромагнитного преобразователя с их сопротивлениями. Каждая пара блоков электромагнитного преобразователя представляет собой обмотки шунтирующего реактора (сетевую, компенсационную и обмотку управления). Сопротивления R_{3A1} , R_{2A} и R_{1A} эквивалентны электрическому

сопротивлению вышеуказанных обмоток.

Сопротивления R_{m1A} , R_{m3A1} и R_{m2A} являются магнитными сопротивлениями, которые моделируют потери в магнитопроводе УШР. Каждая пара обмоток (сетевая, компенсационная и управления) имеет по одному датчику однофазного тока (амперметру) для каждой фазы для измерения тока, протекающего в УШР, и вольтметр для измерения значения напряжения на каждой обмотке.

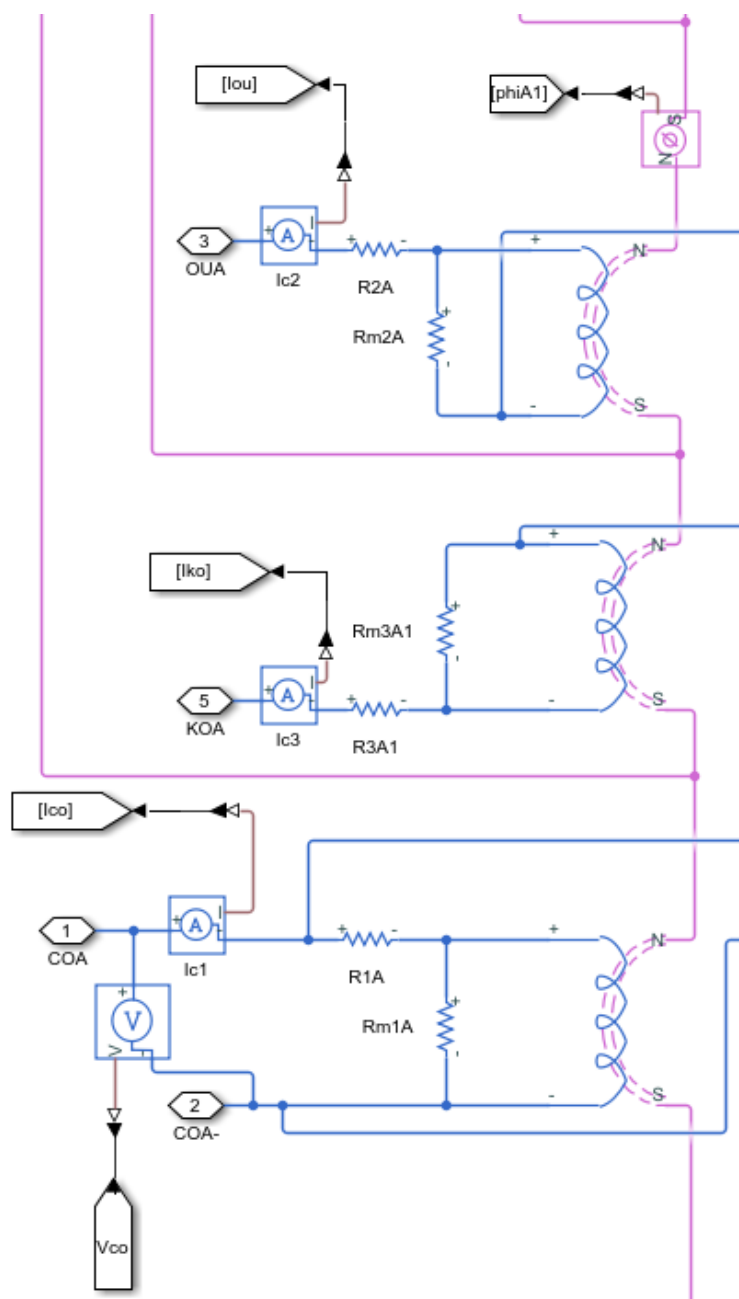


Рисунок 3.3 – Увеличенная фаза обмотки управления и компенсационной, сетевой обмоток

Магнитопровод представляет собой трехстержневой сердечник. Электрическая схема замещения магнитопровода показана на рисунке 3.4, где: F_{CO} , F_{OU} , F_{KO} – источники магнитодвижущей силы на каждой обмотке

УШР;

$R_{ст}$ и $R_{я}$ – магнитное сопротивление стержней и ярем магнитопровода соответственно.

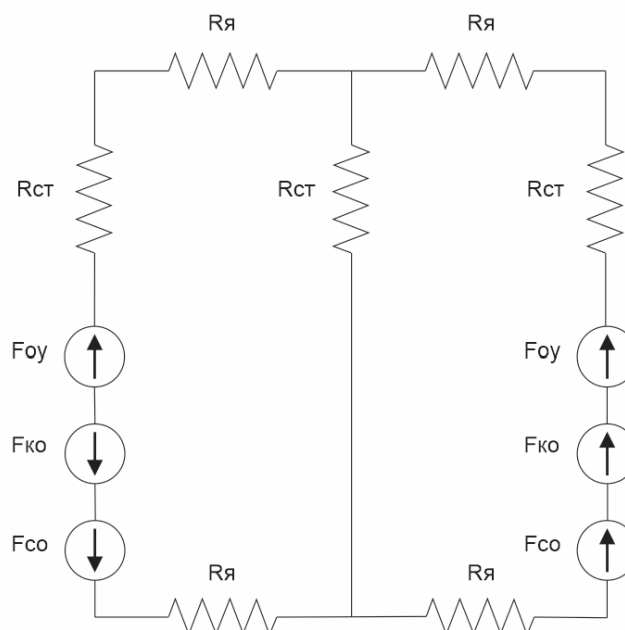


Рисунок 3.4 - Электрическая схема замещения магнитопровода MCR

Сравнивая рисунок 3.1 с рисунком 3.4, мы можем видеть, что синие блоки в магнитной цепи на первом рисунке представляют собой сопротивление стержня или ярма. Эти сопротивления являются переменными сопротивлениями, смоделированными с помощью управляемого источника магнитодвижущей силы и обратной связи по магнитному потоку.

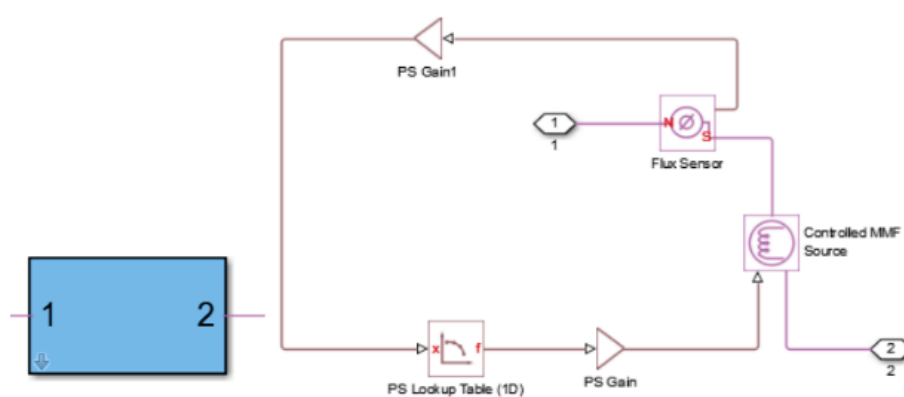


Рисунок 3.5 - Подсистема модели сопротивления магнитопровода (слева) и расширенная (справа)

Сигнал обратной связи формируется, начиная с измерения магнитного

потока (на рисунке 3.5 показан датчик магнитного потока). Величина магнитного потока делится (на рисунке 3.5 обозначен блок усиления PS1) на поперечное сечение стержней и ярем магнитопровода шунтирующего реактора для получения индукции:

$$\Phi = B \cdot S \rightarrow \frac{\Phi}{S}$$

Затем значение индукции передается в блок PS Look up Table, где моделируется характеристика намагничивания стали и выводится соответствующая напряженность поля Н для входного значения индукции В. Наконец, значение напряженности поля Н умножается на длину соответствующей части магнитопровода (на рисунке 5 показан коэффициент усиления PS).

Блок PS Look up Table позволяет учитывать характеристику намагничивания УШР (кривая В-Н). При использовании этого блока нет необходимости выполнять расчеты для имитации насыщения шунтирующего реактора с использованием вольт-амперной характеристики, как это было сделано при моделировании шунтирующего реактора в программном комплексе PSCAD.

Также в модели представлено линейное сопротивление воздушного зазора между обмотками и между обмоткой и магнитопроводом УШР. Представлено оно с помощью блока магнитного сопротивления, где указываются относительная магнитная проницаемость среды, длина и поперечное сечение зазора.

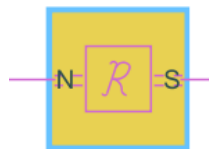


Рисунок 3.6 – Линейное магнитное сопротивление

После описания основных элементов однофазной схемы исполнения модели в Matlab, далее приступаем к описанию трехфазной схемы модели и к непосредственной работе с моделью.

Для выполнения имитационной модели трехфазной группы шунтирующего реактора в Matlab была использована маска подсистемы block - а. Каждая маска подсистемы содержит однофазную модель MCR. Блок имеет редактируемое диалоговое окно, в котором можно задать все параметры однофазного шунтирующего реактора. В диалоговом окне задаются размеры магнитопровода, кривая намагничивания стали, количество витков сетевой, компенсационной обмоток и обмотки управления.

На рисунке 3.7 показаны три макроблока, соединенных в соответствии со схемой на рисунке 1.3: источник постоянного тока, источник трехфазного напряжения и блок конфигурации алгебраического решателя ($f(x)=0$).

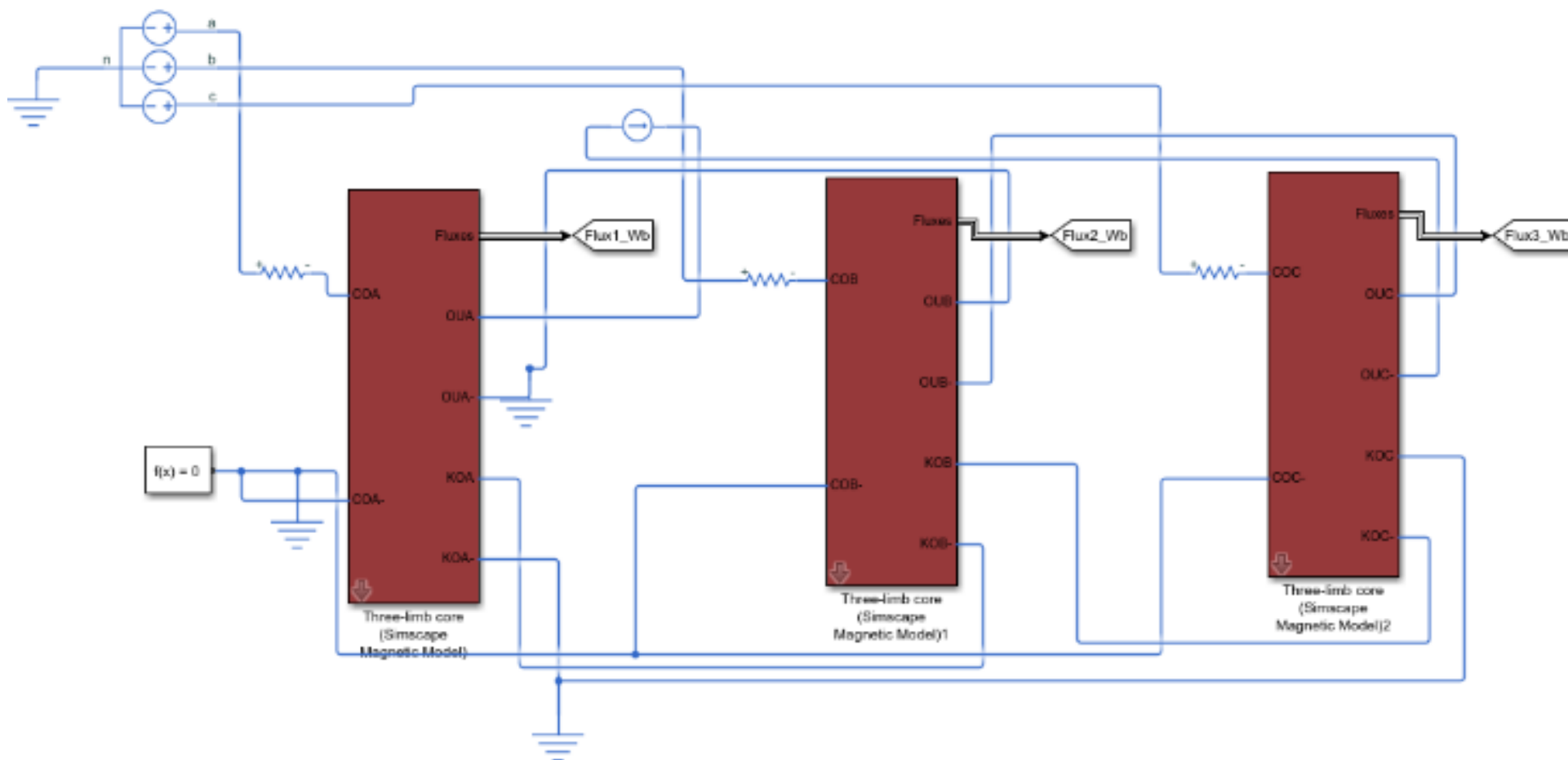


Рисунок 3.7 - Общая схема модели шунтирующего реактора с групповым управлением

Процесс моделирования напрямую зависит от правильного ввода параметров моделей УШР. Одним из основных параметров моделирования является кривая намагничивания и ее аппроксимация в программном комплексе Matlab Simulink.

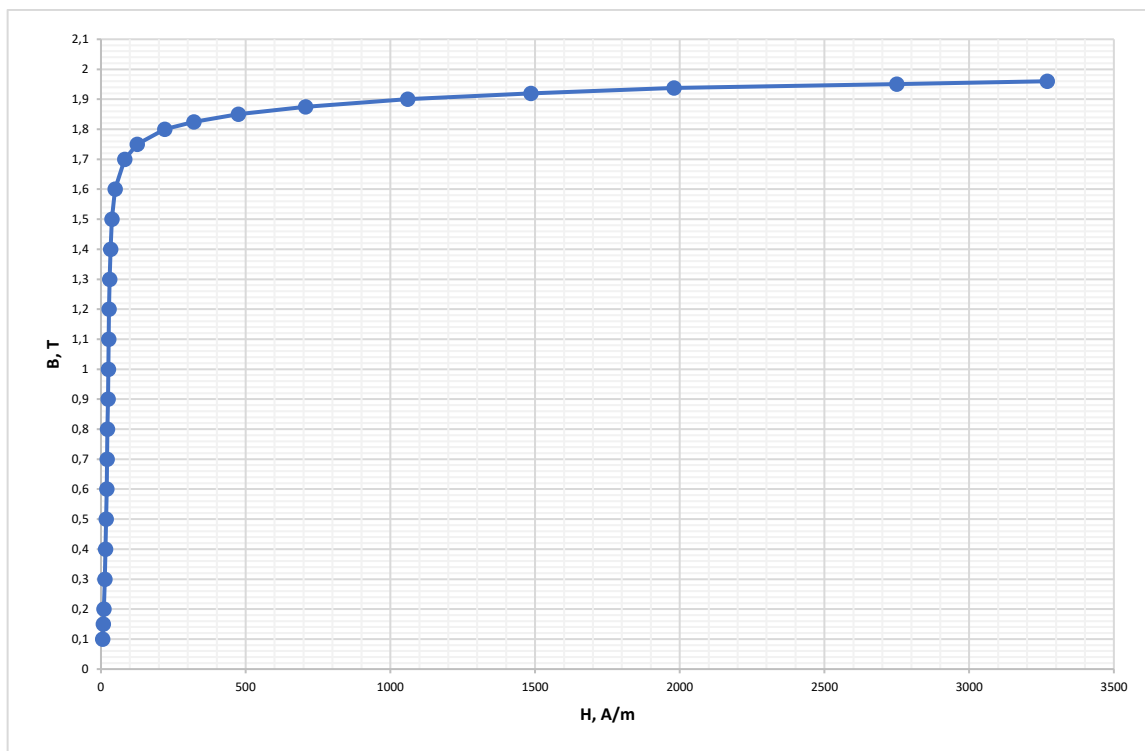
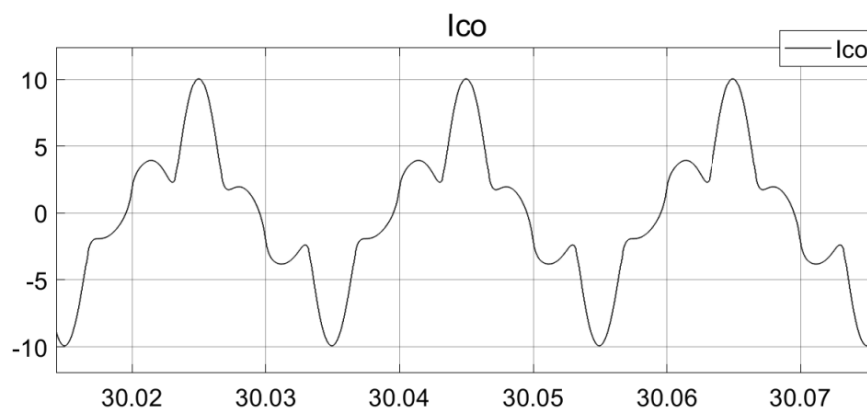


Рисунок 3.8 - Кривая намагничивания стали марки 3409 толщиной 0,27 мм

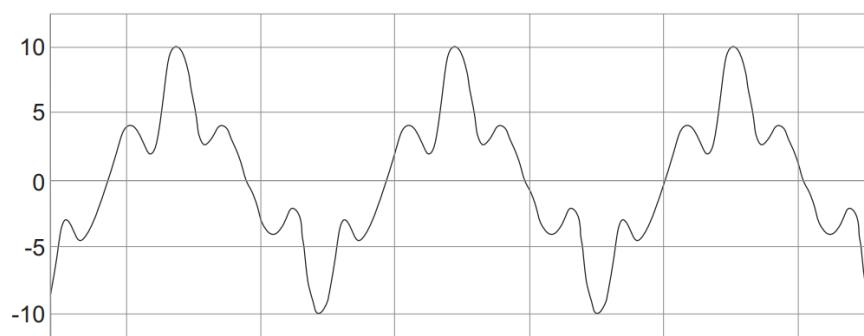
3.2 Проверка полученных результатов моделирования работы трехфазного УШР в Matlab Simulink с экспериментальными исследованиями.

Модель шунтирующего реактора, разработанную в среде Simulink, необходимо проверить на соответствие физической модели УШР. С этой целью результаты моделирования сравниваются с результатами экспериментальных исследований. Результаты сравнения экспериментальных и данных моделирования обобщены и приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Ниже приведены кривые тока сетевой обмотки при различных режимах намагничивания постоянным током, полученные по результатам моделирования и экспериментальных исследований. Кривые тока, полученные по результатам экспериментальных исследований, отрисованы в цифровом формате для удобства сравнения с результатами моделирования. При этом масштаб и форма кривых сохранены.

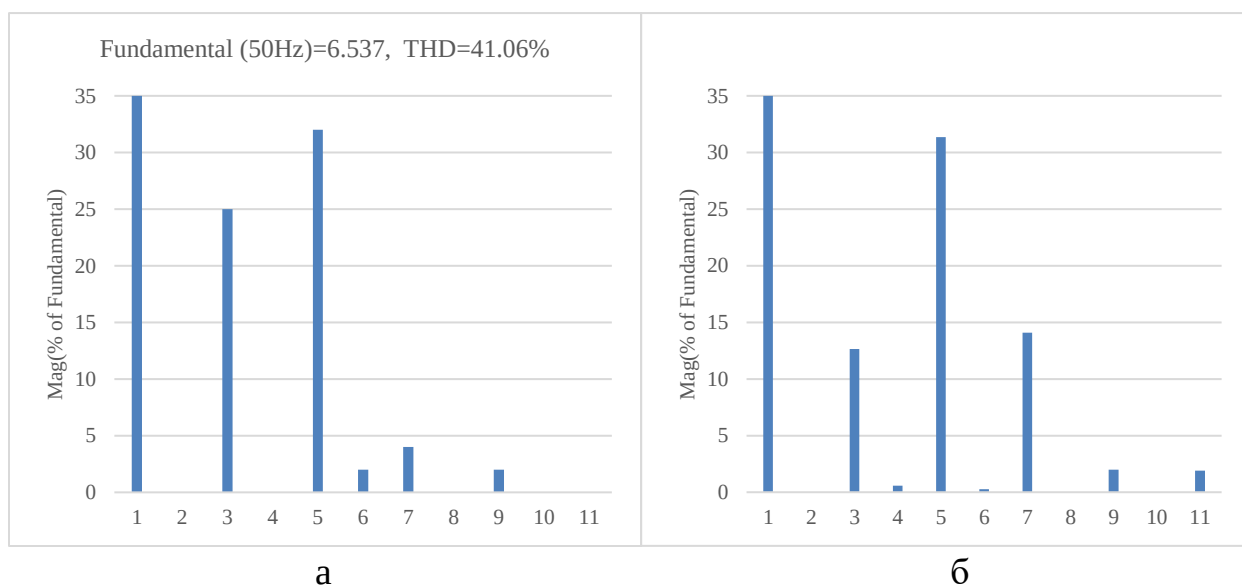


а



б

Рисунок 3.9 - Кривые токов сетевой обмотки при подмагничивании 5 А ($F_0 = 465$ ампер-витков) математической модели (а) и физической модели (б).



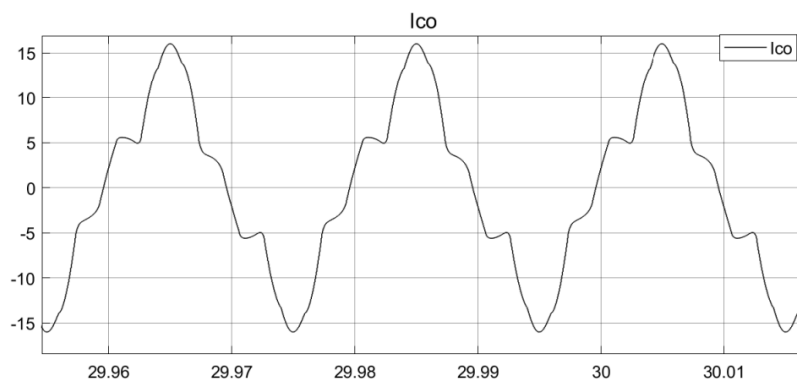
а

б

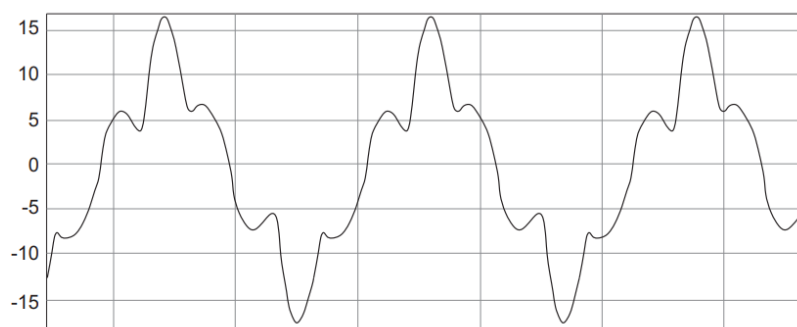
Рисунок 3.10 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 5 А ($F_0 = 465$ ампер-витков), математической модели (а) и физической модели (б).

Коэффициент гармоник (THD) по результатам экспериментальных

исследований составляет 39,5%. По результатам имитационного моделирования он составляет 41,0%.

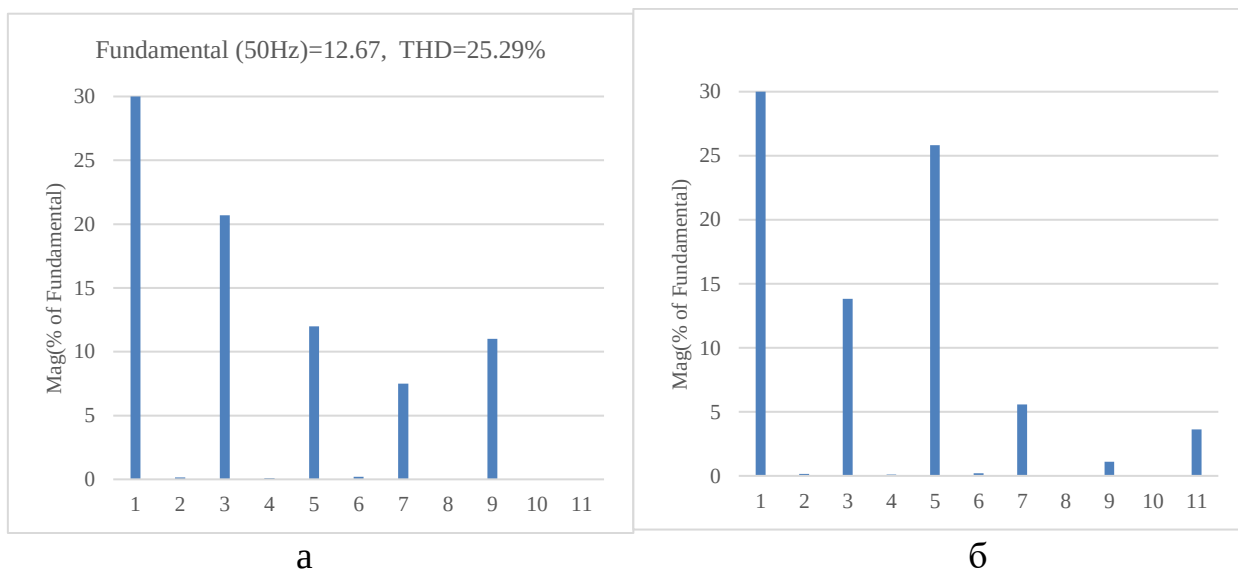


а



б

Рисунок 3.11 - Кривые токов сетевой обмотки при подмагничивании 10 А ($F_0 = 930$ ампер-витков) математической модели (а) и физической модели (б)

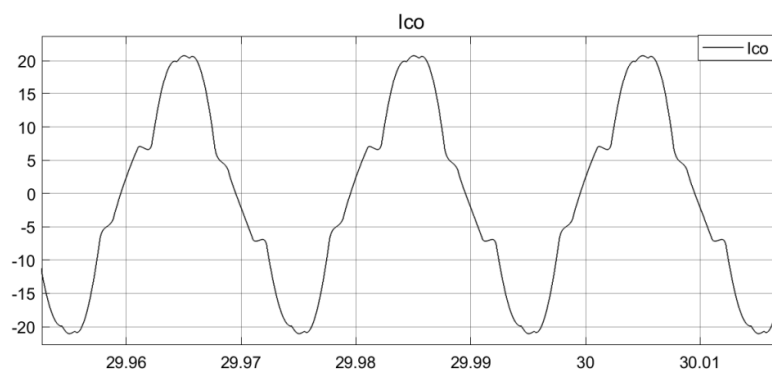


а

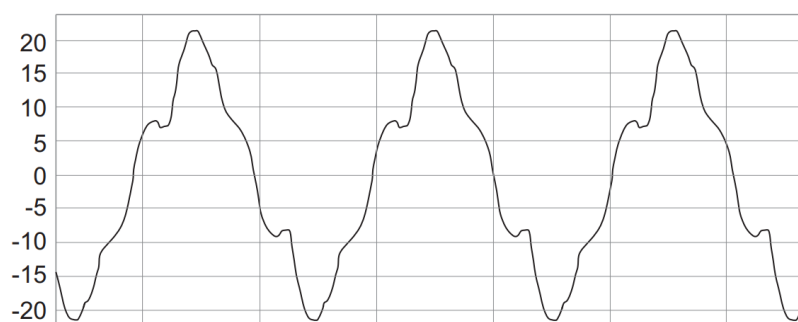
б

Рисунок 3.12 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 10 А ($F_0 = 930$ ампер-витков), математической модели (а) и физической модели (б)

Коэффициент гармоник по результатам экспериментальных исследований составляет 26,4%. По результатам имитационного моделирования он составляет 25,4%.

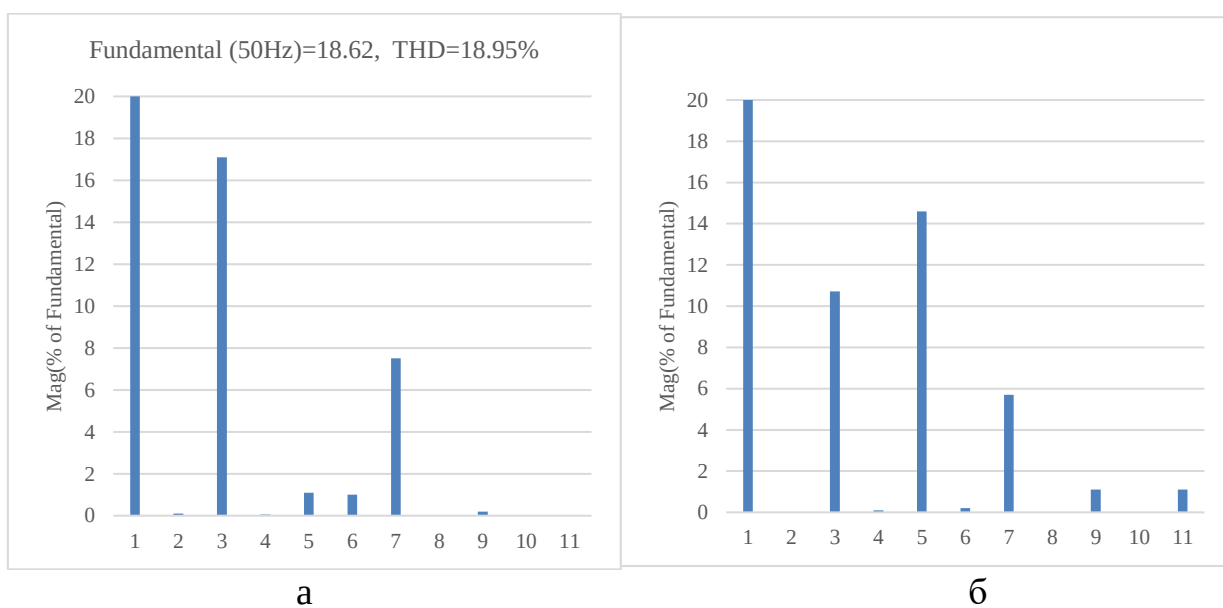


а



б

Рисунок 3.13 - Кривые токов сетевой обмотки при подмагничивании 15 А ($F_0 = 1395$ ампер-витков) математической модели (а) и физической модели (б)



а

б

Рисунок 3.14 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 15 А ($F_0 = 1395$ ампер-витков), математической модели (а) и физической модели (б)

Коэффициент гармоник по результатам экспериментальных исследований составляет 19,1%. По результатам имитационного моделирования он составляет 19,2%.

Обобщаем анализ результатов сравнения в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных исследований

Ток подмагничивания, А	Ток сетевой обмотки при экспериментальных исследованиях, А	Ток сетевой обмотки при моделировании, А	Отклонение, %
0	0,9	0,8	6,8
5	5,8	6,2	5,0
10	10,1	10,6	5,0
15	15,7	16,2	3,2

Таблица 3.2 – Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных исследований

Ток подмагничивания, А	THD при экспериментальных исследованиях, %	THD при моделировании, %	Отклонение, %
0	-	-	-
5	39,5	41,0	3,7
10	26,4	25,4	3,7
15	19,1	19,2	0,03

В работе [11, с.84] было отмечено, что принцип полупериодного насыщения работает, если результирующая индукция, которая создается сетевой обмотки и обмоткой управления, в стержнях будет больше индукции насыщения стали ровно на половину периода. Как видно из рисунка 3.15, когда магнитопровод моделей шунтирующего реактора намагничивается постоянным током 15 А в стержнях магнитопровода, результирующая индукция превышает индукцию насыщения стали всего на четверть периода.

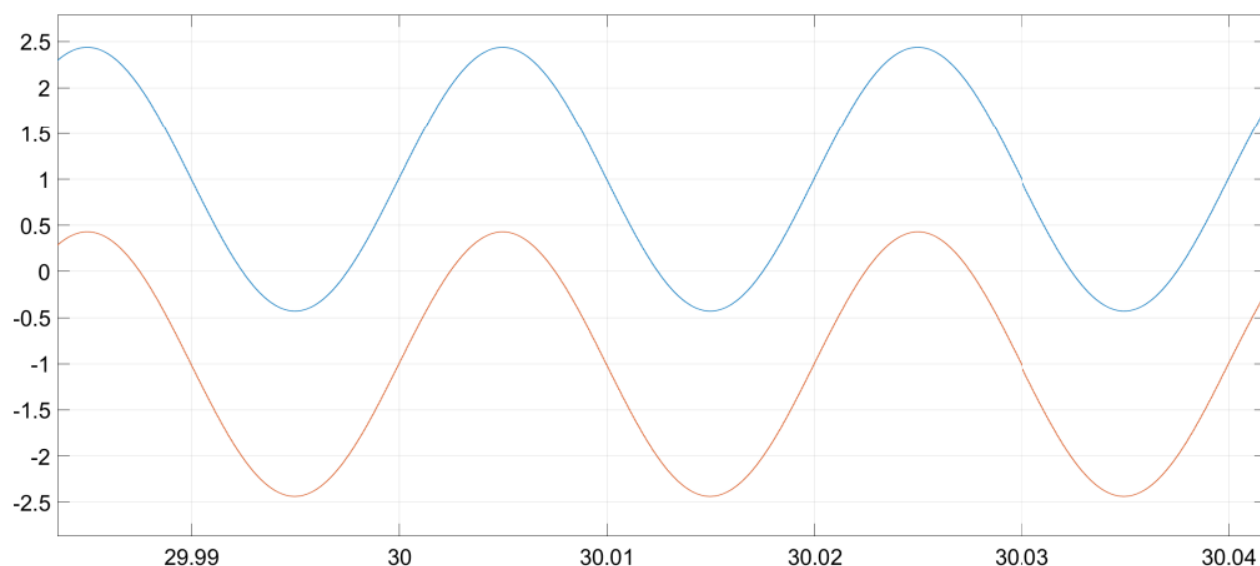


Рисунок 3.15 - Индукция в стержнях шунтирующего реактора при подмагничивании 15 А ($F_0 = 1395$ ампер-витков)

В связи с этим было выполнено еще одно моделирование с увеличением постоянного тока в обмотке управления до тех пор, пока индукция в стержнях не увеличится до требуемого значения. Аналогичные экспериментальные исследования не проводились по причине того, что сетевая обмотка физических моделей выполнена из тонкого провода сечением 1 мм². Конечное значение постоянного тока в обмотке управления составило 90 А. Дальнейшее увеличение постоянного тока в обмотке управления увеличивает состав гармоник тока сетевой обмотки.

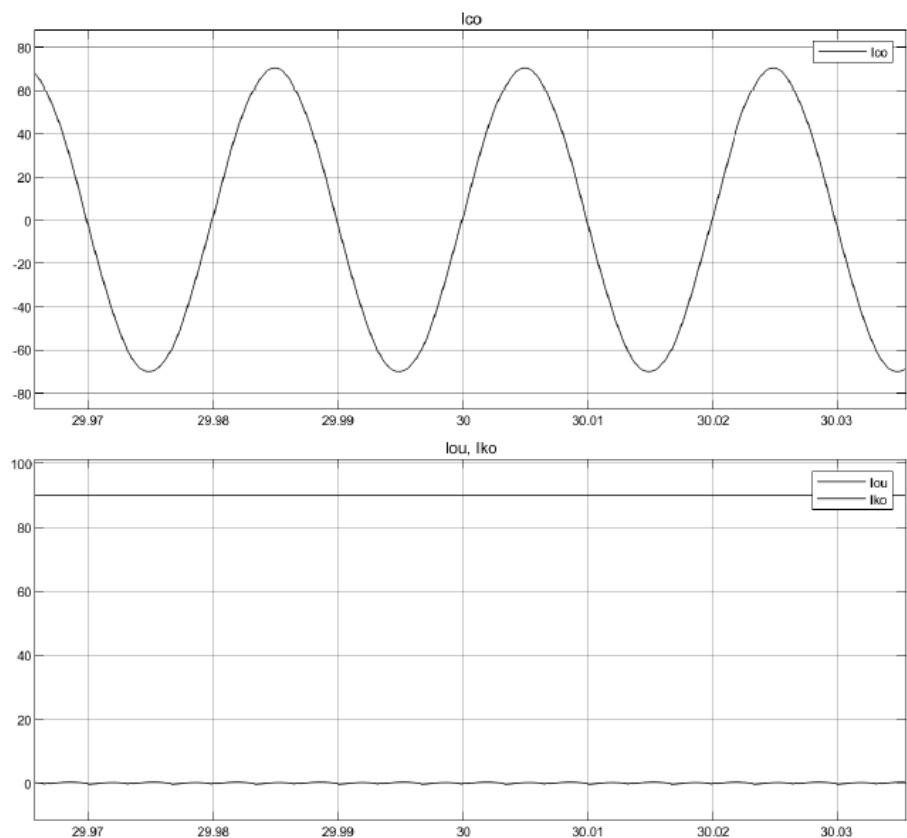


Рисунок 3.16 - Кривая тока сетевой обмотки при подмагничивании постоянным током 90 А ($F_0 = 8370$ ампер-витков), полученная на математической модели

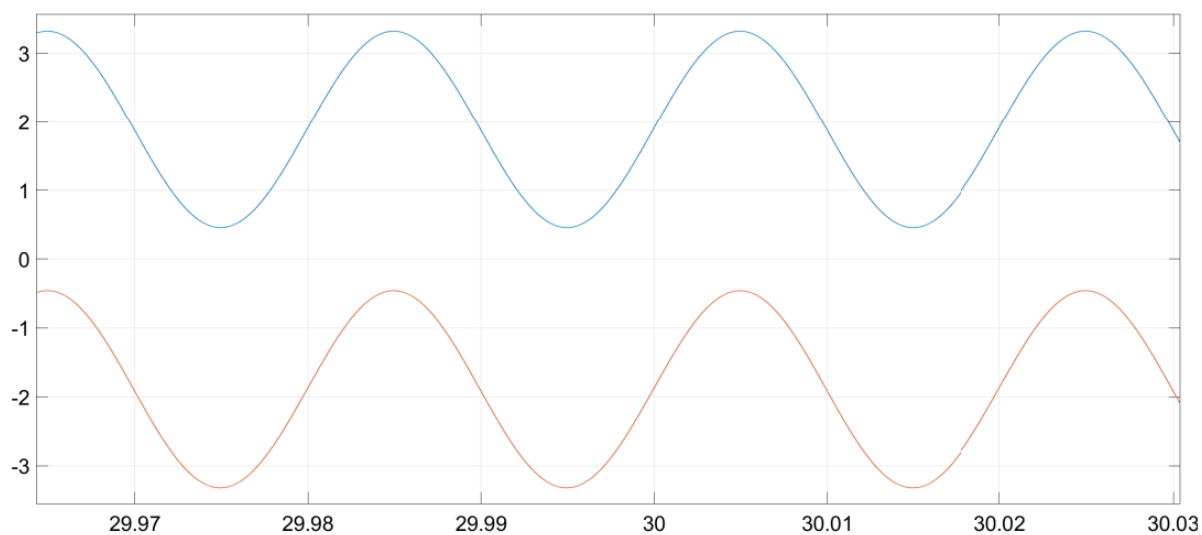


Рисунок 3.17 - Индукция в стержнях шунтирующего реактора при подмагничивании постоянным током 90 А ($F_0 = 8370$ ампер-витков)

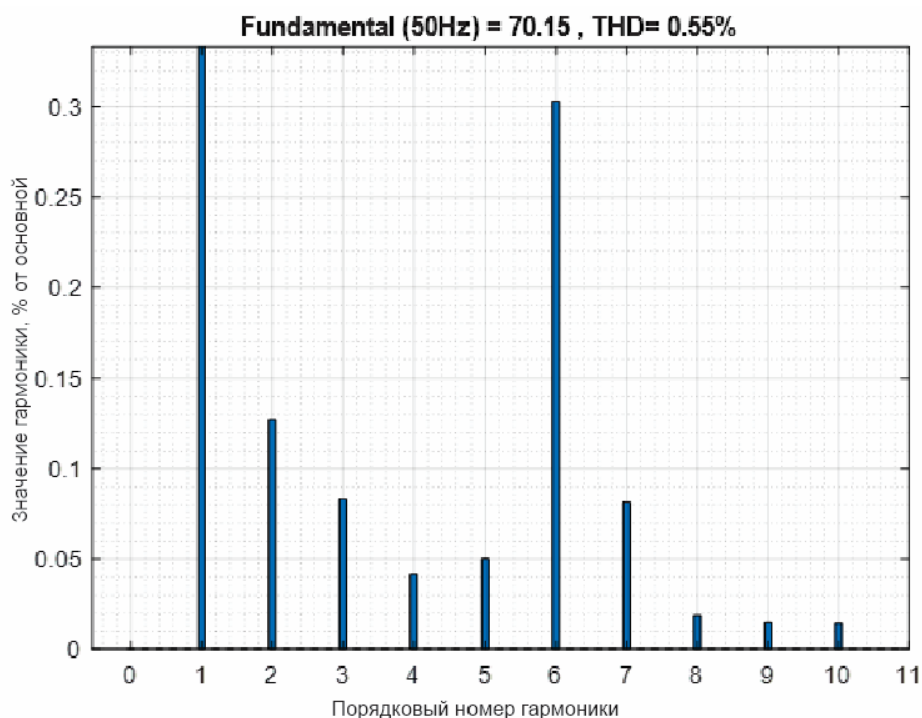


Рисунок 3.18 - Гармонический состав действующего значения тока сетевой обмотки при подмагничивании постоянным током 90 А ($F_0 = 8370$ ампер-витков), полученный на математической модели

Как показывают результаты, применение режима полупериодного насыщения на трехстержневом магнитопроводе шунтирующего реактора показывает отличные результаты. Для уменьшения токов сетевой обмотки и обмотки управления необходимо оптимизировать размер магнитопровода шунтирующего реактора. Дальнейшие исследования по оптимизации планируется проводить только на математической модели. Нет необходимости разрабатывать новые физические модели, поскольку имитационная модель адекватна.

3.3 Выводы и анализ результатов моделирования

Модель в Matlab Simulink позволяет усовершенствовать существующий аналог модели шунтирующего реактора путем изменения параметров магнитопровода и обмоток. Несмотря на то, что отклонение между суммарными коэффициентами гармоник тока сетевой обмотки при моделировании и экспериментальных исследованиях на всех уровнях подмагничивания является приемлемым, существует разница в самих гармонических составляющих. Этот результат можно объяснить наличием в ходе экспериментальных исследований таких факторов, как несимметрия напряжения сети, несинусоидальность кривой напряжения, суммарный коэффициент гармоник напряжения сети составил 2%.

При проведении экспериментальных исследований, в сети,

подключенной к физическим моделям реакторов, были зафиксированы гармоники напряжения 3-го и 5-го порядков. Гармонический состав напряжений сети представлен на рисунке 3.19.

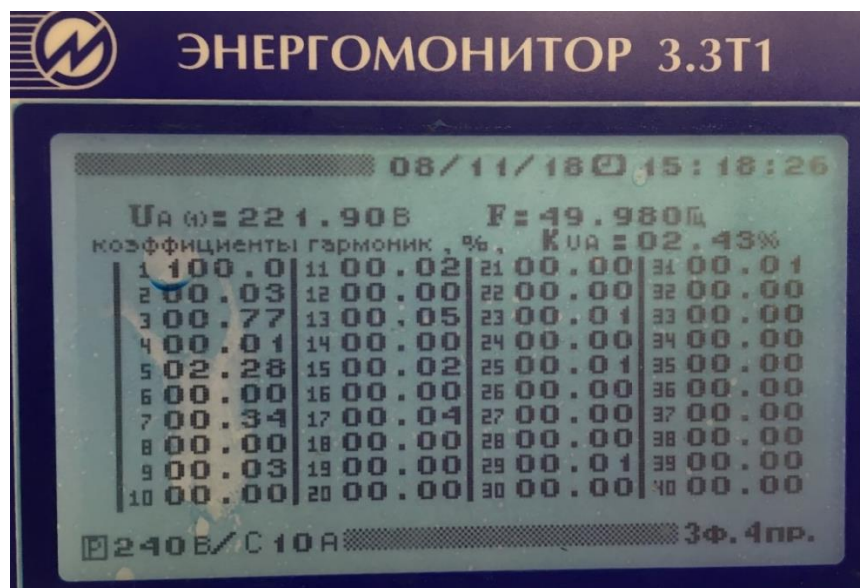


Рисунок 3.19 – Гармонический состав напряжения фазы А сети

При проведении экспериментальных исследований, помимо присутствия в сети 0,4 кВ гармоник напряжения, была зафиксирована также несимметрия напряжения сети.

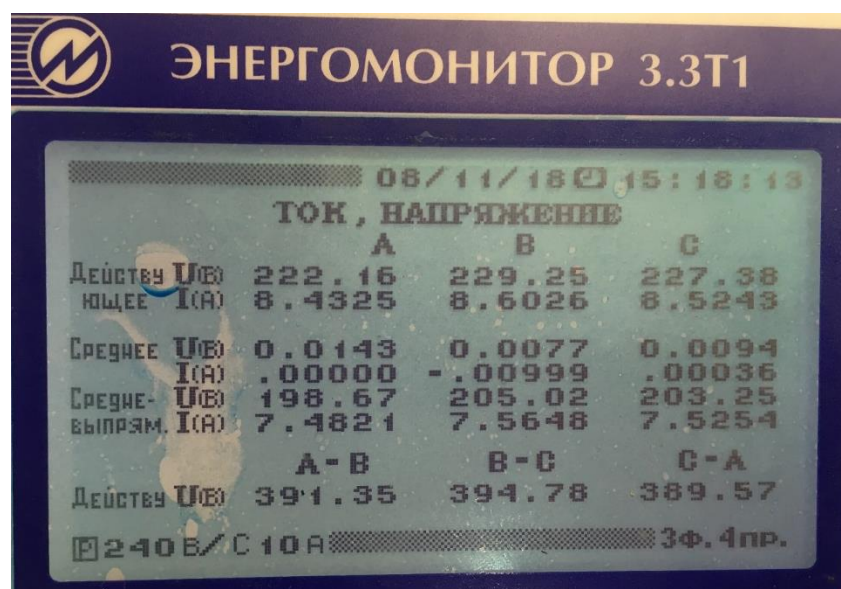


Рисунок 3.20 – Значение напряжения сети при проведении экспериментальных исследований (напряжение фаз A=222,2 В, B=229,3 В, C = 227,4 В)

Тем не менее, полученные результаты позволяют использовать полученную модель для разработки и оптимизации параметров шунтирующего

реактора различных конструкций и мощности. Применение принципа полупериодного насыщения для трехстержневой конструкции магнитопровода имеет смысл.

Выводы:

В представленном разделе была подробно описана методика моделирования управляемых шунтирующих реакторов. Была смоделирована работа шунтирующего реактора с трехстержневым магнитопроводом мощностью 1,6 кВА и напряжением 220 В. Сравнение результатов имитационного моделирования с результатами экспериментальных исследований проводилось при всех уровнях тока подмагничивания, а именно от 0 до 15 А. Для учета нелинейных свойств материала магнитопровода использовалась аналитическая аппроксимация основной ветви намагничивания. Адекватность модели подтверждается совпадением результатов моделирования и результатов экспериментальных исследований.

Результаты расчетов подтверждают, что в номинальном режиме потребления реактивного тока при полупериодном насыщении стержней магнитопровода в сетевой обмотке практически отсутствуют составляющие высших гармоник и отсутствует ток в компенсационной обмотке.

Промежуточные режимы потребления реактивной мощности сопровождаются появлением гармонических составляющих в токе сетевой обмотки и током в компенсационной обмотке.

4 УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕАКТОР С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ (УШР) НА ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ МАГНИТОПРОВОДАХ

Как электромагнитные аппараты, управляемые реакторы характеризуются уровнем расхода активных материалов, размерами и уровнем потерь мощности, которые тесно связаны с величиной плотности тока в обмотках, магнитной индукции по участкам магнитопровода, постоянной составляющей поля подмагничивания и интенсивностью внешнего магнитного поля.

В теории электрических машин эти показатели объединены в понятие «машинная постоянная», которая позволяет определить геометрические размеры при заданных электромагнитных нагрузках. Однако применительно к управляемым реакторам такой подход к расчету при отсутствии достаточного опыта проектирования вряд ли приемлем.

Исходя из высокой степени конструктивной и электромагнитной аналогии управляемых реакторов с силовыми трансформаторами и возможности использовать для управляемых реакторов магнитопроводы силовых трансформаторов, более целесообразно вести расчет по принципу «мощность на стержень» с дальнейшим анализом возможной вариации параметров. При этом предполагается, что при заданных магнитной индукции и размерах стержня мощности на стержень трансформатора и реактора приблизительно равны. Это позволяет сразу определить основные геометрические размеры при заданной мощности.

Существует технологическая возможность изготовления управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током на Кентауском трансформаторном заводе на классы напряжения 35 кВ по 110 кВ мощностью 25 МВАр в пофазном исполнении.

Возможность использования для управляемых реакторов технологии изготовления, конструкции магнитопровода и обмоток типовых трансформаторов соответствующей мощности и напряжения исключает необходимость подробного электромагнитного расчета с выбором электромагнитных нагрузок и оптимизацией конструкции и сводится к выбору мощности трансформатора и проверке возможности использования его в качестве фазы реактора с учетом схемных и конструктивных особенностей.

Каждая фаза управляемого реактора может быть изготовлена как на трех стержневых магнитопроводах, согласно рисунка 1.3, так и на четырех стержневых магнитопроводах броневого типа, согласно рисунка 1.4 б. И в том и в другом случае в качестве рабочих стержней используются два стержня, в первом случае два крайних, во втором - два средних, которые фактически выполняют роль полуфазы или полустержней.

4.1 Расчет основных параметров реактора

Исходя из номинальной мощности и тока фазы УШР

$$Q_{P\phi} = \frac{25}{3} = 8,333 \text{ МВАр}$$

$$I_{P\phi} = \frac{Q_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{8,333 \cdot 10^3}{66,398} = 125,5 \text{ А}$$

рассчитываем номинальную мощность полуфазы и номинальный ток полуфазы УШР

$$Q_{П\phi} = \frac{25}{3 \cdot 2} = 4,166 \text{ МВАр}$$

$$I_{П\phi} = \frac{Q_{П\phi}}{U_{\phi}} = \frac{4,166 \cdot 10^3}{66,47} = 62,7 \text{ А}$$

По результатам анализа технических характеристик трансформаторов производства Кентауского трансформаторного завода, было принято решение что при изготовлении УШР могут быть использованы магнитопроводы и обмотки трансформатора ТДТН 10000-110/35/10 с алюминиевыми обмотками со следующими техническими характеристиками:

диаметр стержня - 394 мм;

сечение стержня - 0,115526 м² при толщине листа стали – 0,3 мм;

индукция в стержне и ярмах - 1,68 Тл;

ток холостого хода – 0,3 %;

номинальный фазный ток первичной обмотки ВН

$$I_{\phi ВН} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{3,333 \cdot 10^3}{66,47} = 50,14 \text{ А}$$

количество витков обмотки ВН - 1618;

номинальная намагничивающая сила первичной обмотки

$$F_{\phi ВН} = I_{\phi ВН} \cdot W_{\phi ВН} = 50,14 \cdot 1618 = 81127 \text{ ампер – витков}$$

номинальный ток обмотки СН

$$I_{\phi СН} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{3,333 \cdot 10^3}{21,7} = 153,6 \text{ А}$$

количество витков обмотки СН – 514;

номинальная намагничивающая сила обмотки СН

$F_{\Phi CH} = I_{\Phi CH} \cdot W_{\Phi HH} = 153,6 \cdot 514 = 79950,4$ ампер – витков
номинальный ток обмотки НН, соединенной в треугольник

$$I_{\Phi HH} = \frac{S_{\Phi}}{U_{\Delta}} = \frac{3,333 \cdot 10^3}{10,5} = 317 \text{ А.}$$

количество витков обмотки НН – 268;

номинальная намагничивающая сила обмотки НН

$$F_{\Phi HH} = I_{\Phi HH} \cdot W_{\Phi HH} = 317 \cdot 268 = 84960 \text{ ампер – витков}$$

Геометрические размеры магнитопровода трансформатора приведены на рисунке 4.1

Для УШР принимаем такое же значение индукции в рабочих стержнях магнитопровода, что и у трансформатора ТДТН 10000-110/35/10. В качестве сетевой обмотки УШР принято решение использовать обмотку ВН, в качестве компенсационной обмотки - обмотку СН и в качестве обмотки управления - обмотку НН с такими же числами витков, следовательно необходимо увеличить сечение сетевой и управляющей обмоток в 1,25 раза. Кроме этого, при реализации схемы, приведенной на рисунке 1.3, может понадобиться увеличение сечения сетевой обмотки, в связи с возможным протеканием по контуру параллельных ветвей четных гармоник.

Что касается компенсационной обмотки, то ее сечение может быть уменьшено практически втрое, в соответствии с максимальным значением тока третьей гармоники. В случае использования совмещения обмоток управления и компенсационной, согласно рисунка 1.6, сечение провода необходимо выбрать с учетом и протекания тока третьей гармоники, тока управления и мощности нагрузки.

Это допустимо, вследствие отсутствия в фазе реакторе третьего рабочего стержня и отсутствия регулировочных частей обмоток.

Таблица 4.1 – Паспортные данные трансформатора ТДТН-10000/110

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение короткого замыкания, %			Ток Х.Х., %
		ВН	СН	НН		Х.Х.	К.З.	ВН - СН	ВН - НН	СН - НН	
ТДТН-10000/110	10000	11,5	38,5	6,6 ; 11	Ун//УнД-0-11	11,5	76	10,5	17,5	6,5	0,3

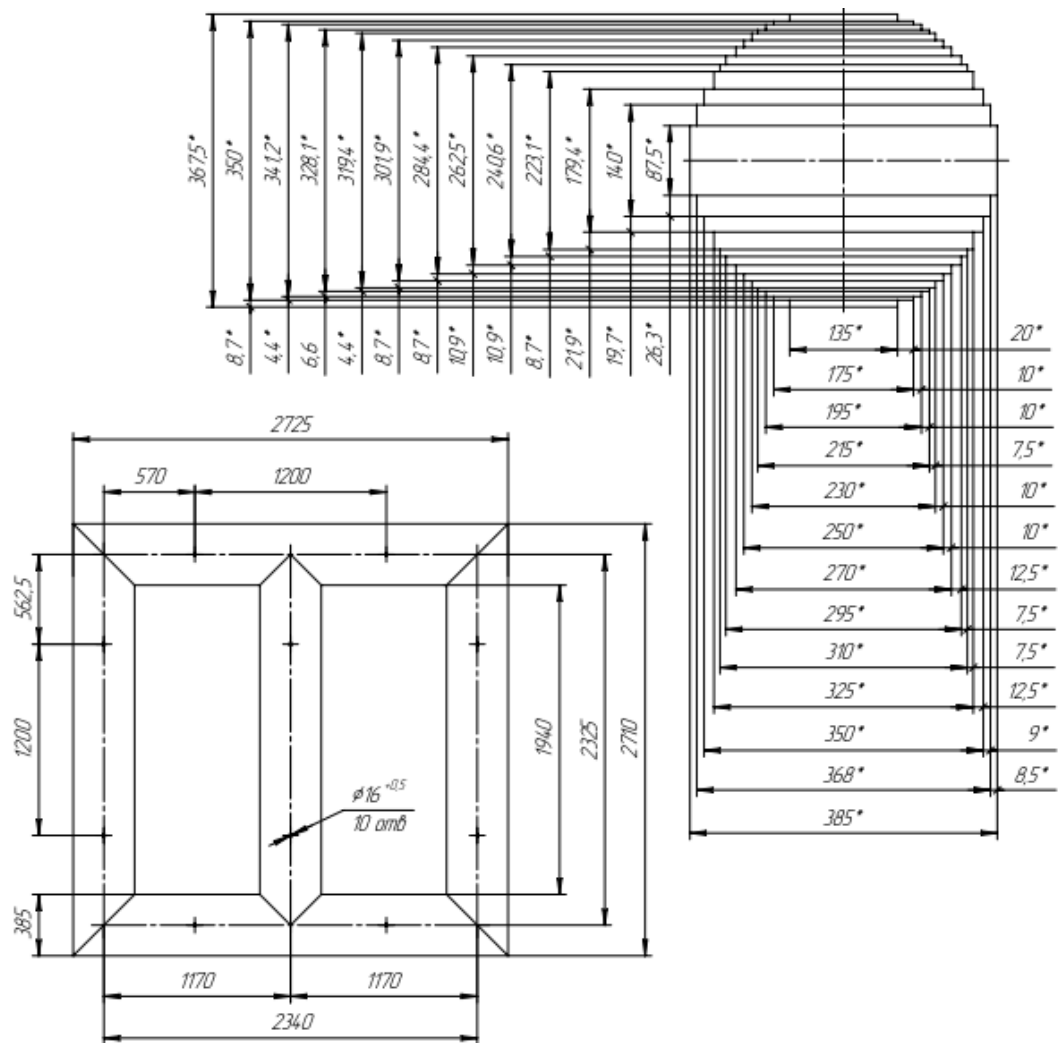


Рисунок 4.1 – Геометрические размеры магнитопровода, трансформатора ТДТН 10 000 -110/35/10 с алюминиевыми обмотками

Коэффициент использования трансформаторов ТДТН 10000/110/35/10 равен по мощности

$$\kappa_u = \frac{Q_{\Phi P}}{3 \cdot S_{TP}} = \frac{25}{30} = 0,83$$

Что касается возможности использования в качестве фазы управляемого реактора трансформатора ТДТН 16000 110/35 /10, то его можно использовать в качестве фазы реактора без изменения параметров обмоток, однако коэффициент его использования будет значительно ниже.

1. Номинальный фазный ток первичной обмотки ВН трансформатора

$$I_{\Phi BH} = \frac{S_{\Phi}}{U_{\Phi}} = \frac{5,333 \cdot 10^3}{66,47} = 80,2 \text{ А.}$$

2. Номинальный ток обмотки НН, соединенной в треугольник

$$I_{\Phi HH} = \frac{S_{\Phi}}{U_{\Delta}} = \frac{5,333 \cdot 10^3}{10,5} = 507,9 \text{ А.}$$

2. Номинальная намагничивающая сила первичной обмотки

$$F_{\Phi BH} = I_{\Phi BH} \cdot W_{\Phi BH} = 80,23 \cdot 1280 = 102694 \text{ ампер – витков}$$

3. Номинальная намагничивающая сила обмотки НН

$$F_{\Phi HH} = I_{\Phi HH} \cdot W_{\Phi HH} = 507,9 \cdot 212 = 107675 \text{ ампер – витков}$$

Коэффициент использования трансформаторов

$$\kappa_u = \frac{Q_{\Phi P}}{3 \cdot S_{TP}} = \frac{25}{48} = 0,52$$

Как следует из сказанного выше на Кентаусском трансформаторном заводе возможно создание УШР в пофазном исполнении мощностью 25 МВАр напряжением 110 кВ, на базе существующей технологии производства и конструкции магнитопровода трансформатора ТДТН 10000 110/35/10.

При этом возможны два варианта:

1. С использованием трехстержневых магнитопроводов с сохранением технологии шихтовки;

2. С изготовлением четырехстержневых магнитопроводов с изменением технологии шихтовки.

И в том, и в другом случае необходимо увеличение сечения ярем не менее чем в 1,5 раза по отношению к сечению рабочих стержней. Также необходимо внести изменения в габаритные размеры магнитопровода при сохранении высоты стержней.

4.2 Расчет оптимального соотношения сечения ярем и стержней

Как приводилось в описании режима полупериодного насыщения для получения режима и сведения к нулю коэффициента гармоник тока сетевой обмотки в номинальном режиме работы, необходимо увеличение сечения ярем магнитопровода. Попытка обоснования значения соотношения сечения ярем к сечению рабочих стержней предпринята в данном разделе.

Степень насыщения магнитопровода можно выразить следующим образом:

$$\beta = 2 \arccos \frac{B_s - B_{\text{перем}}}{B_{\text{пост}}} \quad (4.1)$$

В приведенном выше уравнении B_s — это критическая точка насыщения кривой намагничивания (точка перегиба).

На практике существует три основных рабочих состояния УШР:

Состояние 1: Минимальная мощность, степень насыщения $\beta = 0$. Когда управляющее значение постоянного тока равно нулю, два стержня магнитопровода ненасыщены, $B_1 = B_s$, $B_2 = -B_s$, поэтому ток сетевой обмотки I равен нулю. Зависимость между индукцией B , напряженностью магнитного поля H и током сетевой обмотки I показаны на рисунке 4.2.

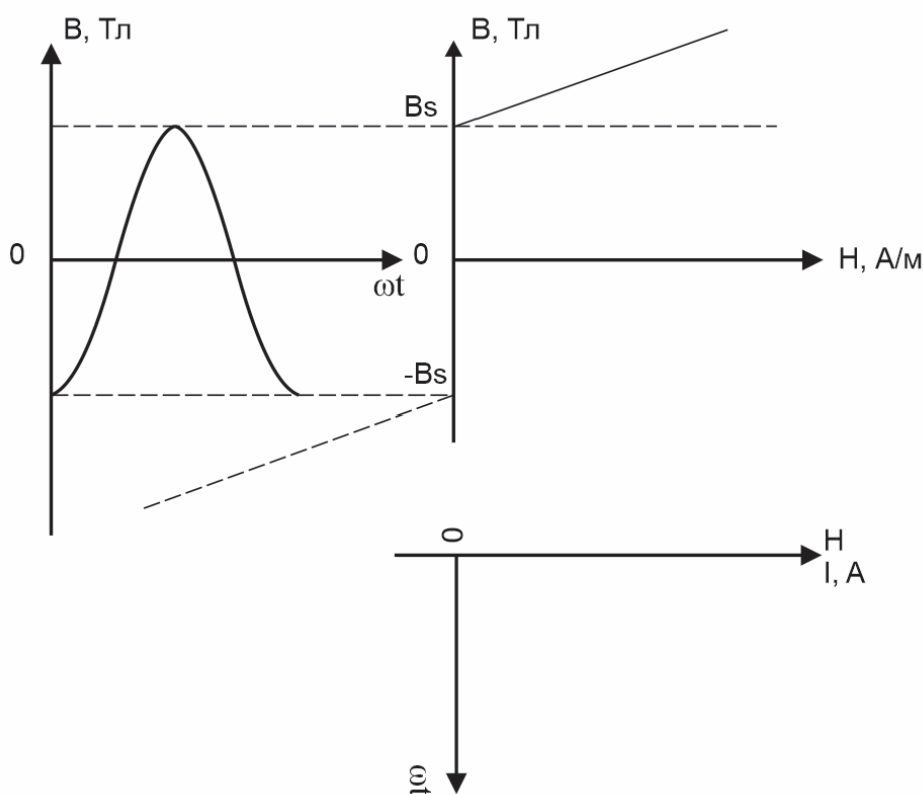


Рисунок 4.2 - Магнитный поток, напряженность магнитного поля и ток сетевой обмотки в режиме х.х.

Состояние 2: Полупериодный режим (рисунок 4.3.), степень насыщения $\beta = \pi$. В периоде имеется три рабочих состояния: попеременно стержень I ненасыщен, а стержень II насыщен.

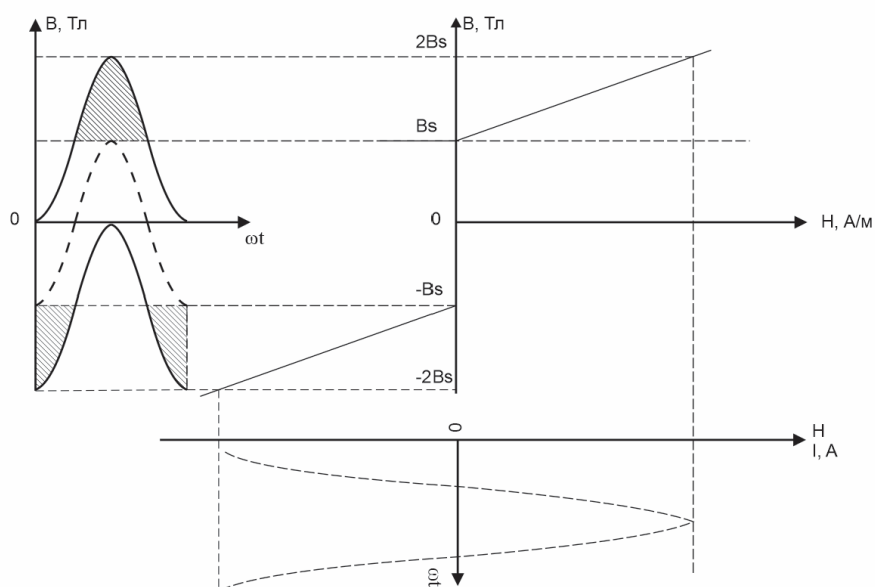


Рисунок 4.3 Магнитный поток, напряженность магнитного поля и выходной ток в режиме полупериодного насыщения

Состояние 3: Максимальная мощность, степень насыщения.

В этом случае индукция постоянного магнитного поля $B=B_s$, оба стержня I и II являются постоянно насыщенными.

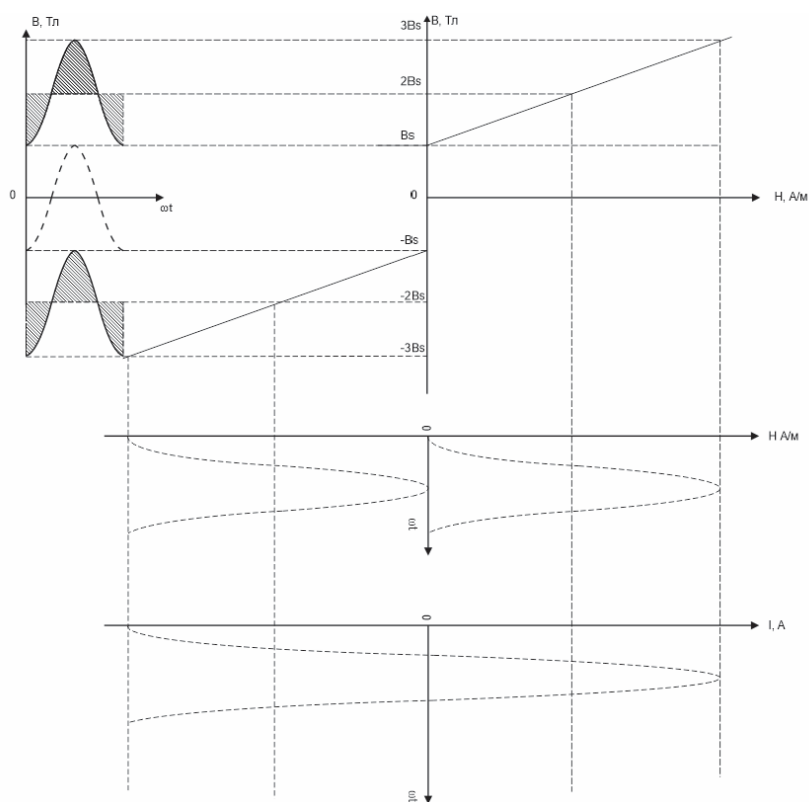


Рисунок 4.4 - Магнитный поток, напряженность магнитного поля и выходной ток в режиме периодического насыщения

Очевидно, в это время стержни магнитопровода находятся в состоянии предельного насыщения. Зависимость между индукцией B , напряженностью магнитного поля H и током I сетевой обмотки показана на рисунке 4.4.

Как описано в работе [71] ток в сетевой обмотке I можно определить по следующему выражению.

$$I(\omega t) = \frac{l}{2N} (H_1(\omega t) + H_2(\omega t)) = \frac{l}{2N} (f(B_1(\omega t)) + f(B_2(\omega t))) \quad (4.2)$$

H_1 — напряженность магнитного поля первого стержня, B_1 — магнитная индукция первого стержня, H_2 — напряженность магнитного поля второго стержня, B_2 — магнитная индукция второго стержня.

В приведенном выше уравнении можно заметить, что $i(\omega t)$ является нечетной функцией, поэтому в токе рабочих обмоток присутствуют только нечётные гармонические составляющие, преимущественно токи пятой, седьмой и одиннадцатой гармоник.

Амплитуда токов пятой, седьмой и одиннадцатой гармоник приведена ниже.

$$I_{(2n+1)m} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{l}{2n} (f(B_1(\omega t)) + f(B_2(\omega t))) \cos((2n+1)\omega t) d(\omega t) \quad (4.3)$$

$$n = 2, 3, 5.$$

$$f(B_1(\omega t)) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t \leq \pi - \frac{\beta}{2} \\ \frac{B_{\text{насыщ}}(-\cos(\omega t) - \cos(\frac{\beta}{2}))}{\mu_0}, & \pi - \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq \pi + \frac{\beta}{2} \\ 0, & \pi + \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

$$f(B_2(\omega t)) = \begin{cases} \frac{B_{\text{насыщ}}(-\cos(\omega t) + \cos(\frac{\beta}{2}))}{\mu_0}, & 0 \leq \omega t \leq \frac{\beta}{2} \\ 0, & \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq 2\pi - \frac{\beta}{2} \\ \frac{B_{\text{насыщ}}(\cos(\omega t) - \cos(\frac{\beta}{2}))}{\mu_0}, & 2\pi - \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.4)$$

$$I_{2n+1}^* = I_{2n+1} / \left(\frac{l B_{\text{насыщ}}}{N \mu_0} \right) \quad (4.5)$$

За базовое значение авторы статьи принимают $\beta = 2\pi$.

После вывода приведенных выше уравнений значение тока можно найти, как показано ниже.

$$I_{2n+1}^* = \left| \frac{1}{2\pi(2n+1)} \left(\frac{\sin(n\beta)}{n} - \frac{\sin((n+1)\beta)}{n+1} \right) \right| \quad (4.6)$$

$n = 2, 3, 5.$

Из изложенного в данном разделе можно сделать вывод о том, что оптимальным для работы УШР является режим при котором синусоида магнитной индукции расположена полностью над коленом кривой намагничивания стали. Хотя нетрудно заметить, что при расчете функции в формуле 4.4 приняв $\beta = \pi$, получаются такие же результаты что и при 2π . Соответственно нет необходимости насыщать рабочие стержни УШР до периодного режима насыщения, достаточно подать такой ток обмотки управления чтобы половину периода промышленной частоты кривая магнитной индукции находилась выше колена кривой намагничивания, а другую половину ниже. Таким образом, учитывая что вектор магнитной индукции в ярмах не должен переходить на линейную часть кривой намагничивания после точки перегиба, оптимальным соотношением сечения ярма к сечению стержня будем принимать число близкое к значению, равному 2. Моделирование работы УШР при других соотношениях также выполнены и представлены в разделе 4.6.

4.3 Моделирование УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.

Для проверки работы рассчитанного УШР и оптимизации конструкции было выполнено моделирование. Методика моделирования приведена в разделе 3.1. Моделирование работы реактора производилось в диапазоне тока подмагничивания от 90 А до 810 А, с шагом регулирования 30 А. Индукция переменного магнитного поля $B_1 = 1,72$ Тл. Индукция постоянного магнитного поля $B_2 = 1,72$ Тл. Напряжение сетевой обмотки 110 кВ, компенсационной обмотки 38,5 кВ, обмотки управления 10 кВ. Геометрические размеры магнитопровода УШР приведены на рисунке 4.1. Сечение рабочих стержней осталось неизменным $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$.

Сечение ярма и среднего стержня увеличено и равно $S_{\text{ярм}} = 0,22643 \text{ м}^2$, что в 1,96 раз больше сечения рабочих стержней. Обоснование выбора данного соотношения сечений ярм к сечению рабочих стержней приведено в предудщем разделе.

При моделировании работы шунтирующего реактора также были учтены потери на холостой ход и потери в меди по упрощенным формулам расчета параметров схемы замещения.

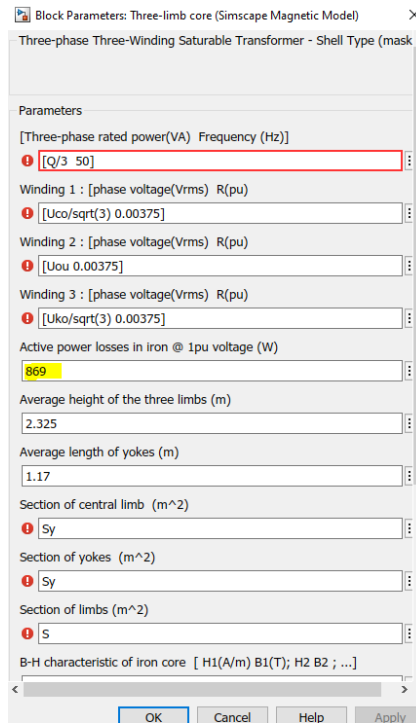


Рисунок 4.5 – параметры модели реактора

Потери на холостой ход в относительных единицах рассчитываются по формуле:

$$R_m = \frac{S_{nom}}{P_0}; \quad (4.7)$$

где S_{nom} – номинальная мощность, кВа;

P_0 – потери на холостой ход, кВт

$$R_m = \frac{S_{nom}}{P_0} = \frac{10\,000}{11,5} = 869 \text{ о. е.}$$

Потери на медь в относительных единицах рассчитываются по формуле:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_k}{S_{nom}}; \quad (4.8)$$

где S_{nom} – номинальная мощность, кВА;

P_k – потери к.з., кВт

$$R_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_k}{S_{nom}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{76}{10\,000} = 0,00375 \text{ о. е.}$$

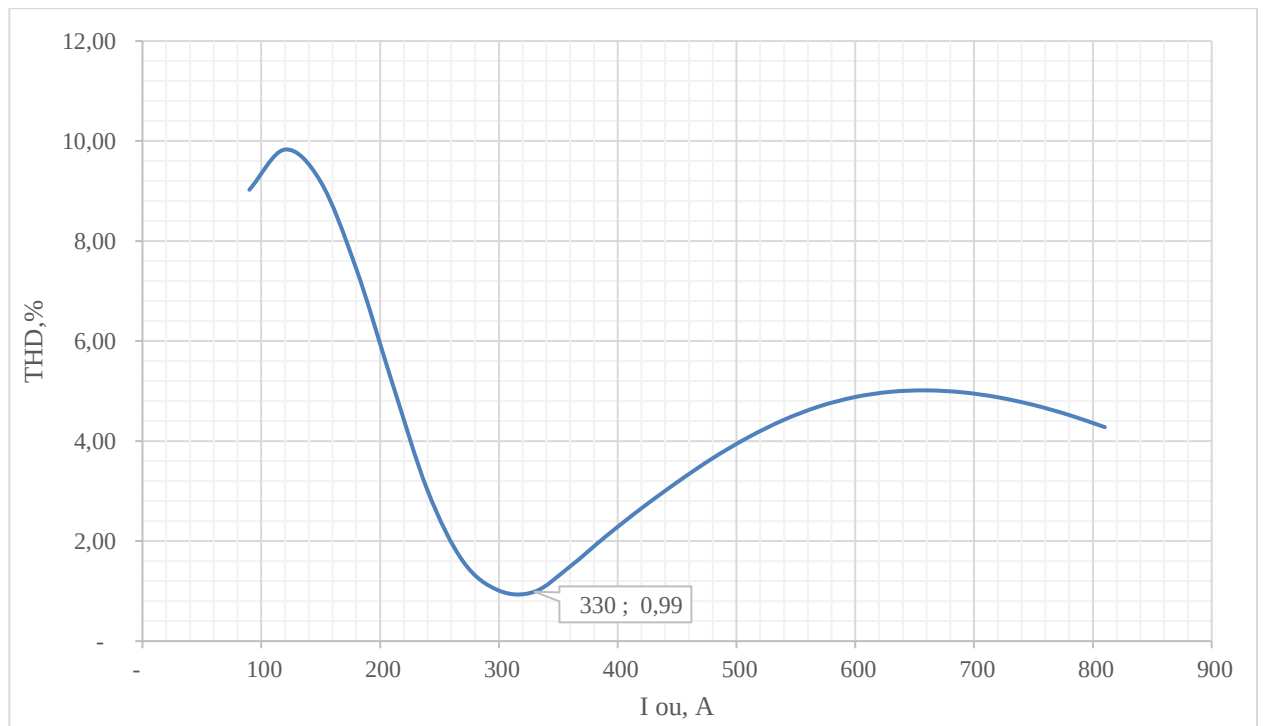


Рисунок 4.6 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,22643 \text{ м}^2$

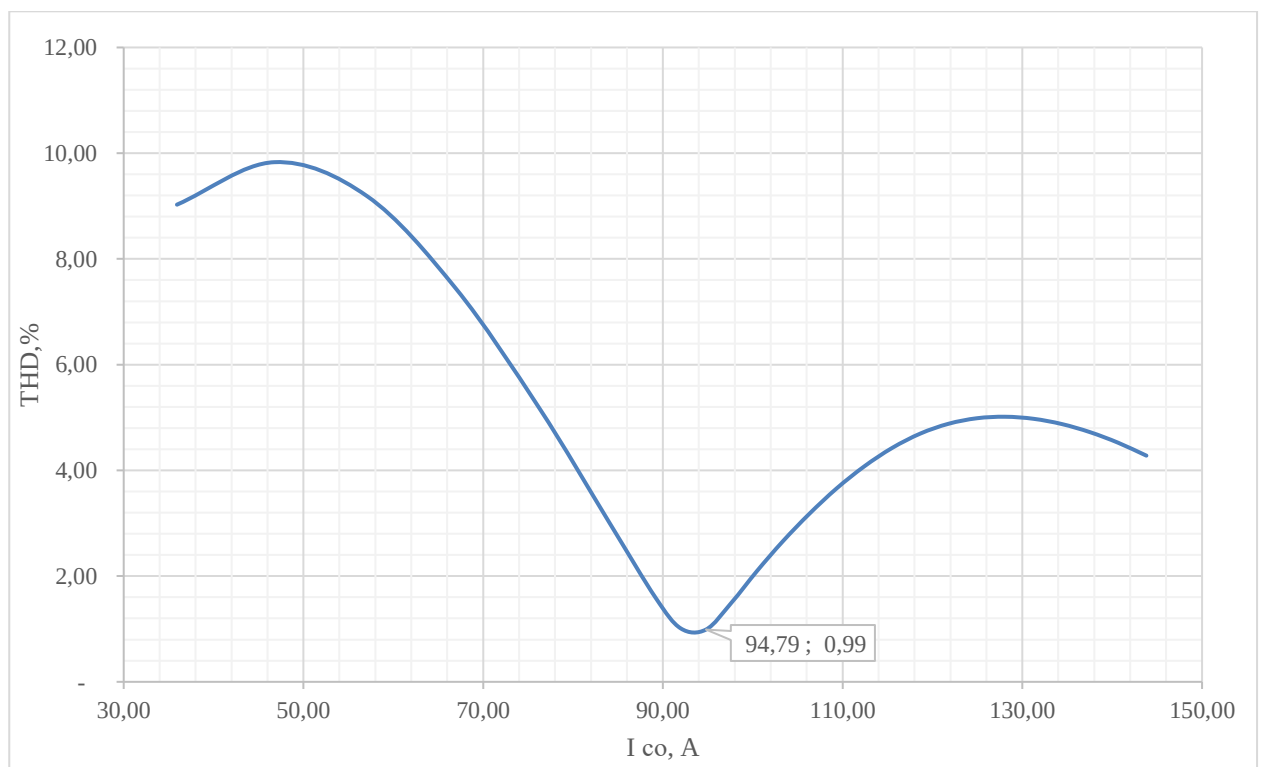


Рисунок 4.7 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,22643 \text{ м}^2$

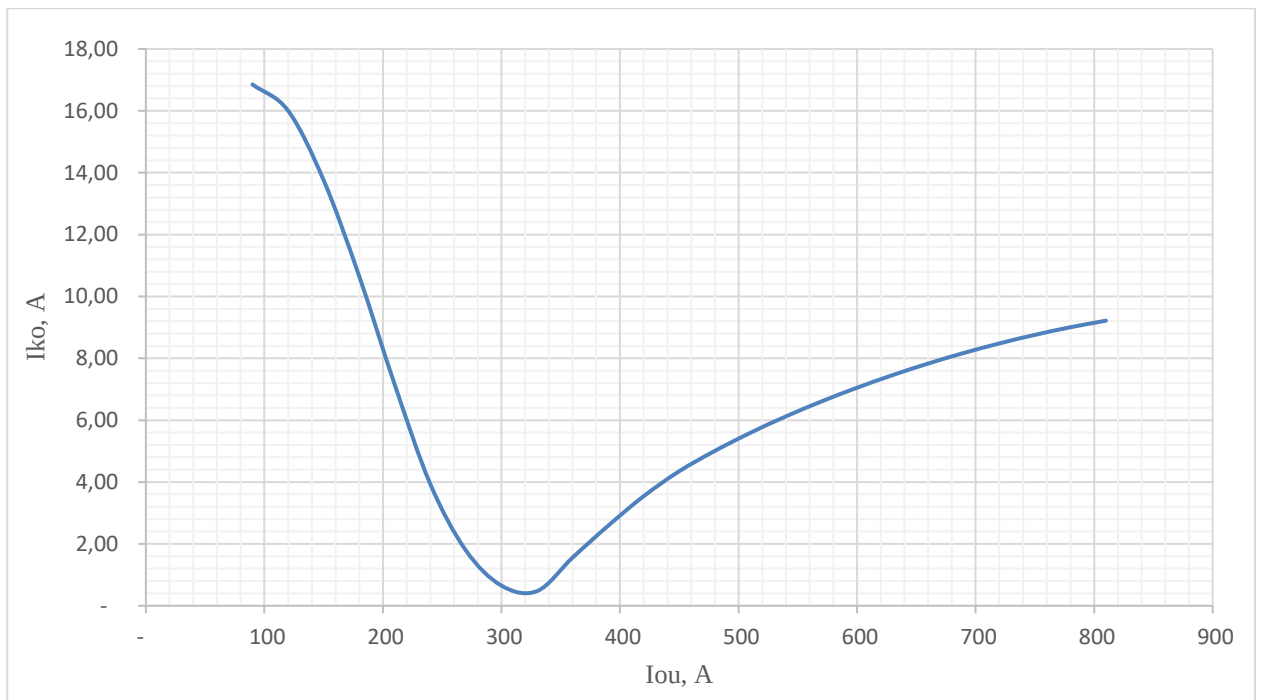


Рисунок 4.8 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} , $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,22643 \text{ м}^2$

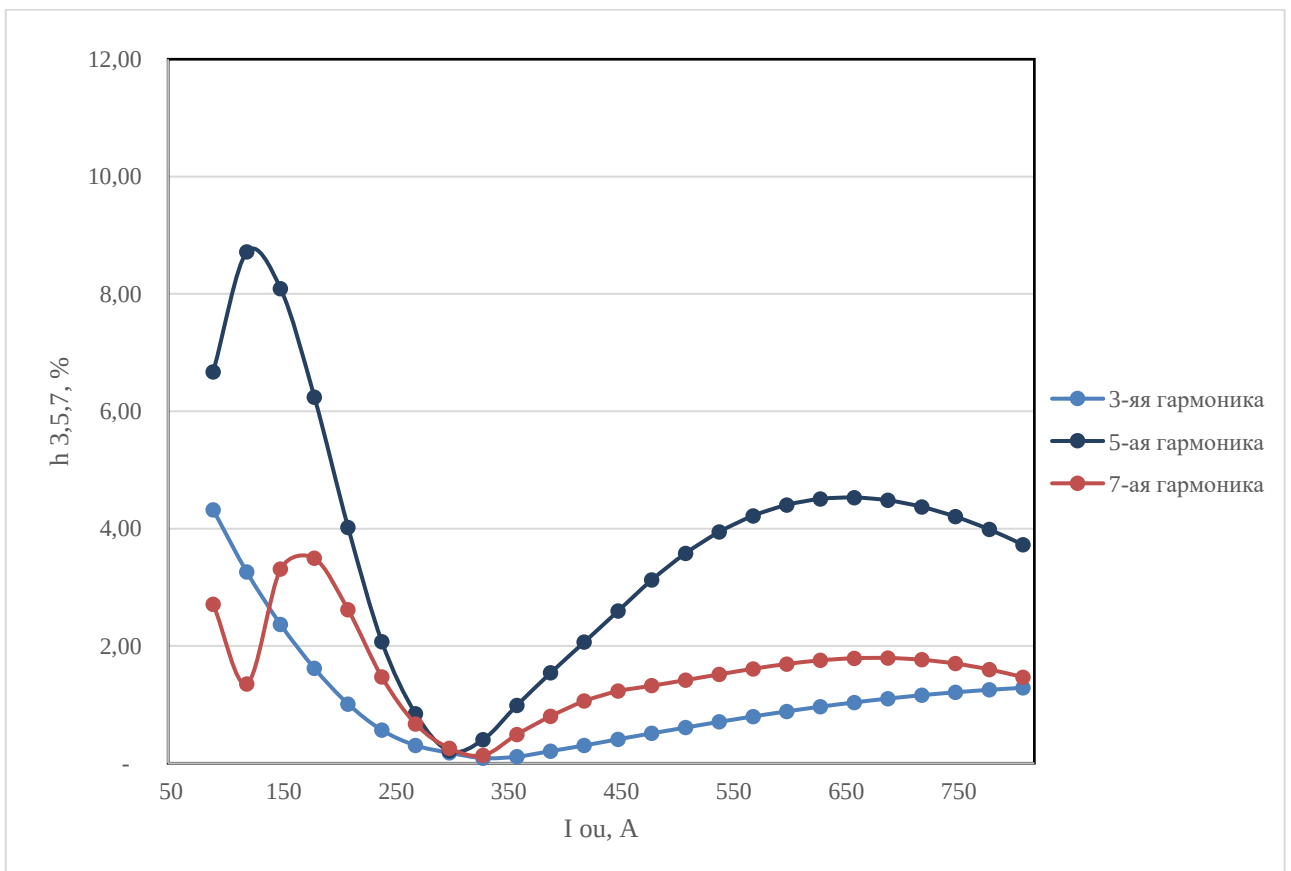


Рисунок 4.9 - График изменения гармоник тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,22643 \text{ м}^2$

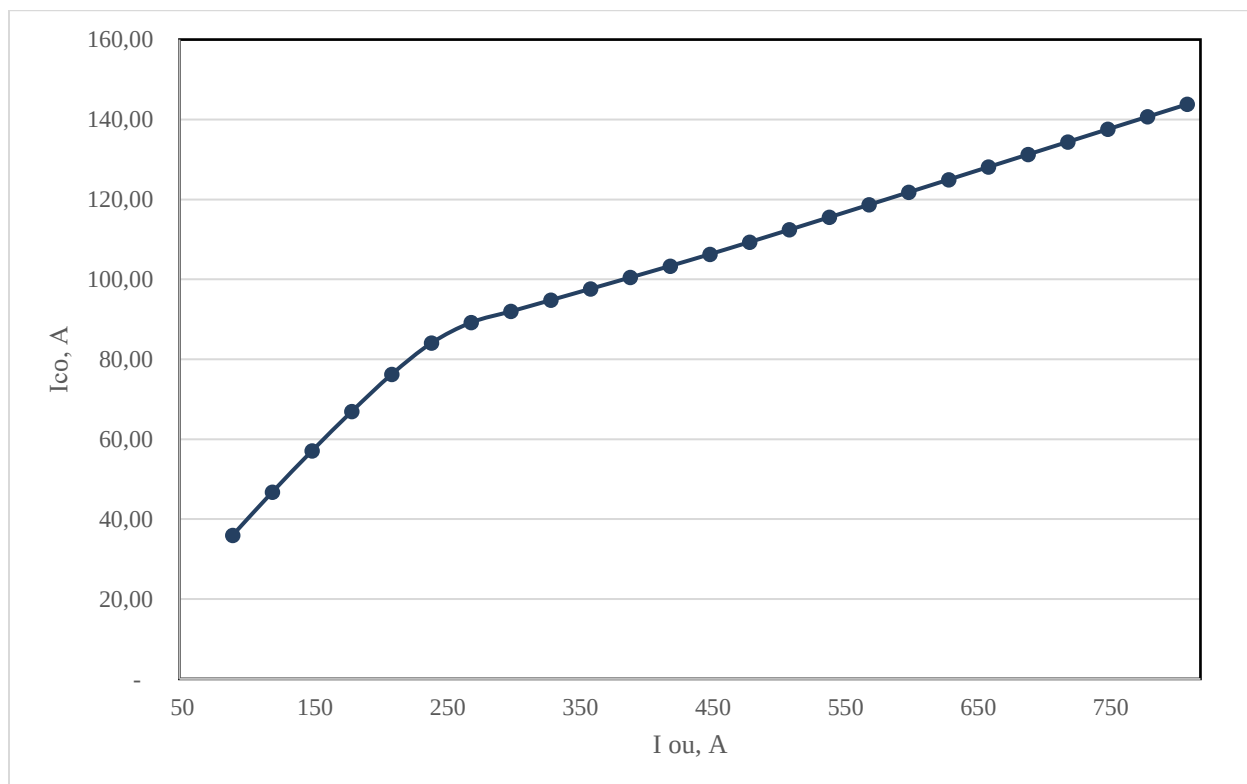


Рисунок 4.10 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,115526 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} = 0,22643 \text{ м}^2$

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

Режим полупериодного насыщения для данной конструкции реактора 110 кВ 25 МВА наступает при токе подмагничивания 330 А. Ток в сетевой обмотке составляет 94,79 А, при коэффициенте гармоник тока 0,99. Несмотря на низкий коэффициент гармоник, потребляемый ток не соответствует номинальной мощности проектируемого реактора. Для приведения в соответствие потребляемого тока номинальному был произведен ряд расчетов и симмуляций, которые приведены ниже. В главе 4.4 исследована работа реактора при изменении магнитной индукции переменного магнитного поля, в главе 4.5 при изменении индукции постоянного магнитного поля. Изменение индукции магнитного поля производилось путем уменьшения и увеличения витков соответствующих обмоток.

4.4 Изменение индукции переменного магнитного потока B_1 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.

Выполнено имитационное моделирование работы УШР 110 кВ при изменении индукции переменного магнитного поля в диапазоне 1,57 Тл – 1,97 Тл, с шагом изменения 0,05 Тл. Напряжение сетевой обмотки 110 кВ, обмотки управления 5,5 кВ, компенсационной обмотки 38,5 кВ. Количество витков СО и КО в соответствии с заданной индукцией переменного магнитного поля изменяется в диапазоне 1649 – 1314 витков (СО), 552 – 440 витков (КО).

Количество витков обмотки управления неизменно и составляет 238.

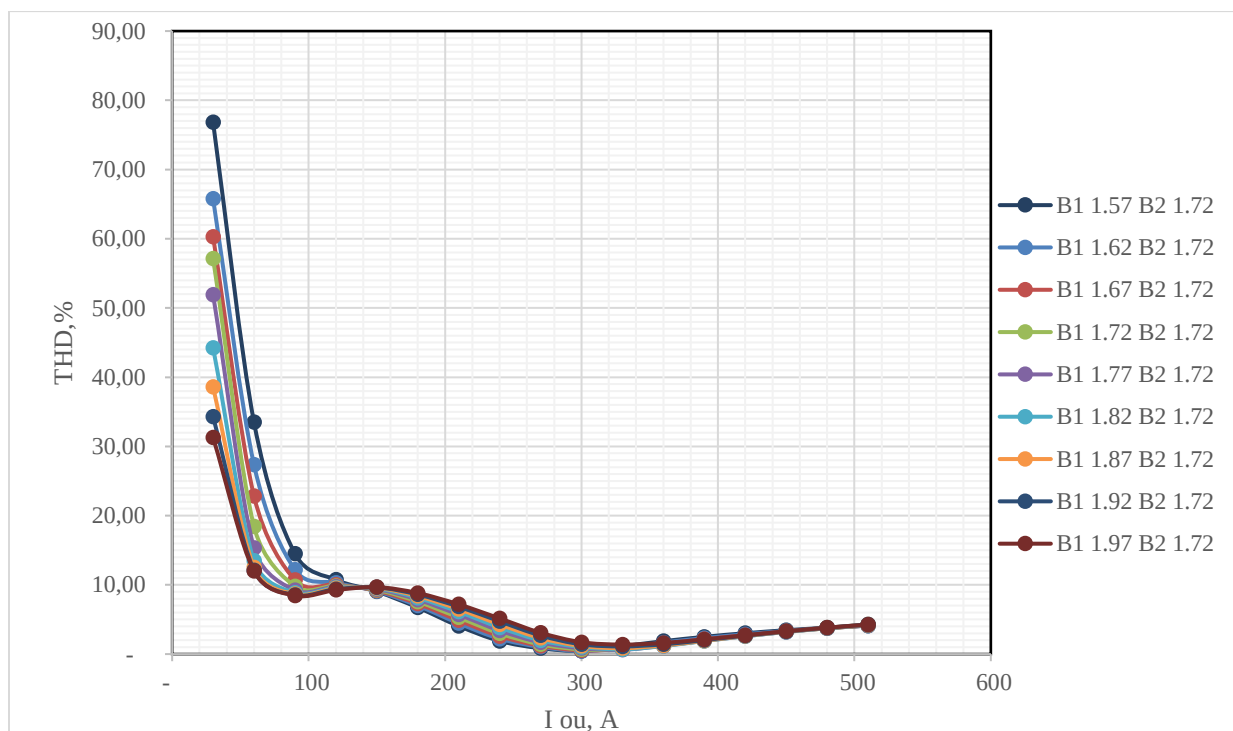


Рисунок 4.11 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} в зависимости от величины тока подмагничивания I_{ou}

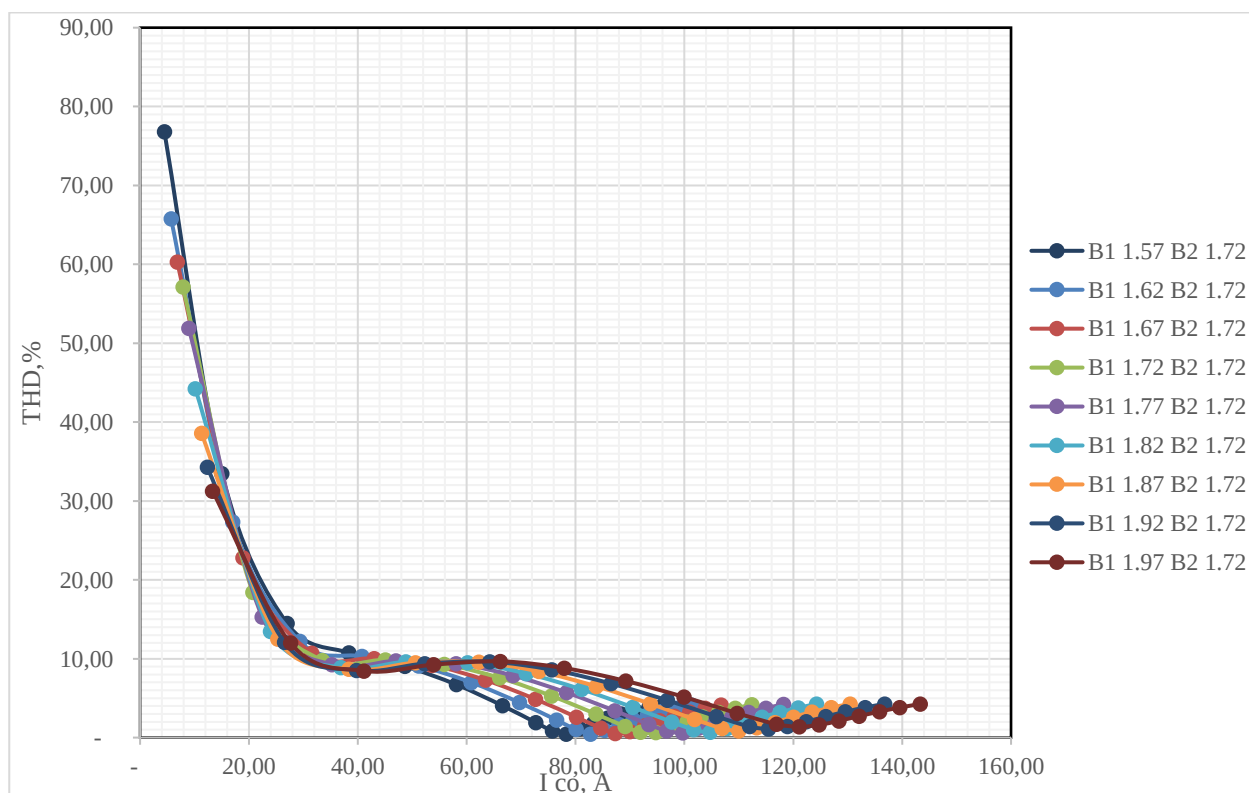


Рисунок 4.12 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

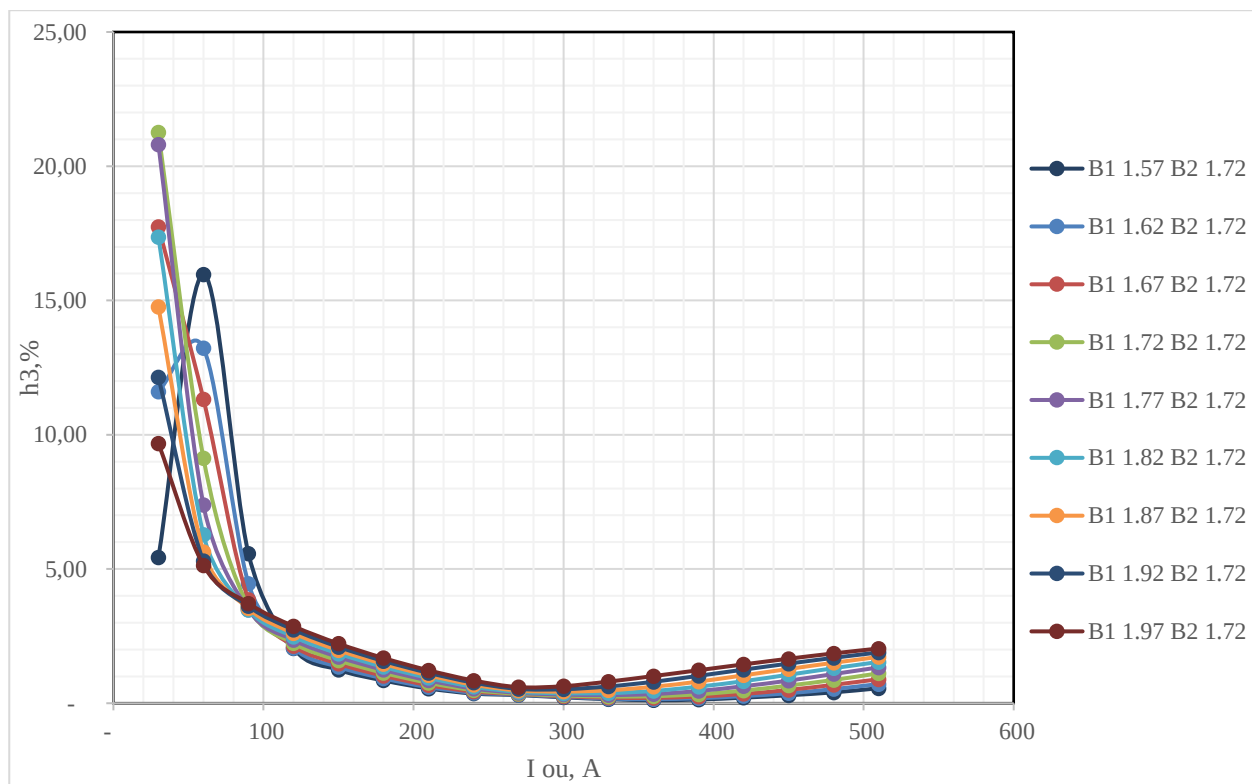


Рисунок 4.13 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

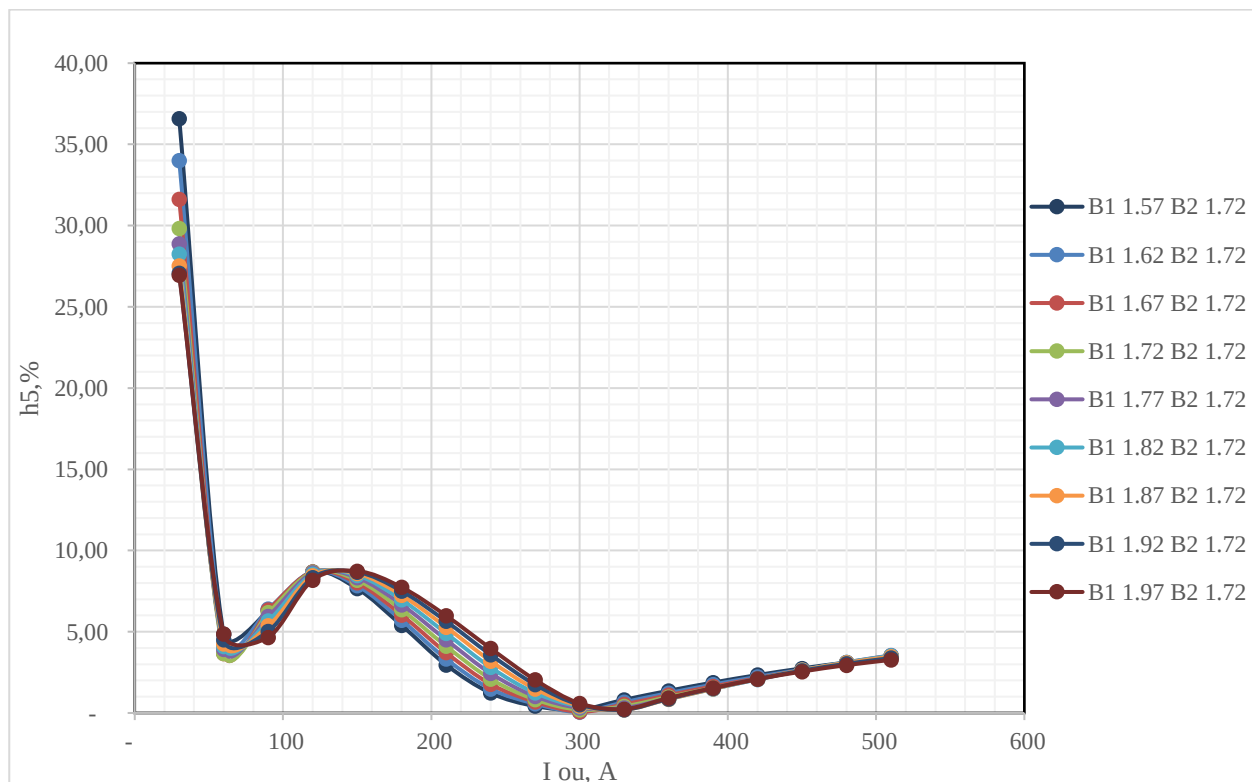


Рисунок 4.14 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

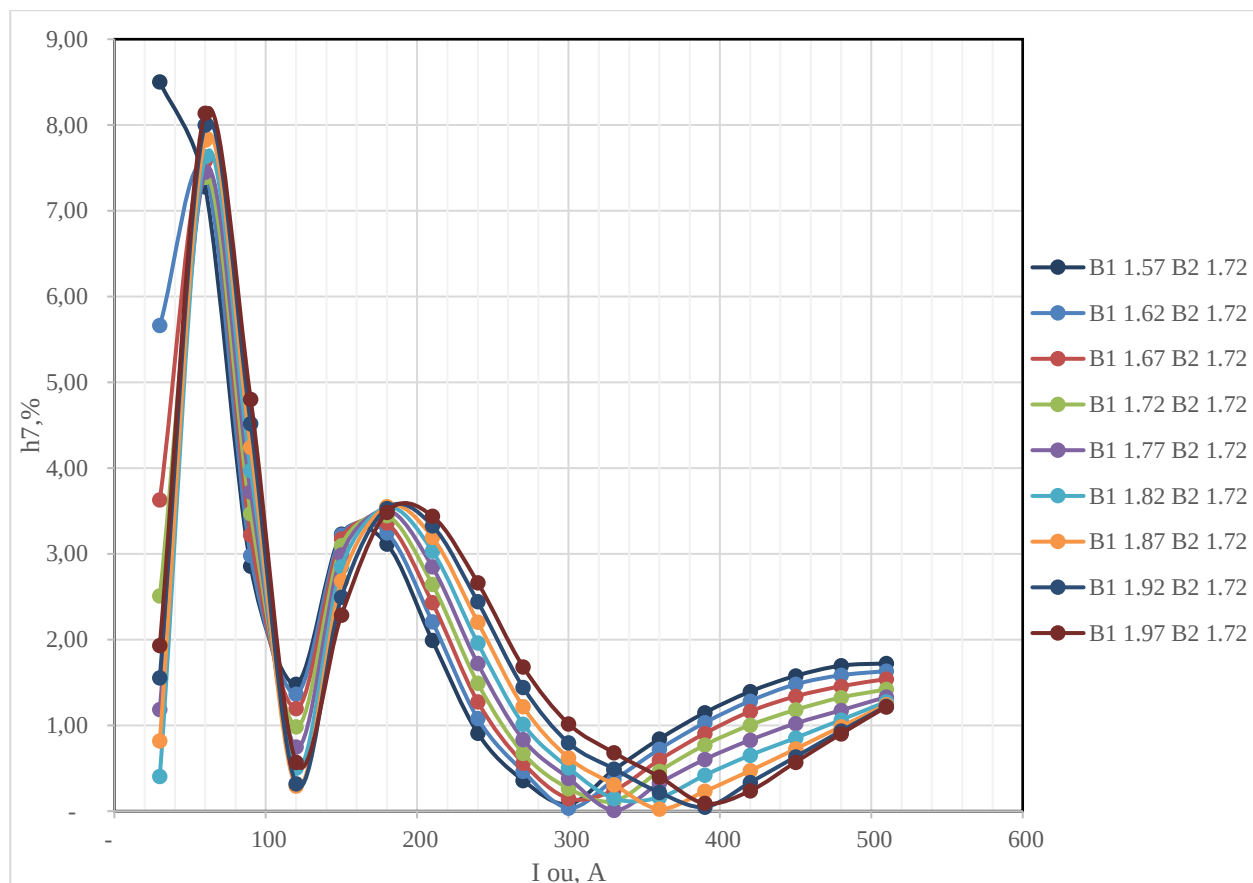


Рисунок 4.15 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

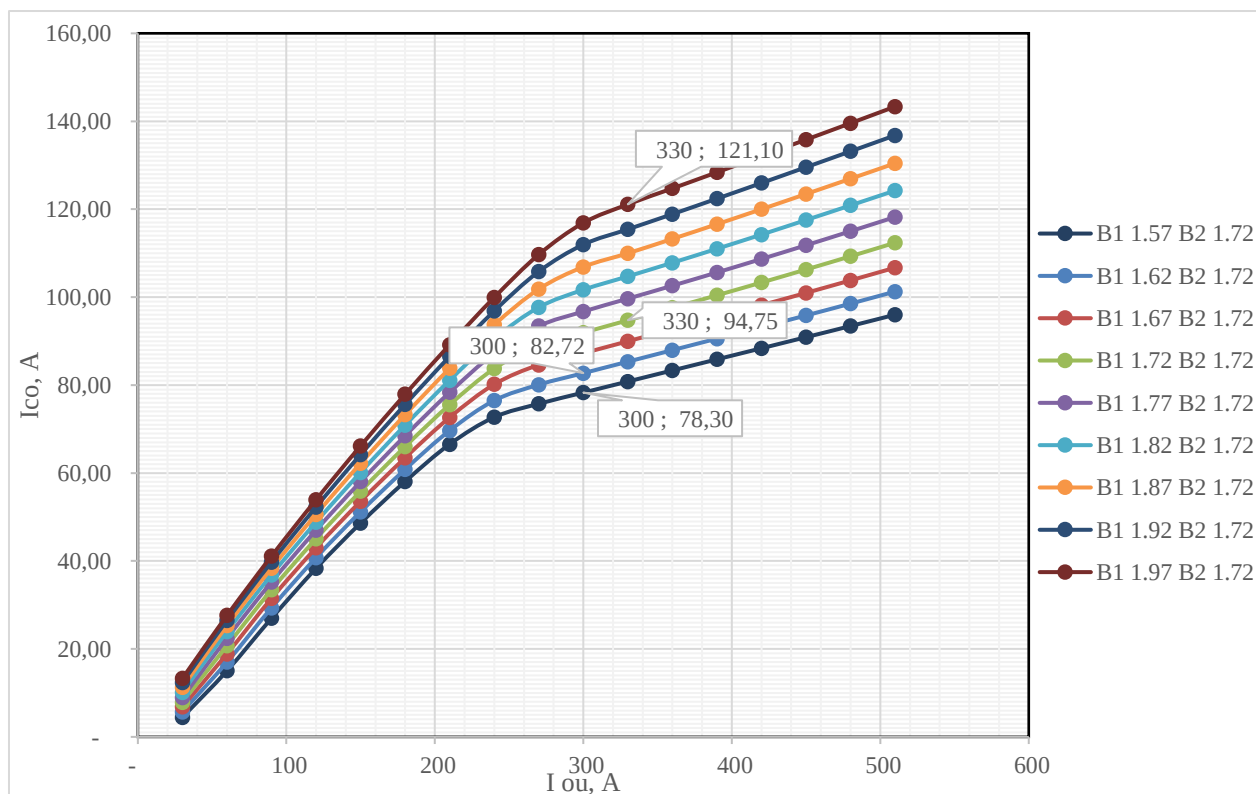


Рисунок 4.16 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

С увеличением индукции переменного магнитного поля, создаваемого сетевой обмоткой, увеличивается и потребляемый ток, соответствующий режиму полупериодного насыщения. При индукции магнитного поля $B_1 = 1,97$ Тл потребляемый ток $I_{co} = 121,1$ А, коэффициент гармоник равен 1,38. Ток подмагничивания при этом $I_{oy} = 330$ А. Далее выполнено моделирование работы реактора при изменении индукции постоянного магнитного поля, создаваемого обмоткой управления.

4.5 Изменение индукции постоянного магнитного потока B_2 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.

Выполнено имитационное моделирование работы УШР 110 кВ при изменении индукции постоянного магнитного поля в диапазоне 1,57 Тл – 1,97 Тл, с шагом изменения 0,05 Тл. Напряжение сетевой обмотки 110 кВ, обмотки управления 5,5 кВ, компенсационной обмотки 38,5 кВ. Количество витков ОУ в соответствии с заданной индукцией постоянного магнитного поля изменяется в диапазоне 261 – 208 витков.

Количество витков сетевой и компенсационной обмоток неизменно и составляет 1505 и 191 соответственно.

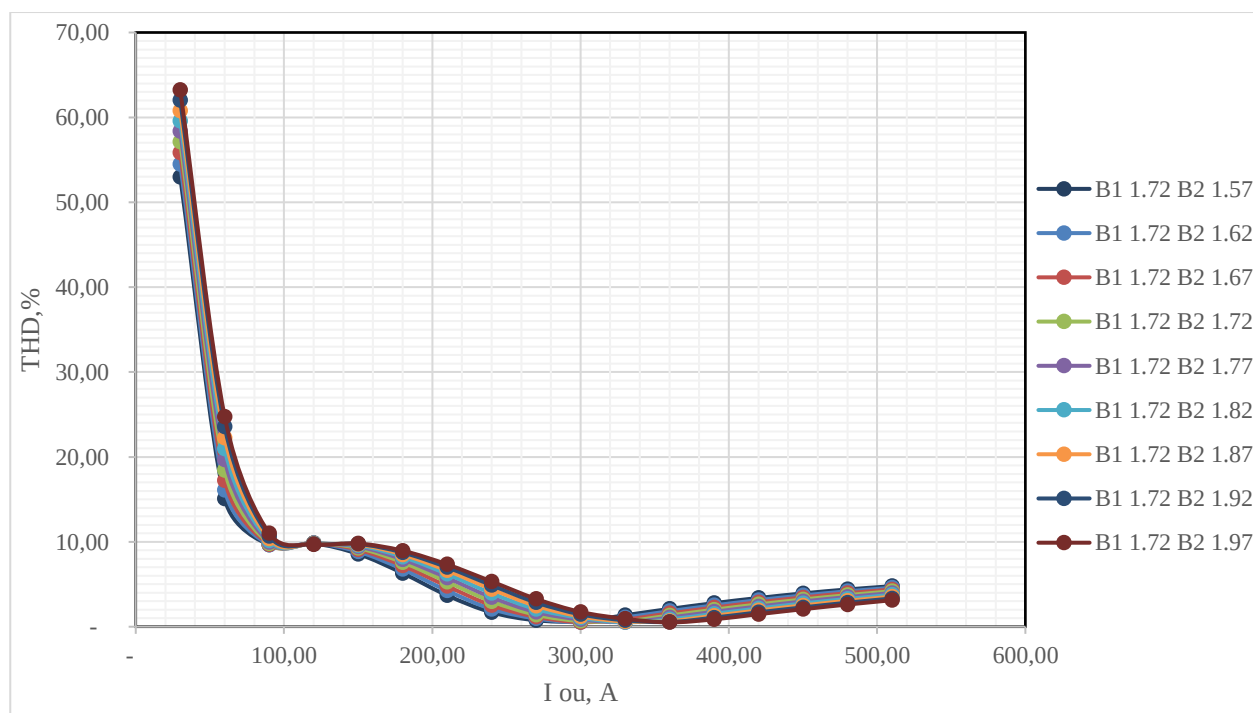


Рисунок 4.17- График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} в зависимости от величины тока подмагничивания I_{ou}

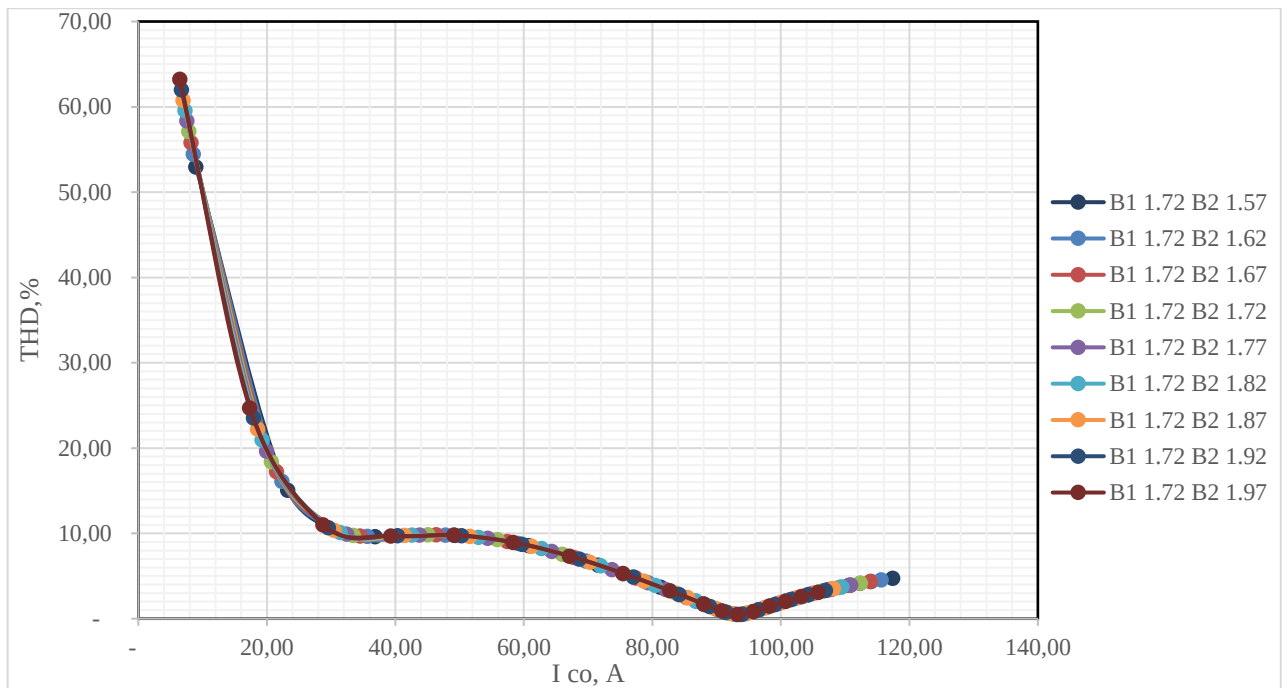


Рисунок 4.18 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

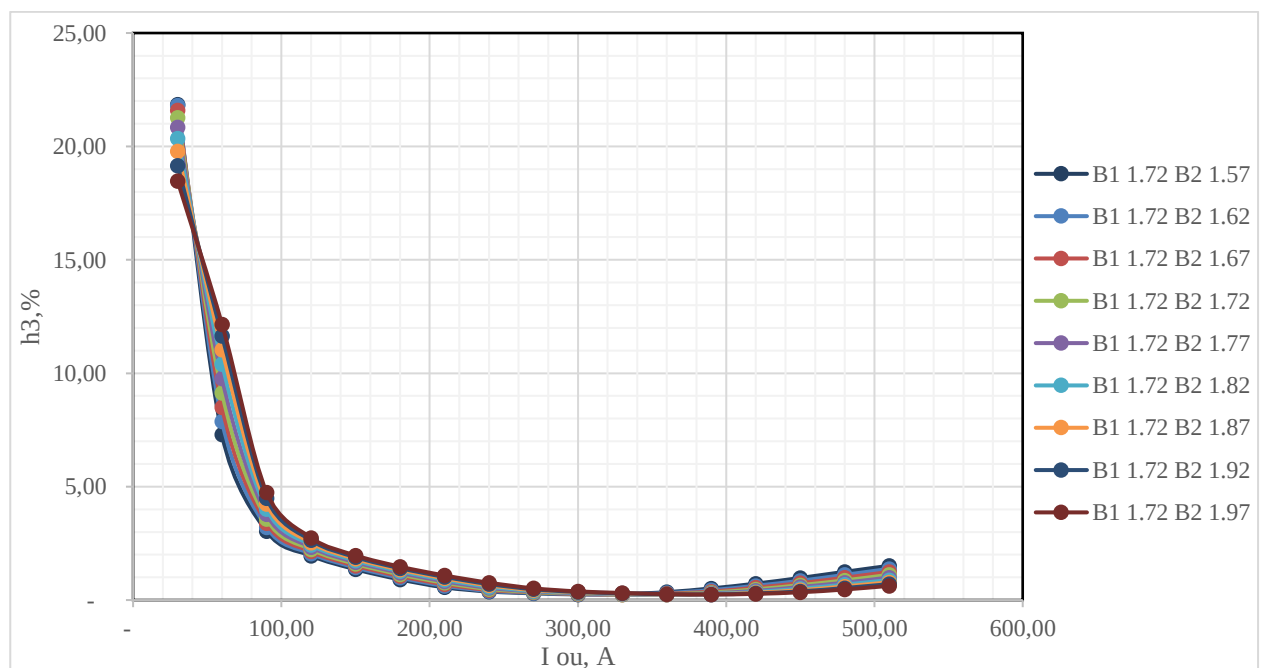


Рисунок 4.19 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

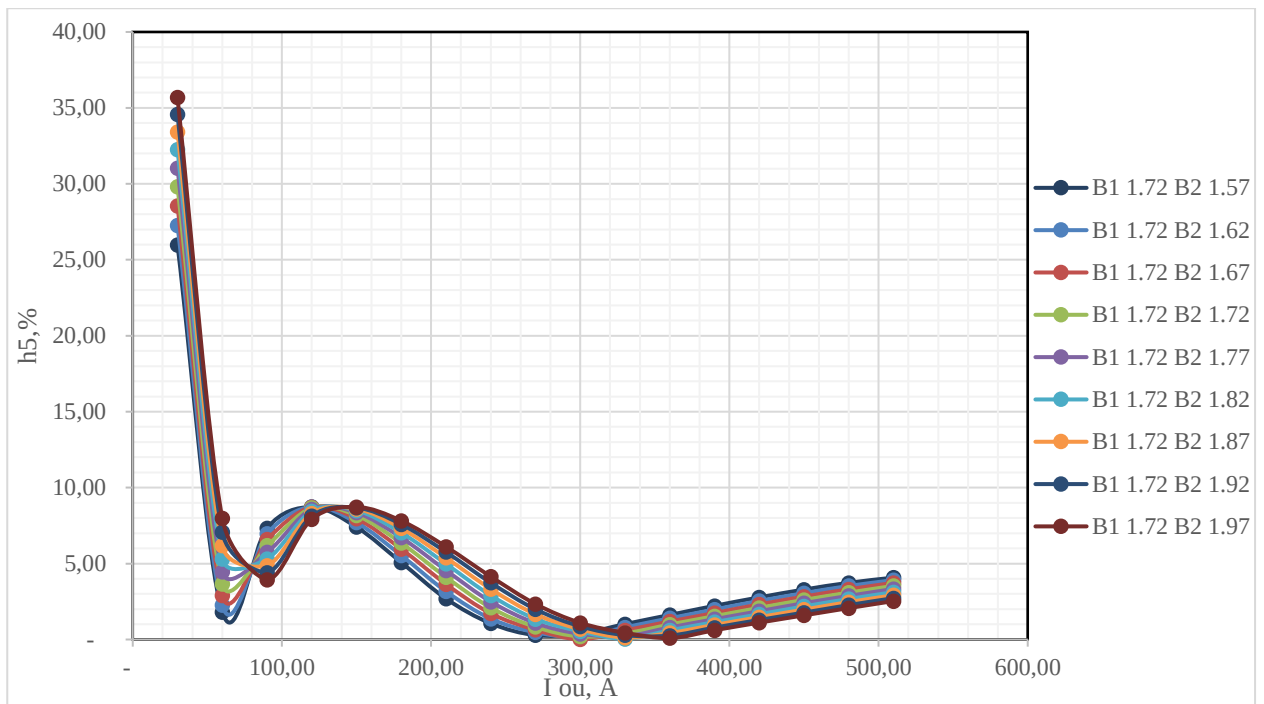


Рисунок 4.20 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{5o}

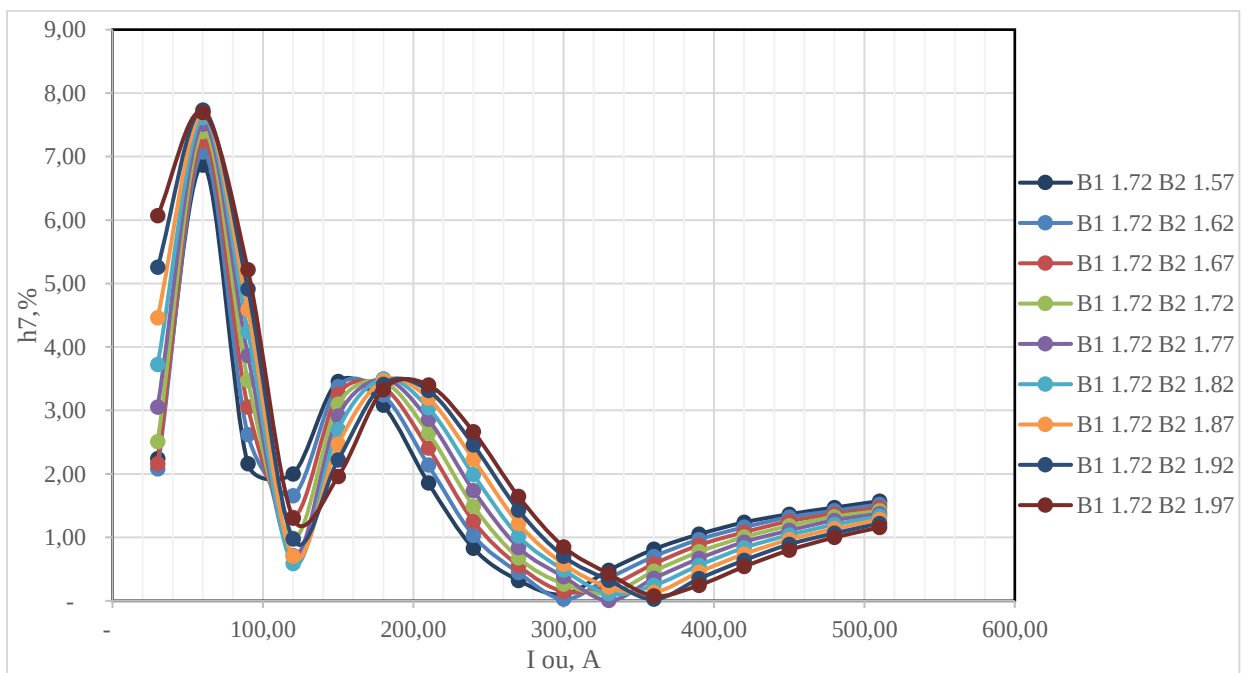


Рисунок 4.21 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{7o}

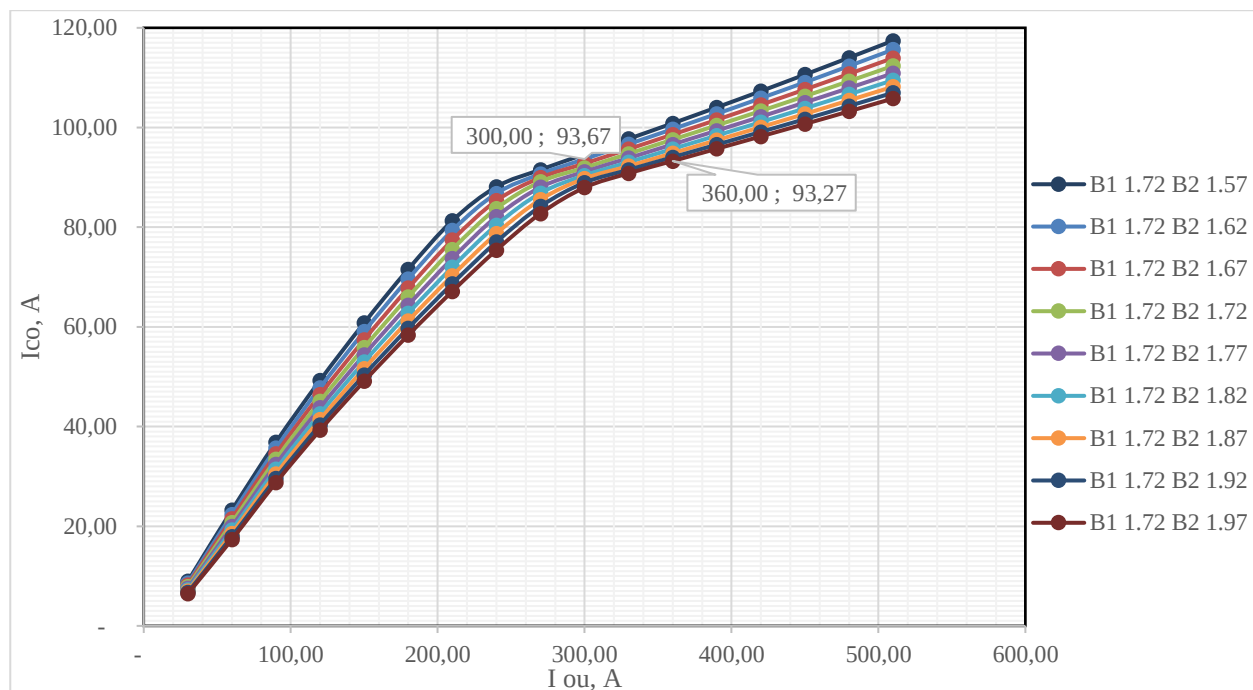


Рисунок 4.22 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

Как видно из результатов моделирования, увеличение или уменьшение магнитной индукции постоянного поля B_2 никак не влияет на значение потребляемого тока сетевой обмоткой, соответствующего режиму полупериодного насыщения.

$$B = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot \Pi \cdot W_i}$$

$$H \cdot l = I \cdot W_i$$

где, B – индукция магнитного поля, Тл;

U_i – напряжение, В;

f – частота тока, Гц;

Π – площадь поперечного сечения участка магнитопровода, m^2 ;

H – напряженность магнитного поля, А/м

W_i – число витков обмотки.

Режим полупериодного насыщения УШР характеризуется определенными значениями напряженности магнитного поля и магнитной индукции. Из данных двух выражений следует что, для получения сходимости номинального режима работы УШР, а именно потребляемого тока, и режима полупериодного намагничивания, при определенных значениях напряженности, напряжения, частоты и магнитной индукции, необходимо изменять параметры магнитопровода (сечение и высоту стержня) и количество витков обмотки. Под средней длиной магнитного потока здесь принимается высота стержня так как

процесс намагничивания в ярмах практически не влияет на режим потребления тока УШР и соответственно длину пути прохождения потока в ярмах можно не учитывать.

Далее была исследована работа УШР при изменении сечений стержня и ярем, с изменением номинального напряжения компенсационной обмотки.

4.6 Изменение сечений стержней и ярем при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.

За основную модель взята графическая модель УШР, разработанная в графическом редакторе Simulink. Основные параметры модели УШР (параметры обмоток, магнитопровода, номинальные значения напряжений) были выведены в среду Matlab в качестве переменных (variable). Любое изменение параметров модели рассчитывается как отдельная модель с перечнем симуляций. Моделирование работы реактора производилось в диапазоне тока подмагничивания от 100 А до 820 А, с шагом регулирования 30 А. Напряжение обмотки управления было уменьшено до 5,5 кВ вследствие оптимизационных расчетов. Напряжение компенсационной обмотки устанавливалось в диапазоне 3 кВ – 5,4 кВ с шагом регулирования 0,3 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ с шагом регулирования 1 кВ.

Для оптимизации задачи моделирования большого количества симуляций был разработан код для среды Matlab, позволяющий выполнять моделирование реактора при заданных входных параметрах и записывать результаты моделирования в виде матрицы значений. Код приведен в приложении Д.

Количество витков КО рассчитывается в соответствии с заданной индукцией переменного магнитного поля.

В таблице 4.2 представлены данные по сечениям стержней и ярем магнитопровода УШР, соответствующие опытам моделирования. В целях поиска оптимальной конструкции УШР всего было выполнено 234 опыта с изменением напряжения компенсационной обмотки. Обобщённо все эти опыты можно разделить на 10 видов модификаций конструкции магнитопровода, как представлено в таблице 4.2. «Базовой» конфигурацией конструкции магнитопровода УШР принята конфигурация в модификации №2. В первых семи модификациях предпринята попытка изменения сечения стержня с выдержкой соотношения сечения ярма к сечению стержня величиной 1,96. Как показали опыты моделирования, оптимальной конструкцией УШР, при которой соблюдается минимальный коэффициент гармоник и номинальные параметры, является конструкция УШР, смоделированная в модификации конструкции УШР №7.

В модификациях 8, 9, 10 была смоделирована работа УШР при изменении соотношения сечения ярма к сечению стержня. Результаты моделирования, в виде графиков, представлены в приложении Д. В самой диссертационной работе, а конкретно в этой главе представлены результаты моделирования оптимальной конструкции УШР, с учетом критерия сечения

стержней и ярем, и сводные графики.

Таблица 4.2 – Данные по сечениям стержней и ярем имитационной модели УШР

	Модификация конструкции магнитопровода									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сечение стержня, м ²	0,104	0,115	0,127	0,132	0,138	0,144	0,15	0,15	0,15	0,15
Сечение ярма, м ²	0,203	0,226	0,249	0,260	0,271	0,283	0,294	0,264	0,279	0,309
Уменьшение/увеличение сечения стержня относительно 0,115 м ² , %	90%	100%	110%	115%	120%	125%	130%	130%	130%	130%
Соотношение сечения ярма к сечению стержня	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,96	1,76	1,86	2,06

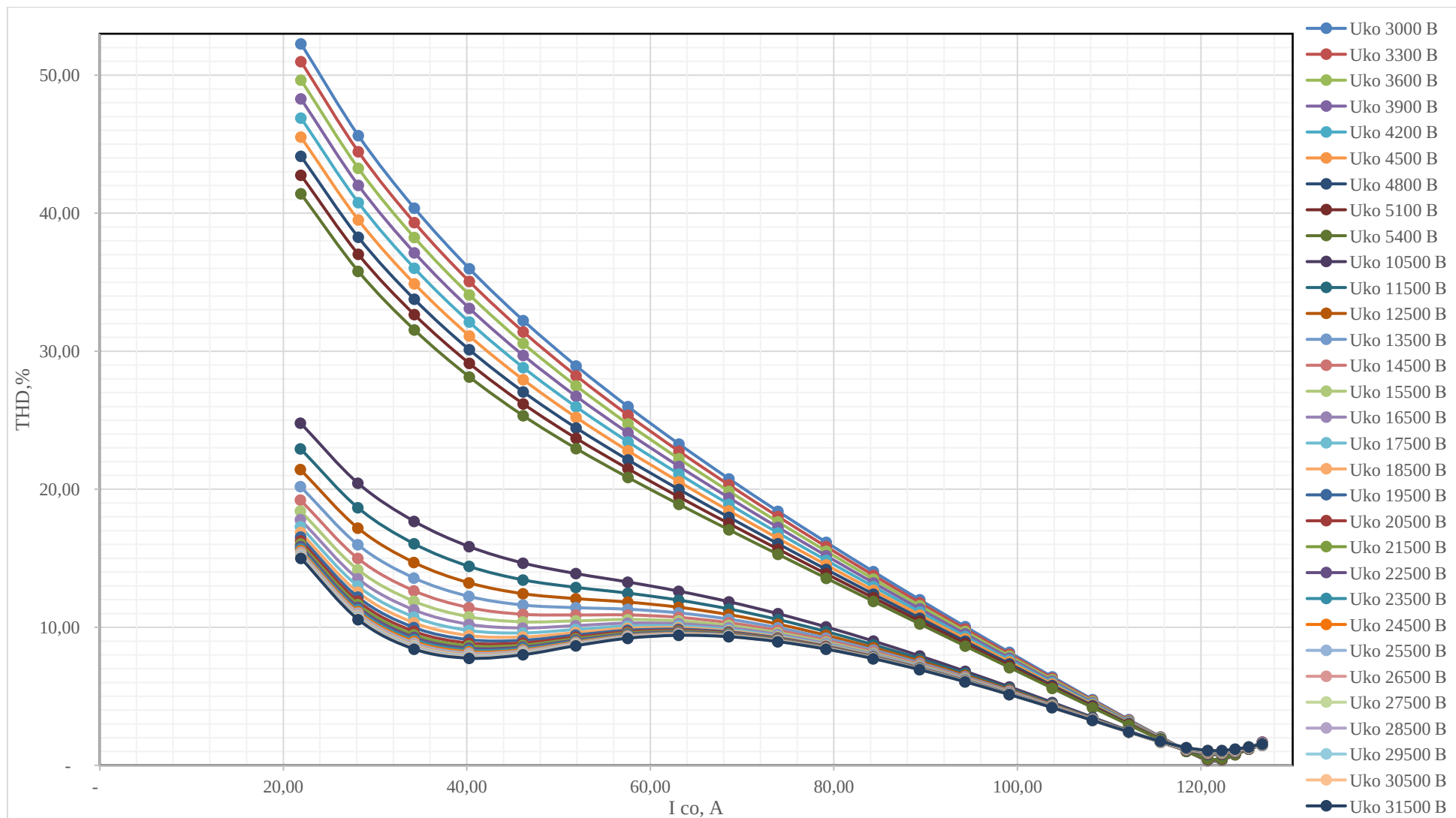


Рисунок 4.23 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

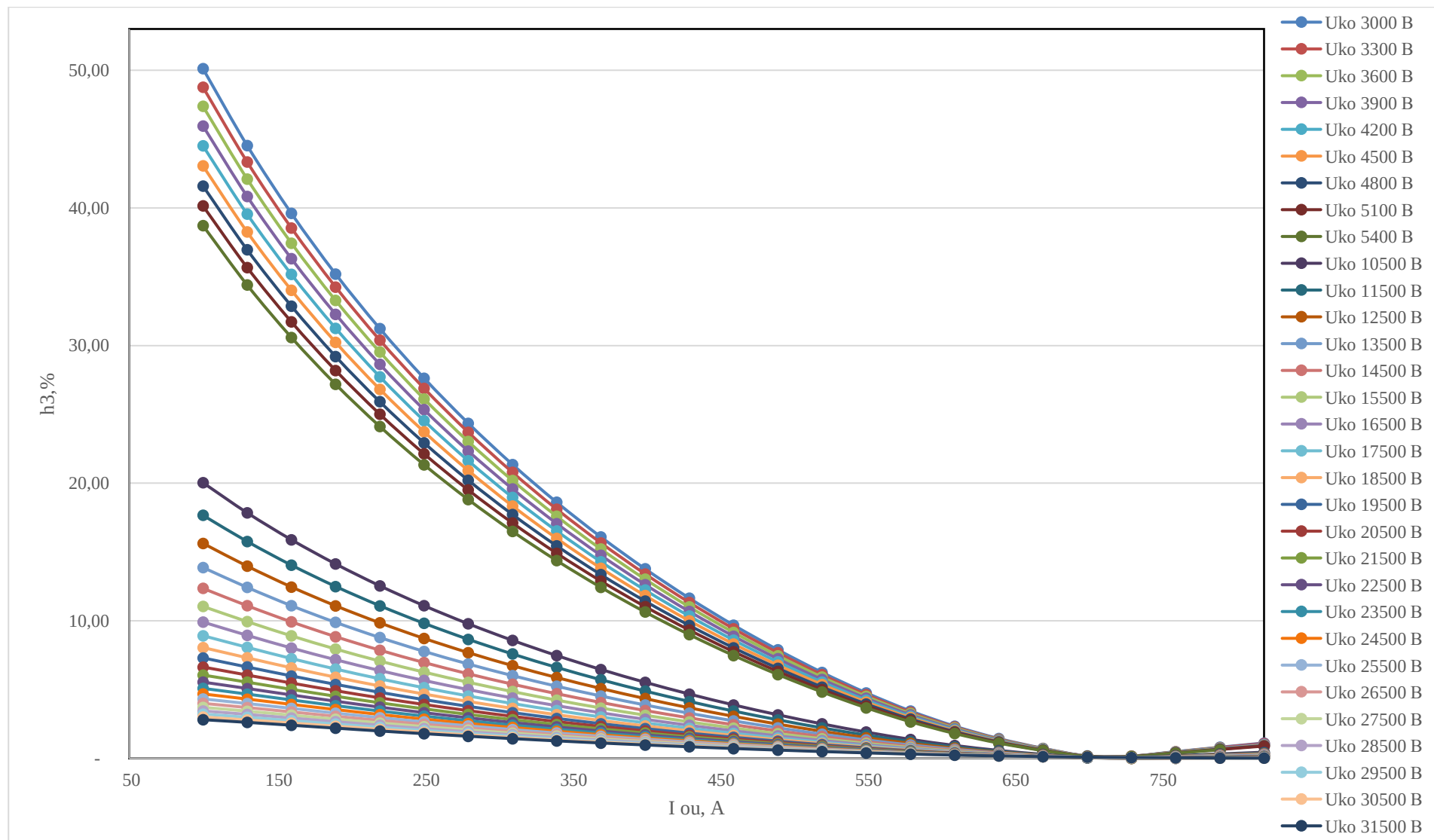


Рисунок 4.24 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

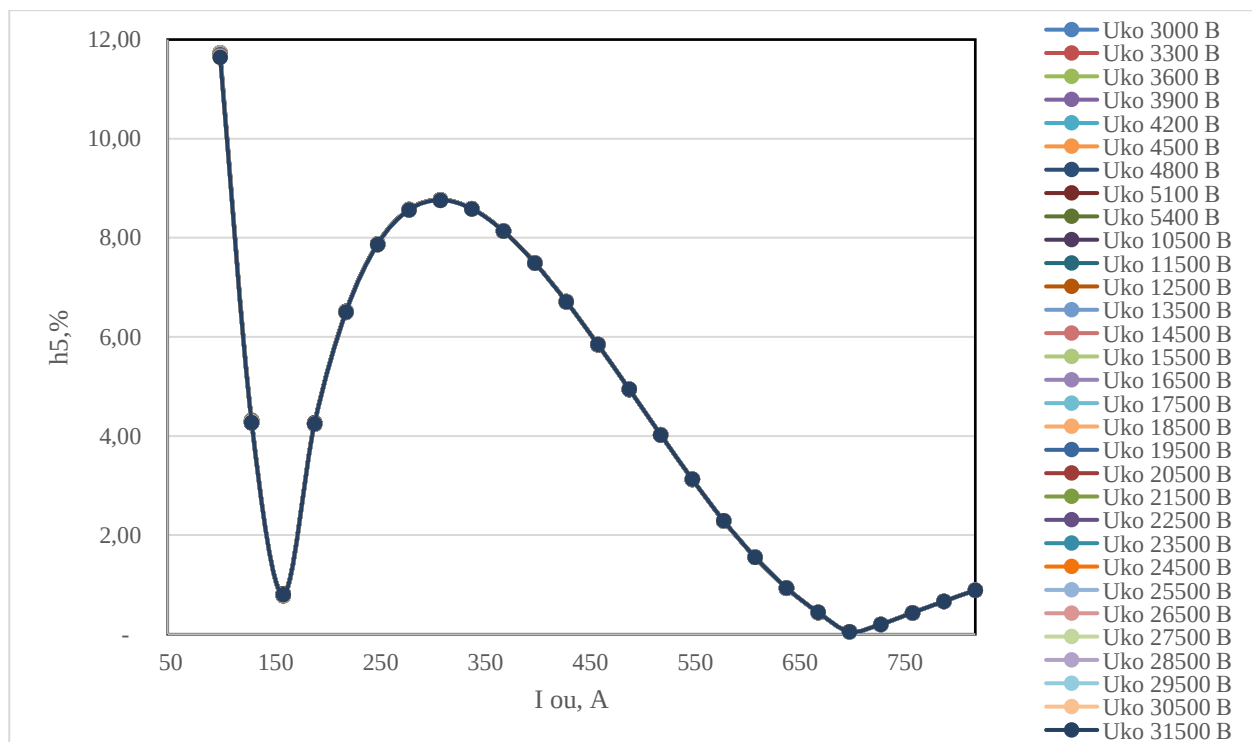


Рисунок 4.25 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

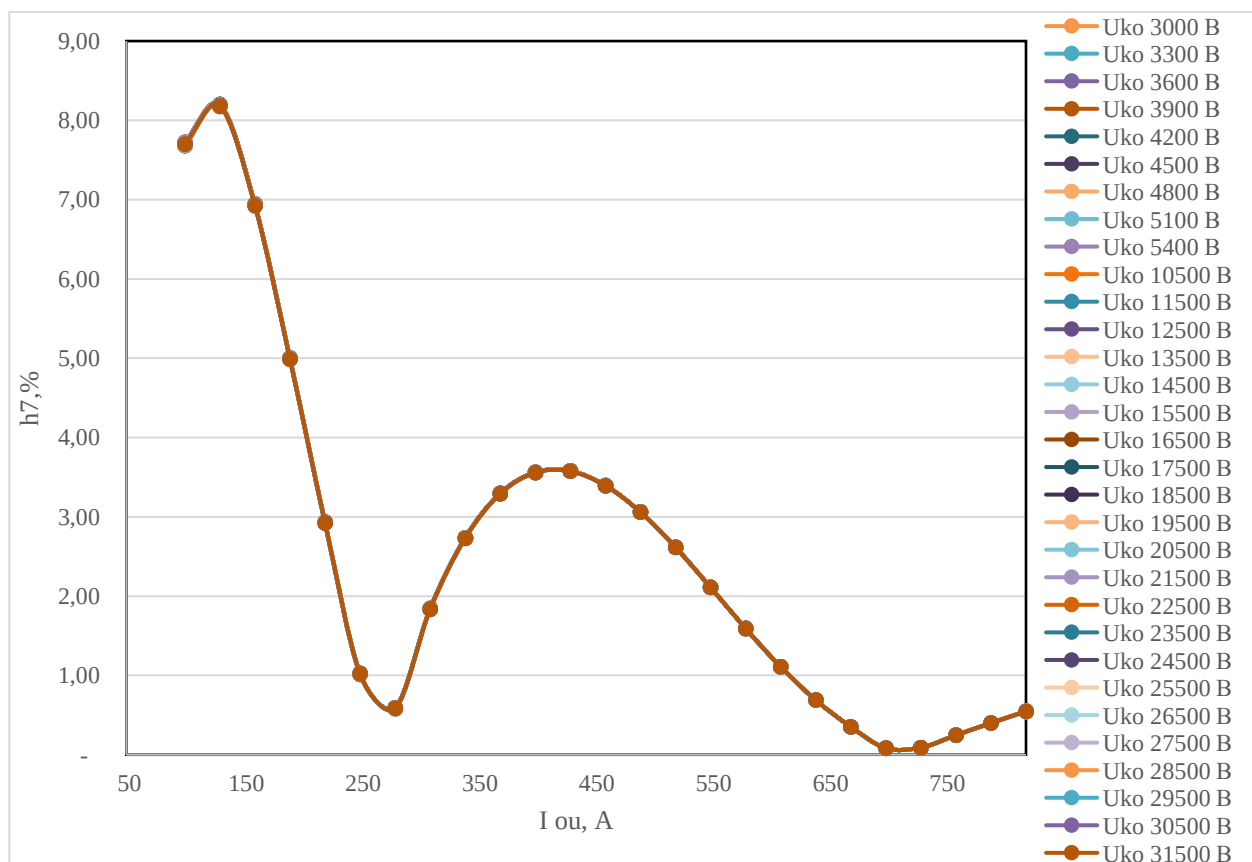


Рисунок 4.26 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

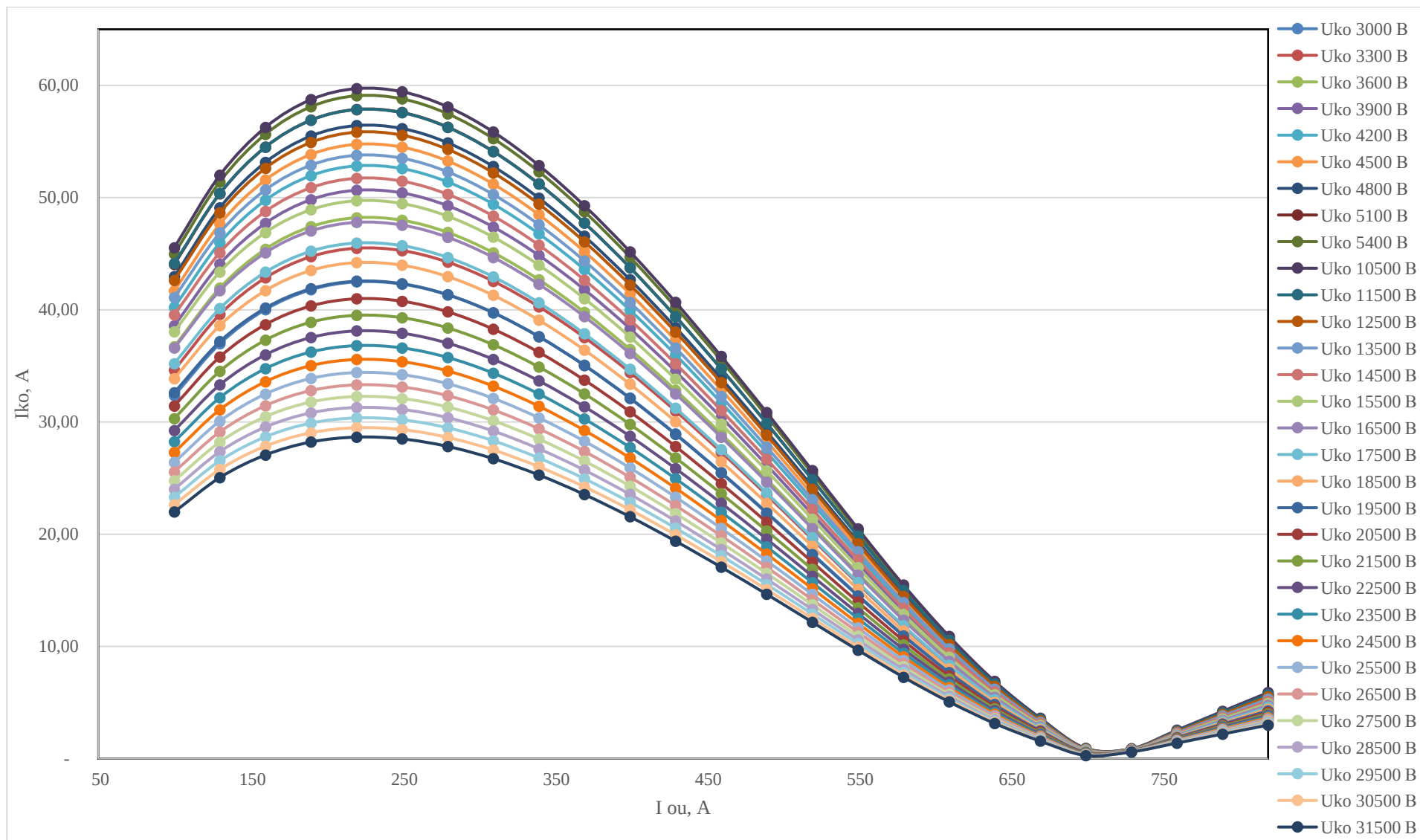


Рисунок 4.27 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$, $S_{стержня} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} = 0,29436 \text{ м}^2$

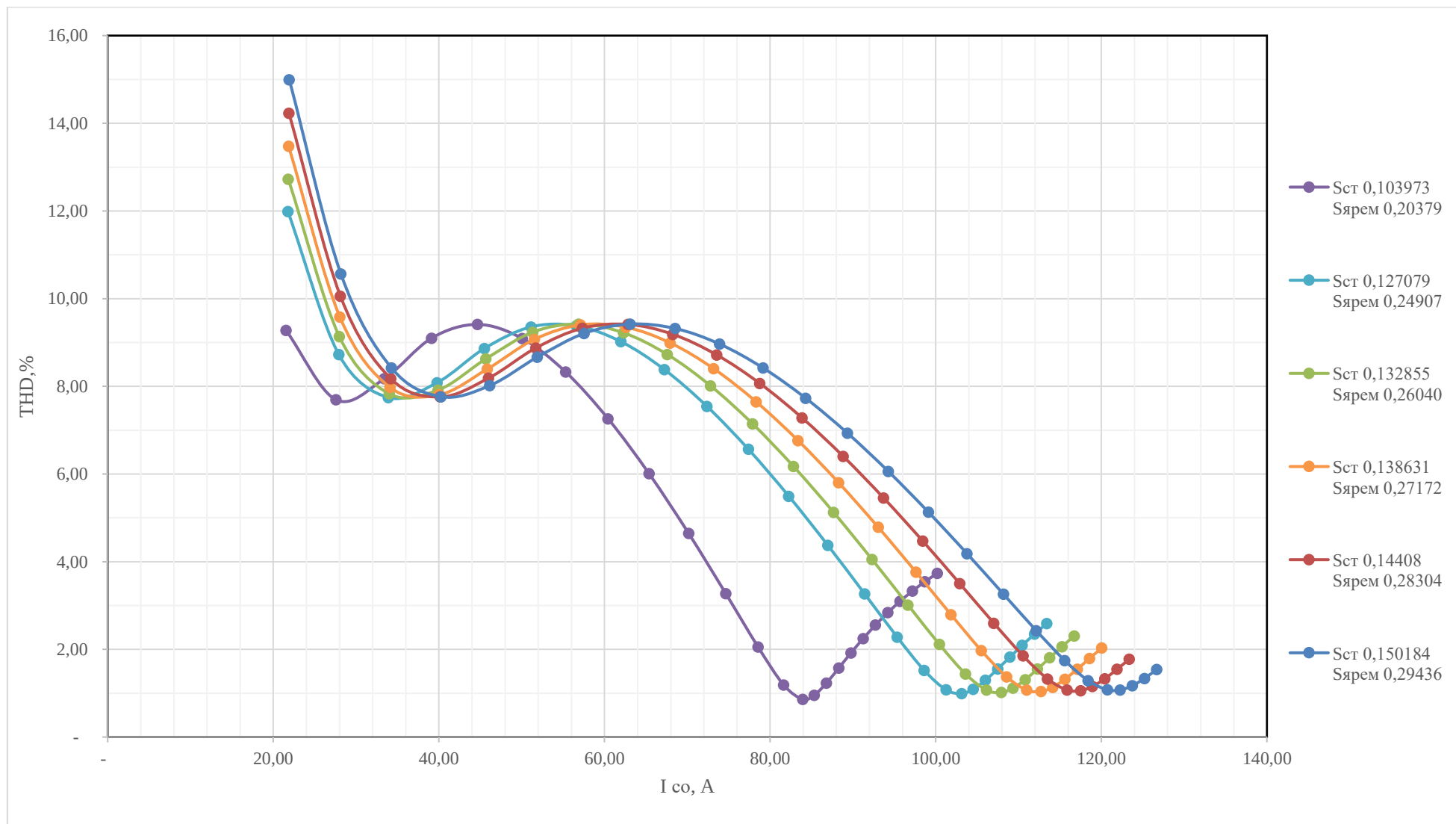


Рисунок 4.28 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} при изменении сечений стержня $S_{стержня}$ и ярем $S_{ярем}$ напряжение компенсационной обмотки 31,5 кВ

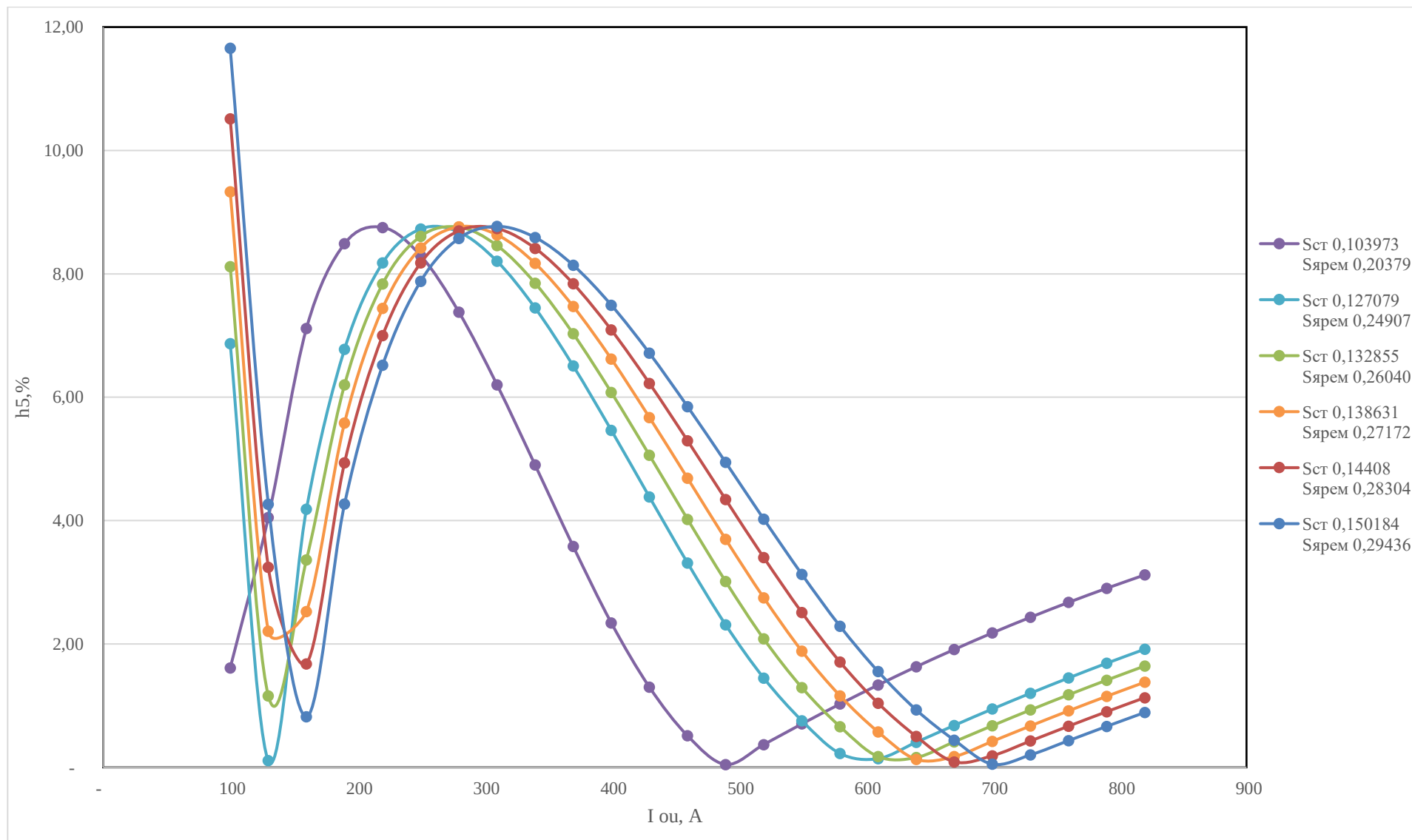


Рисунок 4.29 - График изменения 5-ой гармоника тока сетевой обмотки I_{co}

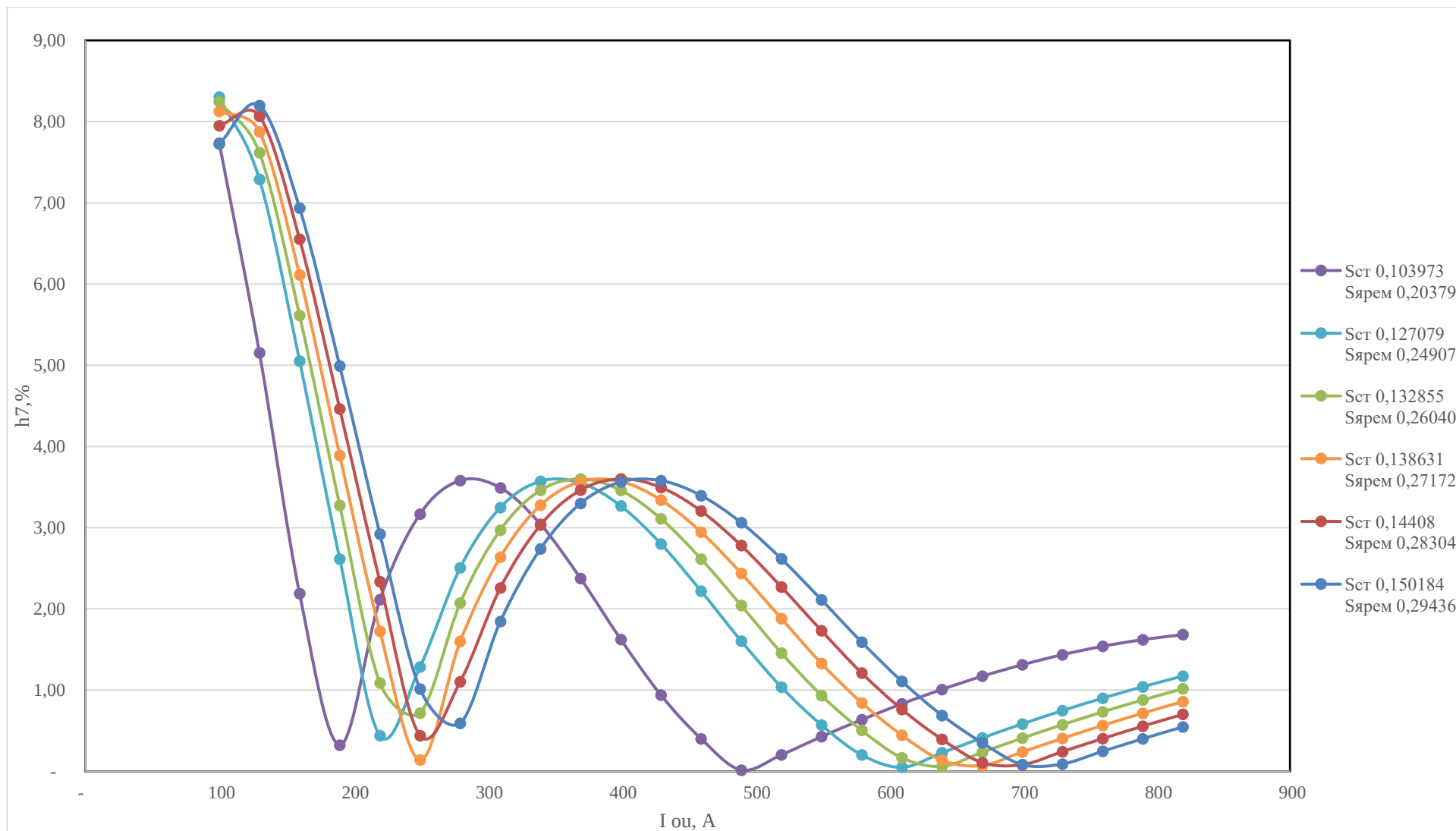


Рисунок 4.30 - График изменения 7-ой гармоника тока сетевой обмотки I_{co}

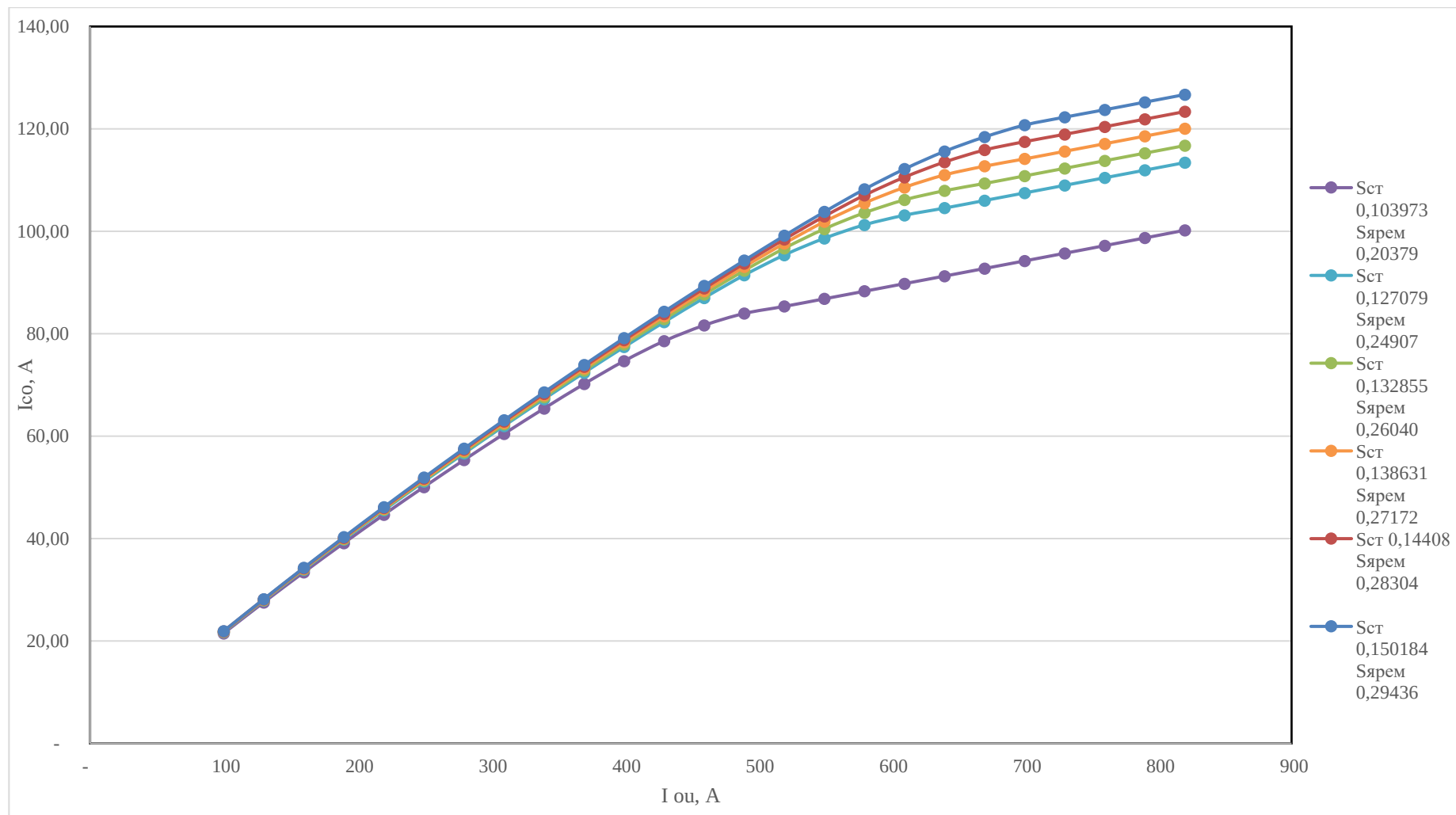


Рисунок 4.31- График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

Согласно графику, приведенному на рисунке 4.28, режим полупериодного намагничивания наступает при номинальных параметрах режима работы УШР при выборе сечения рабочих стержней $0,150184 \text{ м}^2$, сечения ярма $0,29436 \text{ м}^2$. При выборе сечений стержней и ярма больше или меньше, точка соответствия режиму полупериодного насыщения смещается влево или вправо по оси абсцисс и не соответствует номинальным параметрам режима УШР. То же самое касается и графиков изменения 5-ой и 7-ой гармоник. Что соответственно влияет на сам коэффициент гармоник THD.

Также проанализированы результаты моделирования работы УШР при изменении соотношения сечения ярма к сечению стержня. Результаты моделирования подтверждают результаты теоретических расчетов на основании эмпирических выражений. Оптимальным соотношением считается число близкое к значению 2. Помимо изменения сечения стержней, на мощность потребляемой УШР влияет также высота самого стержня и соответственно длина пути прохождения переменного магнитного потока. В разделе 4.7 приведены результаты моделирования при изменении высоты стержня.

4.7 Изменение высоты стержней при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.

Увеличение сечения стержня, при заданной магнитной индукции, приводит к увеличению магнитного потока, тем самым потребляемый сетевой обмоткой ток возрастает. Удлинение стержня ведет за собой удлинение средней длины магнитного потока, что в свою очередь также увеличивает потребляемый из сети ток. Ниже представлены результаты ряда экспериментов по удлинению стержня и анализу гармонического состава потребляемого тока УШР. Напряжение компенсационной обмотки принято 31,5 кВ, обмотки управления 5,5 кВ.

Сечение стержня принято $0,127 \text{ м}^2$ сечения ярма $0,249 \text{ м}^2$. Причина выбора данного ряда сечений кроется в превышении высоты стержня больше допустимого значения по вопросам транспортировки при выборе сечения стержня равным $0,1155 \text{ м}^2$. Режим полупериодного насыщения в этом случае наступает только при высоте стержня равной 3 м, только самого магнитопровода.

С целью оптимизации количества расчётов и времени моделирования напряжение компенсационной обмотки принято 31,5 кВ. Ранее, при моделировании работы УШР с различным сечением и соотношением стержней и ярма магнитопровода напряжение компенсационной обмотки устанавливалось в диапазоне 3 кВ – 5,4 кВ с шагом регулирования 0,3 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ с шагом регулирования 1 кВ. Решение по выбору напряжения компенсационной обмотки равной 31,5 кВ принято на основании меньшего коэффициента гармоник в начальных стадиях подмагничивания УШР при большем напряжении компенсационной обмотки.

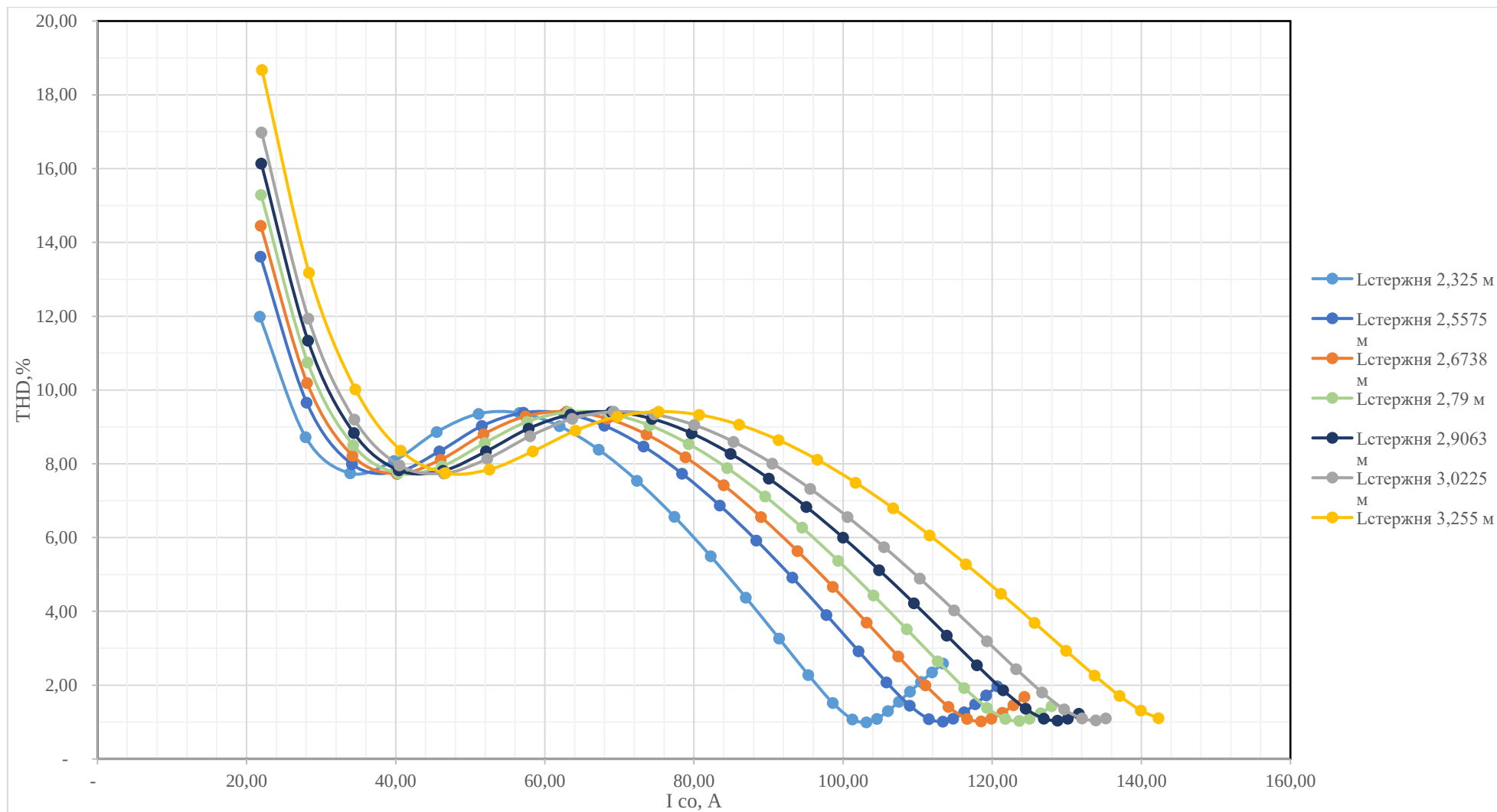


Рисунок 4.32 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} при изменении высоты стержня $L_{стержня}$

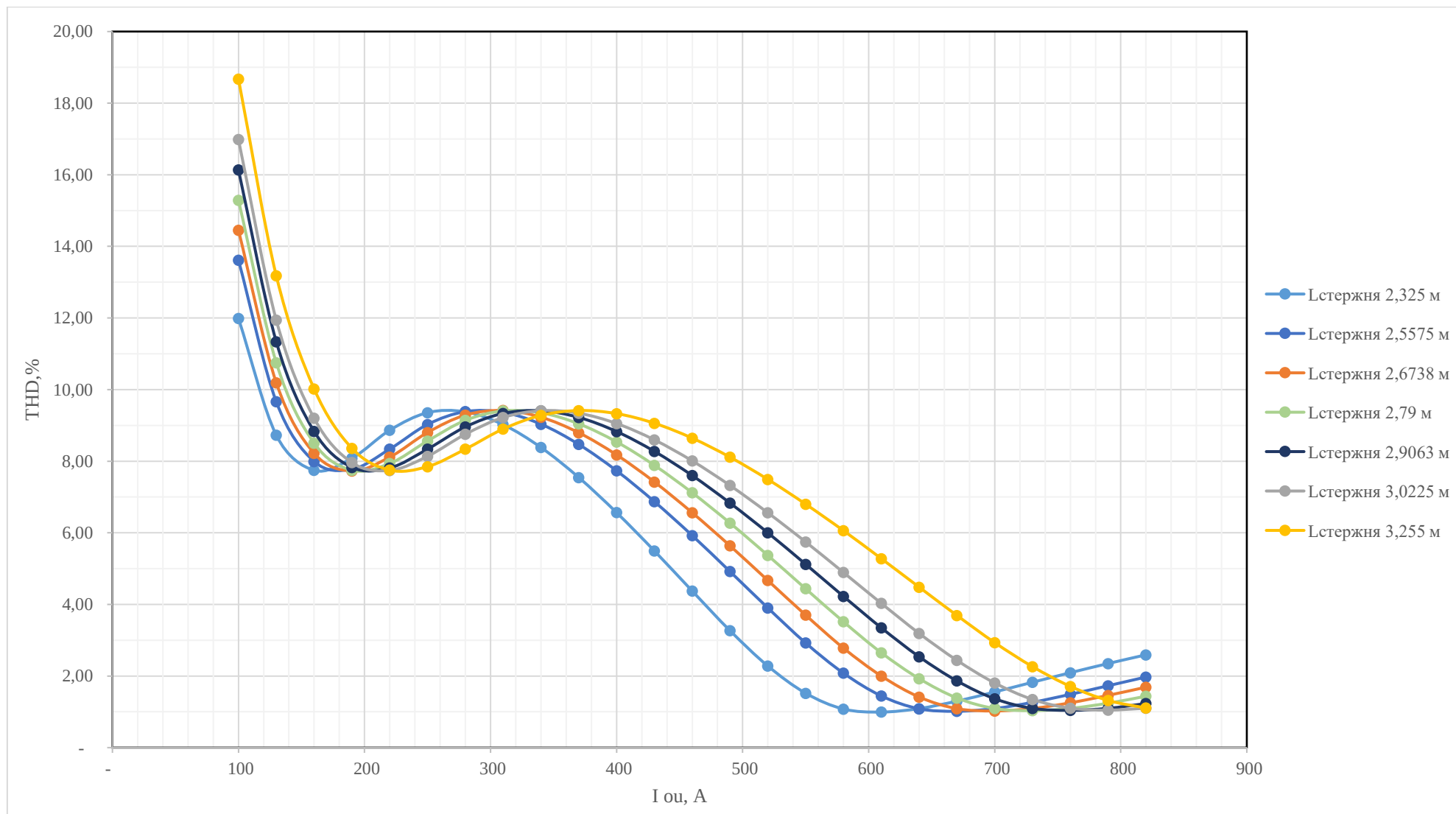


Рисунок 4.33 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{со}$ при изменении высоты стержня $L_{стержня}$

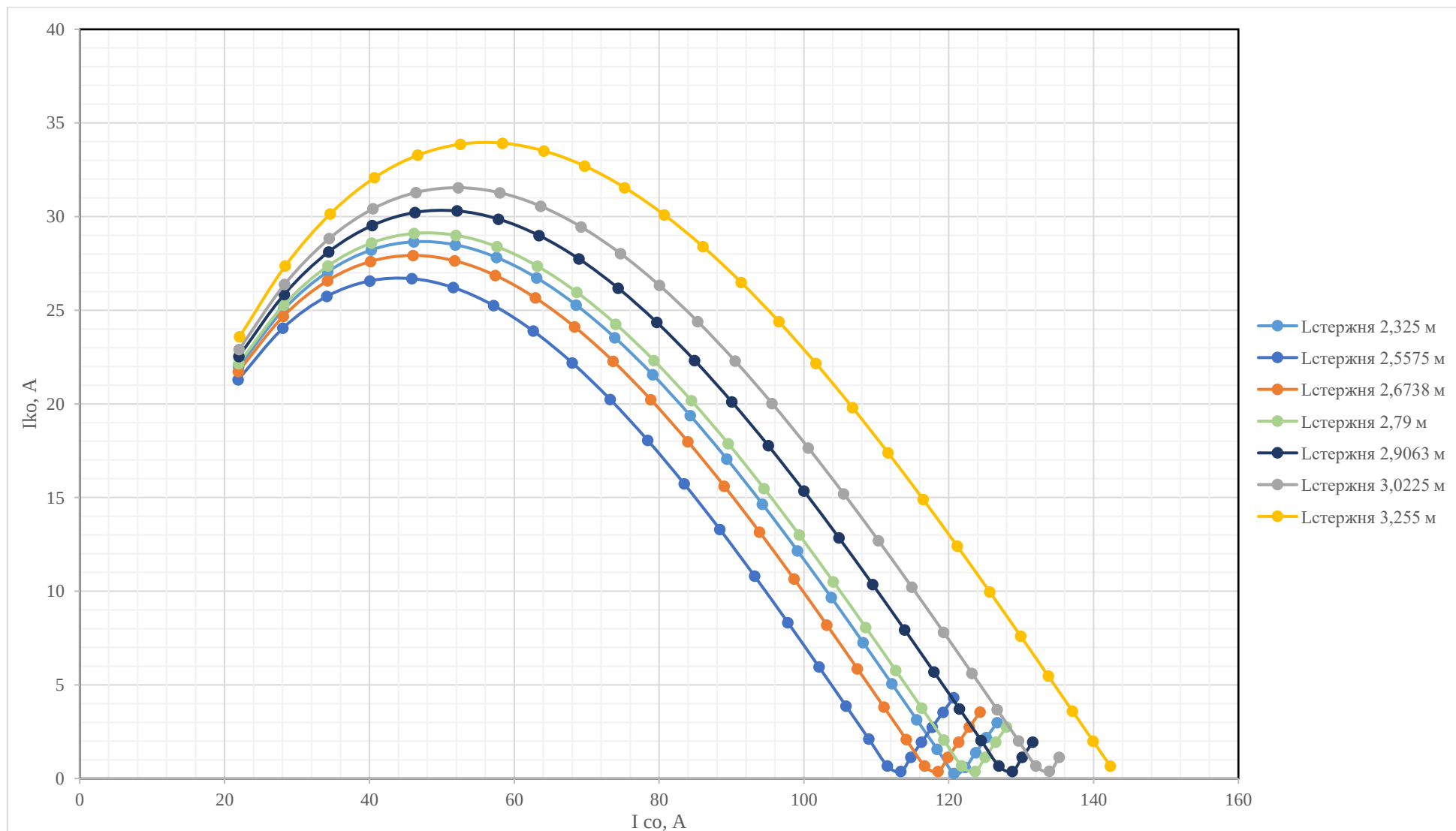
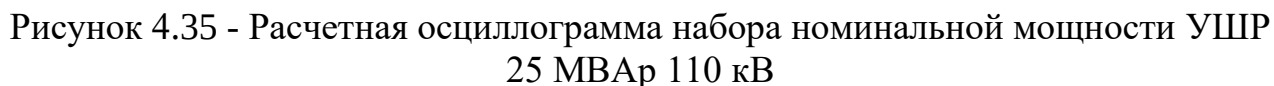


Рисунок 4.34 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ в зависимости от тока сетевой обмотки $I_{со}$ при изменении высоты стержня $L_{стержня}$

Тоже самое касается и графиков изменения 5-ой и 7-ой гармоник. Что соответственно влияет на сам коэффициент гармоник THD. Ток в компенсационной обмотке стремится к нулю по мере наступления режима полупериодного намагничивания. При дальнейшем увеличении намагничивания ток в компенсационной обмотке возрастает.

По результатам моделирования работы УШР при изменении сечения и высоты стержней была проанализирована и скорость набора мощности реактора. Выход на номинальные параметры тока сетевой обмотки наступал только на 7 секунде моделирования. Столь долгое время регулирования потребления реактивной мощности из сети можно объяснить электромагнитными процессами в сетевой обмотке УШР.



Быстродействие УШР в распределительных электрических сетях напряжением до 110 кВ не регламентировано, по причине того, что скорость изменения нагрузок в суточном графике не высокая и не требует мгновенного изменения потребления реактивной мощности. В то же время установка УШР, при улучшении характеристик быстродействия, способствует сохранению устойчивости двигательной нагрузки в переходных режимах сети, связанных с близкими к короткому замыканию.

Большой опыт эксплуатации и исследований управляемых шунтирующих реакторов в зарубежных странах, в особенности в Российской Федерации, позволяет применить технические решения для задач по оптимизации работы исследуемого реактора.

Одним из таких технических решений является заземление нейтралей СО УШР через активные сопротивления (рисунок 4.36), как это было предложено и выполнено в четырехстержневой конструкции УШР [12, с.90]. Это позволит значительно увеличить быстродействие УШР в режимах набора и сброса мощности, снизить значение и время затухания переходных составляющих тока подмагничивания в секциях и нейтралях СО.

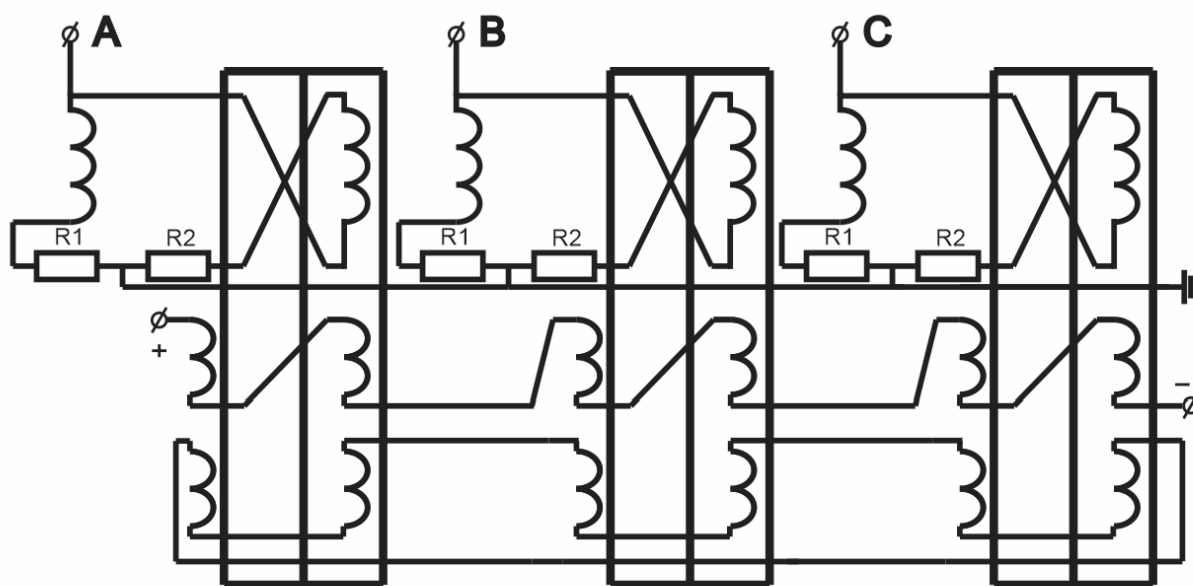


Рисунок 4.36 – Схема соединений УШР с повышенным быстродействием

Ниже представлены результаты моделирования при установке сопротивления номиналом 20 Ом. Графики набора мощности УШР при установке сопротивлений с другим номиналом представлены в приложении Е, сами результаты моделирования скорости регулирования УШР при различных сопротивлениях представлены в таблице 4.3.

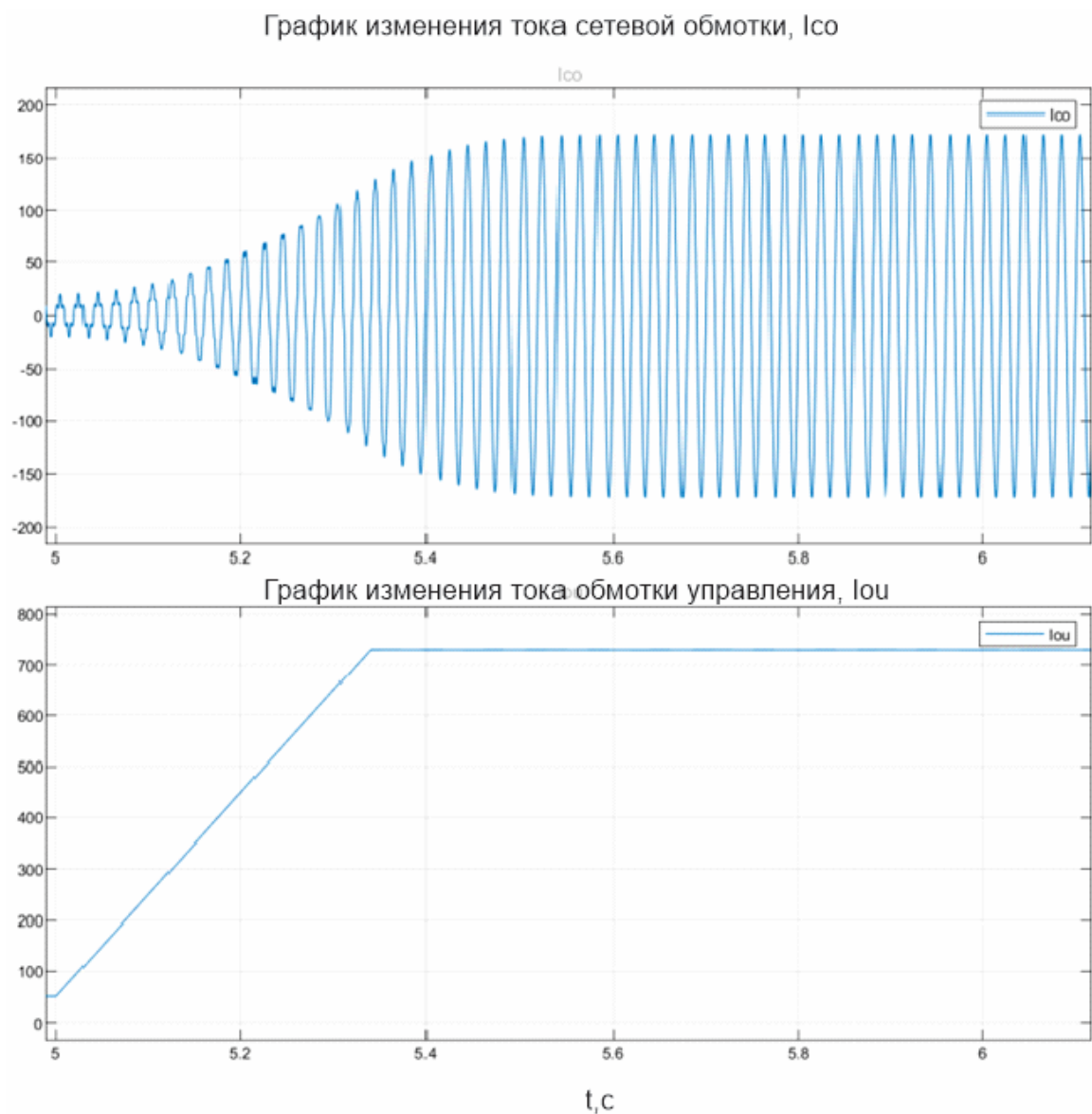


Рисунок 4.37 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1 = R_2 = 20 \text{ Ом}$

Таблица 4.3 - Результаты моделирования скорости регулирования УШР

№	Сопротивление R_1 , Ом	Сопротивление R_2 , Ом	Время набора мощности, с
1	-	-	7,5
2	10	10	1,4
3	10	0	4,1
4	20	20	0,8
5	30	30	0,58
6	40	40	0,55
7	50	50	0,5

Встроенные активные сопротивления позволяют в несколько раз уменьшить значение и время затухания переходных составляющих тока подмагничивания в нейтралях и секциях СО, что многократно сокращает время

переходного процесса. Дальнейшее увеличение сопротивления нейтралей СО (более 20 Ом) практически не даёт эффекта.

Выводы:

1. По результатам моделирования режим полупериодного насыщения в номинальном режиме работы реактора был получен при трех модификациях магнитопровода.

- Первый при увеличении магнитной индукции переменного поля до 1,97 Тл. Потребляемый ток сетевой обмотки составил 121 А, коэффициент гармоник 1,38.

- Второй при увеличении сечения стержня до 0,15 м² и ярем 0,29 м². Потребляемый ток сетевой обмотки составил 121 А, коэффициент гармоник 1,08.

- Третий при одновременном увеличении сечения стержня до 0,127 м² (сечение ярем до 0,249 м²) и удлинения стержня до 2,79 м. Ток сетевой обмотки 123 А, коэффициент гармоник 1,09.

В плане коэффициента гармоник не такая большая разница, принимая во внимание, что в первом случае уменьшается количество обмоток сетевой обмотки, а во втором и третьем варианте увеличивается расход материалов – увеличение расхода стали на утолщение стержня и ярма. Второй и третий варианты модификаций магнитопровода предпочтительнее, по причине больших потерь на потоки рассеяния в первом варианте. Второй и третий вариант следует сравнивать с точки зрения расхода активных материалов и в данной работе сравнительный анализ не выполнялся, но и при предварительных укрупненных расчетах следует вывод, что конструкция магнитопровода с одновременным увеличением длины и сечения стержня, самый оптимальный (третий). Увеличение сечения стержня до 0,15 м² и ярем до 0,29 м² как во втором варианте, влечёт за собой и увеличение сечения среднего стержня до 0,29 м².

Результаты моделирования показывают, что, при всех других условиях – номинальный режим не достигается при полупериодном насыщении.

2. Исследовано влияние третьей гармоники индукции на пятую и седьмую гармоники тока сетевой обмотки. По результатам моделирования третья гармоника индукции никак не влияет на гармоники порядка 5 и 7 потребляемого тока. В ходе моделирования изменялось номинальное напряжение компенсационной обмотки, соответственно и количество витков.

3. Третья гармоника индукции влияет на девятую гармонику тока. Причем, в промежуточных режимах намагничивания УШР, увеличение напряжения компенсационной обмотки влияет в сторону уменьшения значения амплитуды девятой гармоники. Результаты моделирования и анализа влияния третьей гармоники индукции приведены в Приложении Е.

4. Как подтверждается моделированием ток в компенсационной обмотке действительно снижается до нуля по мере наступления режима полупериодного насыщения реактора. При дальнейшем подмагничивании ток в

компенсационной обмотке начинает увеличиваться. При дальнейшем подмагничивании регулирование будет иметь место за счет увеличения намагничивающей силы на участках ярем по естественной кривой намагничивания с генерацией высших гармоник.

5. При заданной напряженности постоянного поля величина индукции постоянного поля зависит от величины индукции переменного поля. Постоянная составляющая незначительно уменьшается при увеличении индукции переменного поля. В соответствии с эффектом магнитного выпрямления и увеличением первой гармоники индукции переменного поля B_1 незначительно уменьшается индукция постоянного поля подмагничивания.

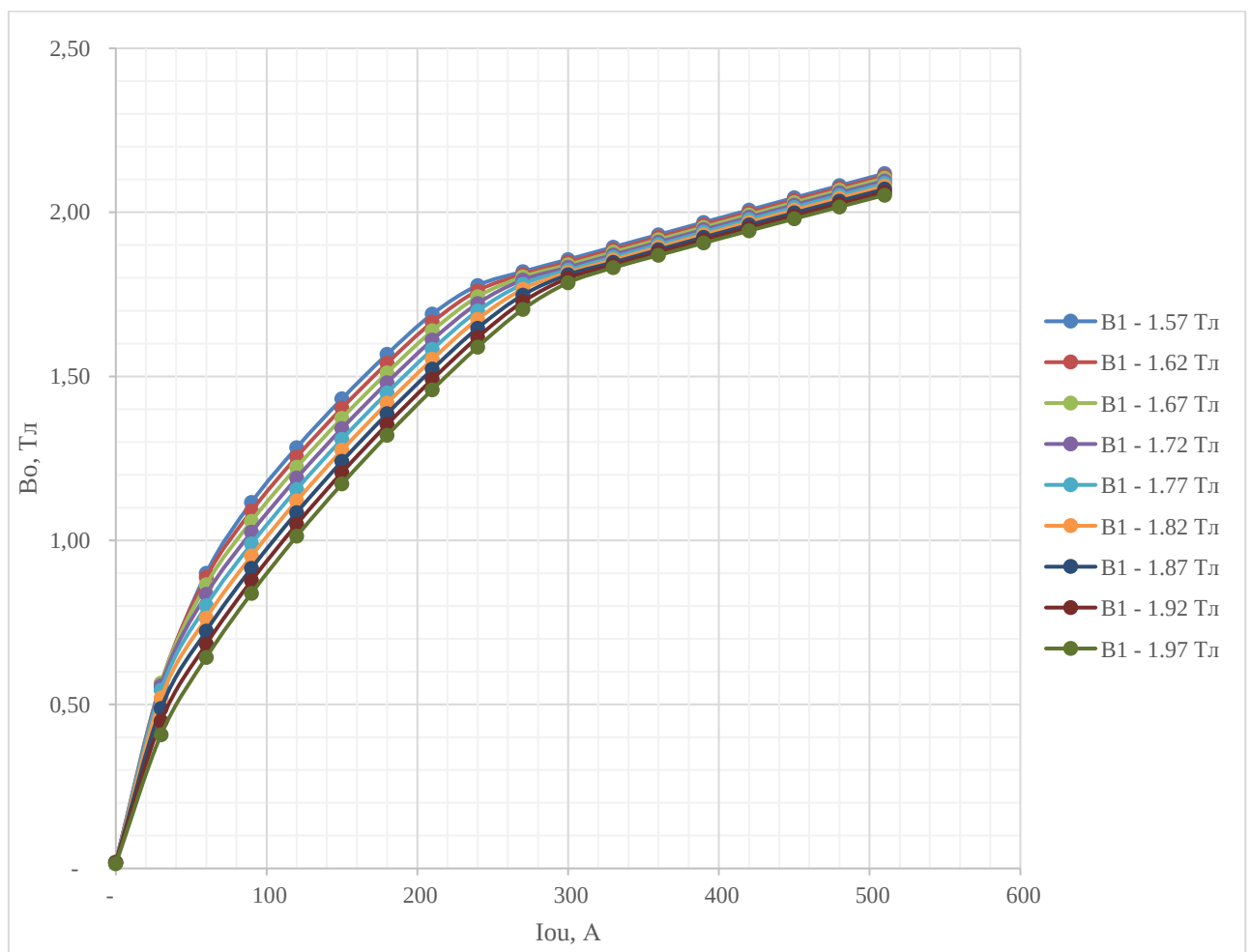


Рисунок 4.35- График изменения B_0

6. В начальный момент подмагничивания коэффициент гармоник тем больше, чем меньше номинальное напряжение компенсационной обмотки. Например по результатам моделирования модификации магнитопровода $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярём}} = 0,30938 \text{ м}^2$, коэффициент гармоник при номинальных напряжениях 10,5 кВ и 31,5 кВ составляет 21% и 6 % соответственно. Разница составляет 15 %.

5 РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Выполним разработку технической документации, для найденной оптимальной конструкции реактора по результатам имитационного моделирования. Сечение стержня $0,127 \text{ м}^2$, сечение ярем и среднего стержня $0,249 \text{ м}^2$, высота стержня $2,79 \text{ м}$. Конструкция магнитопровода УШР приведена на рисунке 5.1.

Номинальное напряжение СО 115 кВ, КО 31,5 кВ, ОУ 5,5 кВ. Мощность одной фазы реактора 8,3 МВАр, номинальный ток УШР 125 А.

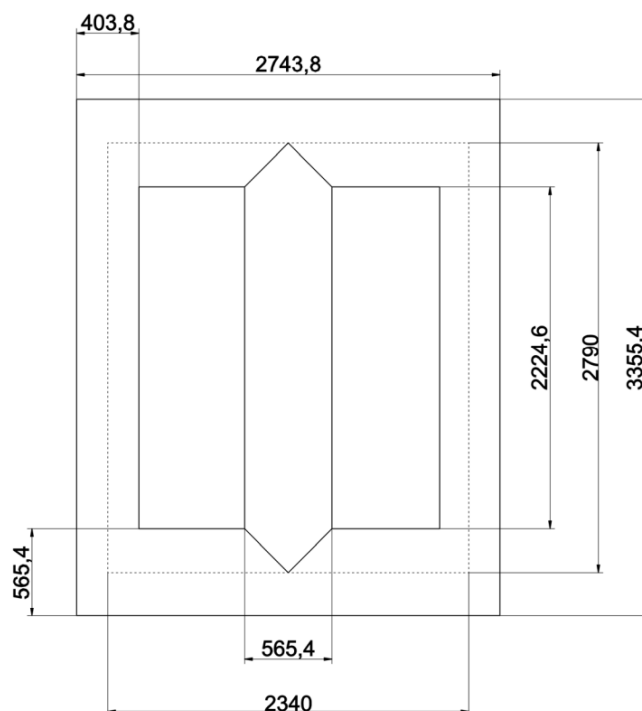


Рисунок 5.1 – Геометрические размеры магнитопровода УШР 110 кВ

5.1 Расчет основных параметров реактора

$$I_{\Phi BH} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{66,47} = 50,14 \text{ А},$$

количество витков обмотки ВН

$$W_{\Phi BH} = \frac{U_{\Phi}}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S} = \frac{66395}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,72 \cdot 0,127} = 1368,$$

номинальная намагничивающая сила первичной обмотки:

$$F_{\Phi ТВН} = I_{\Phi BH} \cdot W_{\Phi BH} = 50,14 \cdot 1368 = 68591 \text{ ампер – витков},$$

номинальный ток обмотки СН:

$$I_{\phi CH} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{22,22} = 150 \text{ A},$$

количество витков обмотки СН:

$$W_{\phi CH} = \frac{22220}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,72 \cdot 0,127} = 458,$$

номинальная намагничивающая сила обмотки СН:

$$F_{\phi CH} = I_{\phi CH} \cdot W_{\phi CH} = 150 \cdot 458 = 58\,050 \text{ ампер – витков},$$

номинальный ток обмотки НН, соединенной в треугольник:

$$I_{\phi HH} = \frac{S_{\phi}}{U_{\Delta}} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{5,5} = 606 \text{ A},$$

количество витков обмотки НН:

$$W_{\phi HH} = \frac{5500}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,72 \cdot 0,127} = 113,$$

номинальная намагничивающая сила обмотки НН:

$$F_{\phi HH} = I_{\phi HH} \cdot W_{\phi HH} = 606 \cdot 113 = 68\,416 \text{ ампер – витков}$$

5.2 Количество витков обмоток и сечение проводников

Сечение обмоток рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{\text{обмотки}} = \frac{I}{j}, \quad (5.1)$$

где I – значение тока, который будет течь через обмотки, А;

j – плотность тока. Примем минимальное значение плотности тока для алюминиевых обмоток равной $j=1,51 \text{ А/мм}^2$.

Согласно результатам моделирования работы УШР с данными параметрами, ток обмотки управления, при котором наступает режим полупериодного насыщения, равен $I_{oy} = 730 \text{ А}$. Номинальный потребляемый ток из сети равен $I_{co} = 125 \text{ А}$. Максимальный потребляемый действующий ток в компенсационной обмотке при выбранном сечении и высоты стержня равен $I_{ko} = 29 \text{ А}$ (наступает при 40% потребляемой мощности реактора).

Таким образом сечение обмоток УШР:

$$S_{OY} = \frac{730}{1.51 \cdot 10^6} = 483 \text{ мм}^2.$$

$$S_{CO} = \frac{125}{1.51} = 82,78 \text{ мм}^2,$$

$$S_{KO} = \frac{30}{1.51} = 19,86 \text{ мм}^2,$$

По полученным значениям можно выбрать марку провода. Все обмотки будут прямоугольными, такая форма выбрана с целью более плотного закрепления катушек. Марка всех обмоток АПБ (обмоточный провод с бумажной изоляцией), разница будет в ширине (а) и высоте (б) провода в зависимости от тока, который будет через нее протекать:

– Сетевая обмотка. Номинальный ток 125 А. Выбираем многослойную цилиндрическую обмотку из прямоугольного алюминиевого провода марки АПБ по ГОСТ 16512-80 шириной (а) 5,6 мм и высотой (б) 15 мм, сечение $S = 83,1 \text{ мм}^2$.

АПБ (число параллельных проводов) $\times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры провода с изоляцией}}$

$$\text{АПБ } 1 \times \frac{5,6 \cdot 15}{6,1 \cdot 15,5}$$

– Компенсационная обмотка. Номинальный ток 30 А, $a = 3,75 \text{ мм}$, $b = 5,6 \text{ мм}$, $S = 20,1 \text{ мм}^2$. Выбираем многослойную цилиндрическую обмотку из прямоугольного провода марки АПБ $1 \times \frac{3,75 \cdot 5,6}{4,25 \cdot 6,1}$

– Обмотка управления. Номинальный ток 483 А. Подбираем сечение витка из двенадцати параллельных проводов, $a = 4,5 \text{ мм}$, $b = 9,5 \text{ мм}$, $S = 41,9 \cdot 12 = 502,8 \text{ мм}^2$. АПБ $12 \times \frac{4,5 \cdot 9,5}{5 \cdot 10}$, разделены на две группы по шесть проводов с каналами по 5 мм между группами витка и между витками. Иллюстрация компоновки параллельных проводов в один проводник, приведена на рисунке 5.2. Обмотку выбираем винтовую.

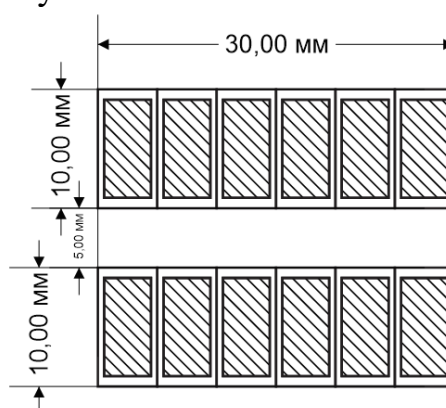


Рисунок 5.2 - Сечение витка обмотки ОУ из алюминиевого провода

В обмотках УШР из прямоугольного провода, каждый провод которых с двух сторон омывается маслом, значение радиального размера поперечного сечения провода не должно быть больше значения:

$$b = q \cdot \frac{k_3}{1.72 \cdot J^2 \cdot 10^4}, \quad (5.2)$$

где k_3 – коэффициент для винтовых и катушечных обмоток принимаем $k_3 = 1$, для цилиндрических $k_3 = 0,83$.

q – плотность теплового потока, образующегося на поверхности обмотки, которая для алюминиевых обмоток принята $q=1200$ Вт/м².

$$b_{(ou)} = 1200 \cdot \frac{1}{1,72 \cdot 1,5^2 \cdot 10^4} = 0,031 \text{ м.}$$

Радиальный размер обмотки управления $a_1=6 \cdot 5 \cdot 10^{-3}=0,030$ м, что меньше чем $b=0,031$.

5.3 Расчет изоляции

Чтобы выбрать изоляцию обмоток, сначала необходимо узнать значения их испытательных напряжений промышленной частоты (50 Гц):

Таблица 5.1 – Испытательное напряжение обмоток УШР

Обмотка	Номинальное линейное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ
Сетевая	110	200
Компенсационная	35	85
Управления	5,5	25

Главная изоляция обмоток.

Изоляция главной части обмотки СО от КО определяется испытательным напряжением 200 кВ. Изоляция между обмотками СО и КО осуществляется масляным каналом с размером 50 мм и двумя цилиндрами из электроизоляционного картона толщиной 4 мм каждый.

Изоляция обмотки ОУ от стержня выбирается по ее испытательному напряжению. По соображениям электродинамической стойкости рекомендуется наматывать эту обмотку на жестком бумажно - бакелитовом цилиндре толщиной 6-10 мм.

ОУ от ярма L_{01} мм – Принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки КО и СО

ОУ от стержня $a_{01}=17,5$ мм, $\delta_{01}=4$ мм

Выступ цилиндра $a_{ц1}=8$ мм, $L_{ц1}=25$ мм

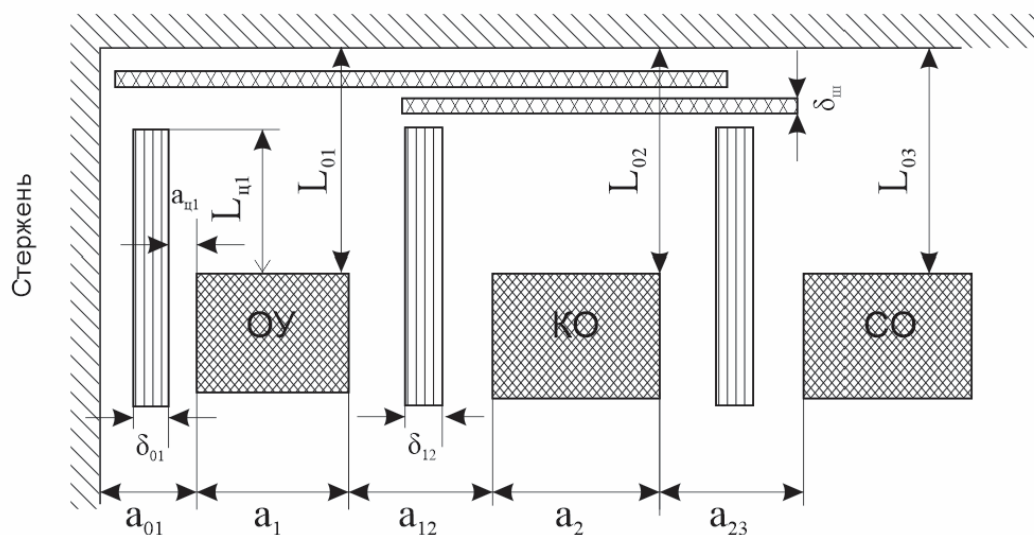


Рисунок 5.3 - Изоляционные расстояния обмоток УШР

КО от яра, $L_{02} = 80$ мм, $\delta_{ш} = 3$ мм
 Между КО и ОУ, мм $a_{12} = 30$, $\delta_{12} = 6$ мм
 Выступ цилиндра $a_{ц2} = 8$ мм, $L_{ц2} = 50$ мм
 СО от яра, $L_{03} = 185$ мм, $\delta_{ш} = 3$ мм
 Между СО и КО, мм $a_{23} = 50$, $\delta_{22} = 4$ мм
 Выступ цилиндра $a_{ц3} = 10$ мм, $L_{ц2} = 50$ мм

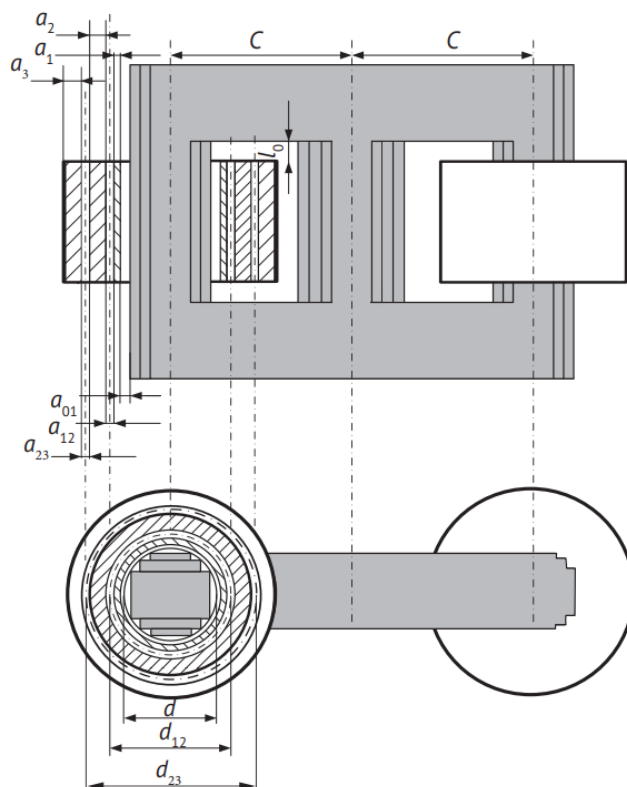


Рисунок 5.4 – Иллюстрация основных размеров УШР

Продольная изоляция обмоток.

Под продольной изоляцией обмоток понимается изоляция между витками, между слоями витков и между катушками. Материалом является кабельная бумага марки К-120 толщиной 0,12 мм. При испытательном напряжении 5-85 кВ и 200 кВ толщина изоляции проводов марки АПБ на две стороны 0,45 (0,50) мм.

Изоляционным материалом между обмотками и между катушками в магнитопроводе выбрана кабельная бумага К-120. Это диэлектрический материал, выпускаемый в рулонах шириной 600 мм (± 3 мм), толщиной 0,12 мм.

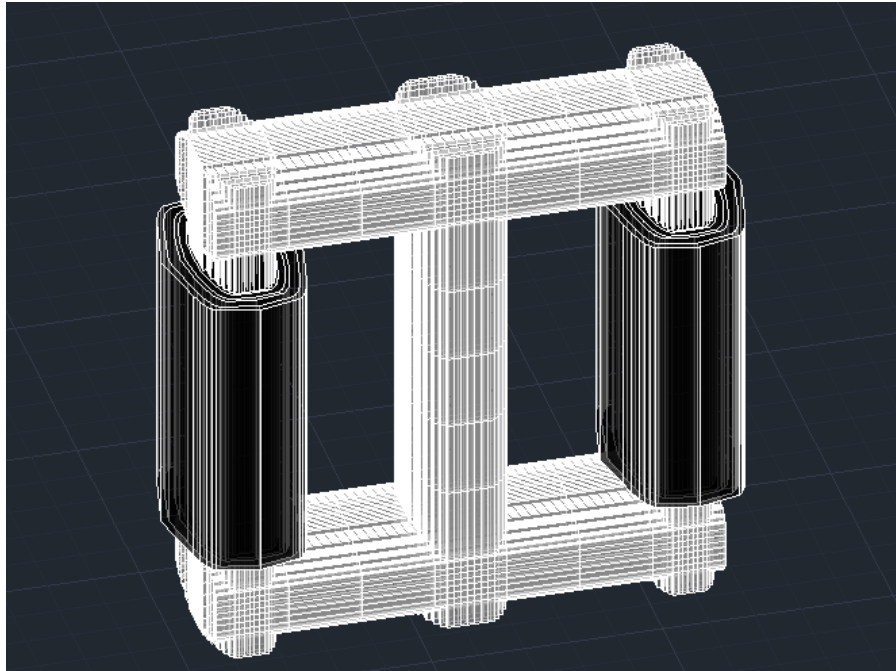


Рисунок 5.5 – Межобмоточная изоляция УШР

5.4 Геометрические размеры обмоток

Учитывая характеристики магнитопровода УШР, была рассчитана высота обмотки 1964 мм. Расстояние от края обмотки до верхнего ярма 185 мм, до нижнего ярма 75 мм. Такая высота соответствует правилам установки обмоток.

Для расчета количества слоев проводов в обмотках УШР необходимы размеры высоты. Которые, определяются, учитывая толщину изоляции по формуле:

$$h_{\text{выс}} = n \cdot d_{\text{выс}} + d_{\text{изол.}} , \quad (5.3)$$

где n – количество параллельно соединенных проводов в обмотке;

$d_{\text{выс}}$ – высота выбранного провода с учетом изоляции, мм;

$d_{\text{изол.}}$ – толщина изоляции между параллельными проводами, мм.

Высота обмоток УШР с учетом изоляции:

$$h_{\text{выс(ОУ)}} = 2 \cdot 10 + 5 = 25 \text{ мм},$$

$$h_{\text{выс(КО)}} = 1 \cdot 6,1 = 6,1 \text{ мм},$$

$$h_{\text{выс(СО)}} = 1 \cdot 15,5 = 15,5 \text{ мм}.$$

Тогда можно узнать, сколько витков можно положить в 1 слой обмотки по формуле:

$$\omega_{1\text{слой}} = \frac{d_{\text{обмотки}}}{h_{\text{выс}}}, \quad (5.4)$$

Количество витков, которое можно намотать в 1 слой обмотки УШР

$$\omega_{1\text{слой(ОУ)}} = \frac{1964}{25} = 78,56 = 78 \text{ витков},$$

$$\omega_{1\text{слой(КО)}} = \frac{1964}{6,1} = 321,96 = 321 \text{ витков},$$

$$\omega_{1\text{слой(СО)}} = \frac{1964}{15,5} = 126,7 = 126 \text{ витков}.$$

Числов витков ОУ – 113. Число слоев ОУ = $113/78 = 1,45$.

Числов витков КО – 1368. Число слоев КО = $458/321 = 1,42$.

Числов витков СО – 1368. Число слоев СО = $1368/126 = 10,85$.

СО наматывается в одиннадцать слоев. Общий суммарный радиальный размер обмотки $a = 6,1 \cdot 11 = 67,1$ мм и больше допустимого размера 0,031 м.

В многослойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода возникают добавочные потери, вызываемые вихревыми токами. При осевом направлении потока магнитного поля рассеяния обмоток эти потери пропорциональны четвертой степени радиального размера провода обмотки и квадрату числа слоев обмотки в радиальном направлении.

В обмотках этого типа обычно стараются выбрать число слоев обмотки и радиальный размер провода так, чтобы добавочные потери не превысили 5 % основных потерь обмотки.

Поэтому обмотку разделяем на три концентрические катушки - внутреннюю в четыре слоя, среднюю в четыре слоя и наружную в три слоя. Между катушками осевой охлаждающий канал шириной 9 мм. При одиннадцати слоях алюминиевого провода с радиальным размером 5,6 мм добавочные потери в обмотке составят менее 5 %.

Чтобы найти радиальный размер обмотки, сначала нужно узнать ее толщину в один слой с изоляцией самого провода, находя ее следующим образом:

$$h_{\text{ширина}} = n \cdot d_{\text{ширина}} + d_{\text{изол.}}, \quad (5.5)$$

где n – количество параллельно соединенных проводов в обмотке по ширине провода;

$d_{\text{ширина}}$ – ширина выбранного провода с учетом изоляции, мм;

$d_{\text{изол.}}$ – ширина изоляции между параллельными проводами, мм.

Ширина обмоток УШР с учетом изоляции:

$$h_{\text{ширина(OU)}} = 6 \cdot 5 = 30 \text{ мм},$$

$$h_{\text{ширина(KO)}} = 1 \cdot 4,25 = 4,25 \text{ мм},$$

$$h_{\text{ширина(CO)}} = 1 \cdot 6,1 = 6,1 \text{ мм}.$$

Радиальный размер обмоток УШР с учетом межслойной изоляции и количеством слоев определяется по формуле:

$$a_{\text{обмотки}} = n_{\text{слоев}} \cdot h_{\text{толщ.}} + h_{\text{межслой изол.}} \quad (5.6)$$

где $n_{\text{слоев}}$ – количество слоев обмотки;

$h_{\text{толщ.}}$ – толщина выбранного провода с изоляцией для обмоток, мм;

$h_{\text{межслой изол.}}$ – межслойная изоляция материалом К-120, мм.

Окончательный радиальный размер обмоток УШР:

$$a_{1(\text{OU})} = 30 \cdot 2 = 60 \text{ мм},$$

$$a_{2(\text{KO})} = 4,25 \cdot 2 = 8,5 \text{ мм},$$

$$a_{3(\text{CO})} = 6,1 \cdot 11 + 2 \cdot 9 = 85,1 \text{ мм}.$$

Таблица 5.2 – Данные о характеристиках УШР на базе трансформатора

Технические характеристики	ТДТН 10000-110/35/10	УШР 25 МВАр, 110 кВ
$S_{\text{ф}}$, МВА	3,33	8,33
$U_{\text{ф}}$ (ВН-СО), кВ	66,47	66,47
$U_{\text{ф}}$ (СН-СО), кВ	22,2	18,2
$U_{\text{ф}}$ (НН-СО), кВ	11	5,5
B , Тл	1,68	1,72
W_1 , витков	1631	1368
W_2 , витков	546	458
W_3 , витков	271	113
I_1 , А	50,152	125
I_2 , А	149,864	30
I_3 , А	302,727	730
$S_{\text{стержня}}$, м^2	0,1156	0,127
$S_{\text{ярма}}$, м^2	0,1156	0,249
$L_{\text{стержня}}$, м	2,325	2,79

Одна фаза УШР спроектирована по техническим характеристикам, которые были рассчитаны в расчетной части, остальные 2 фазы будут идентичными. Полученная модель одной фазы может быть создана в реальных

условиях. Все данные, представленные на рисунках, измеряются в миллиметрах. Магнитопровод УШР проектируется согласно рисунку 5.1.

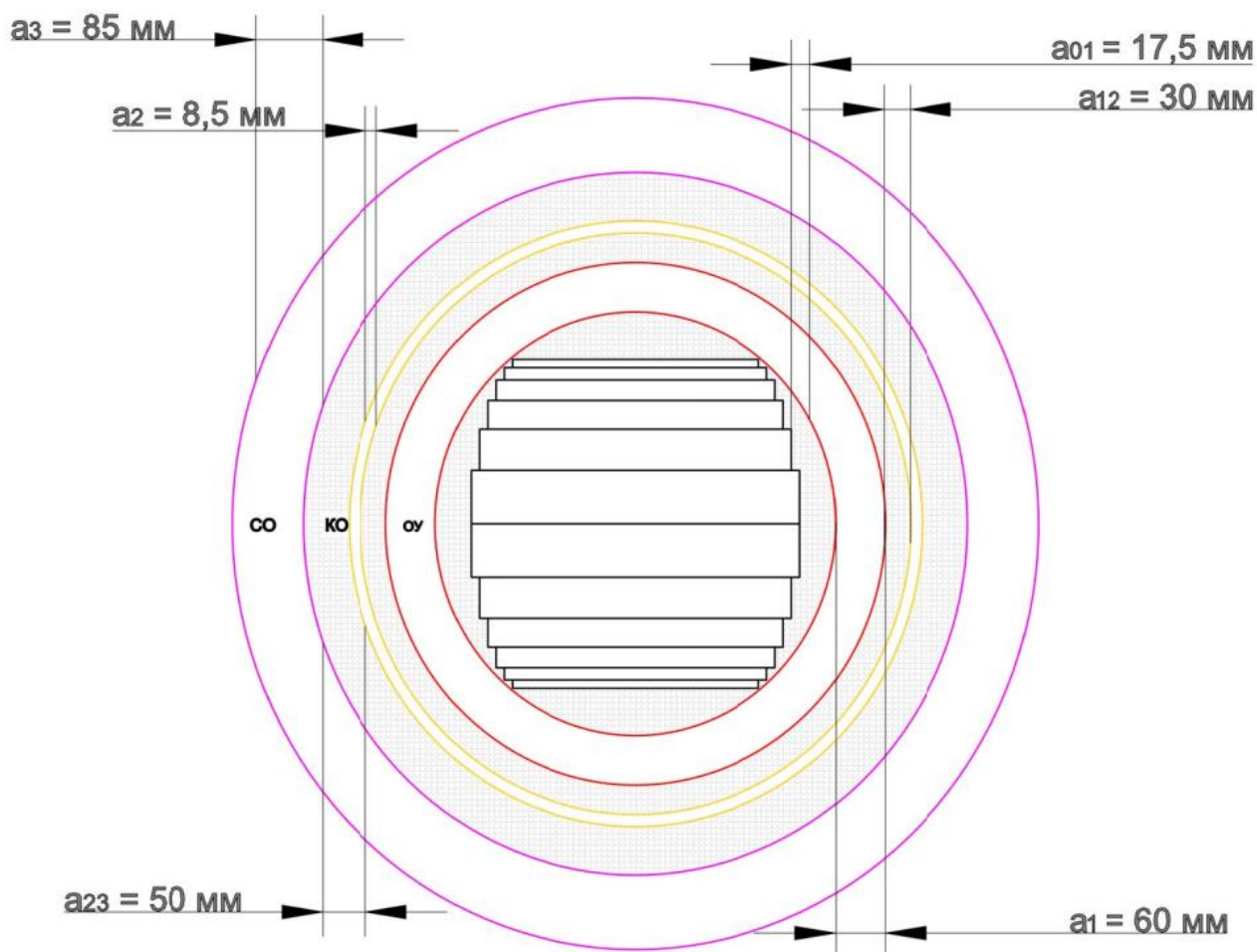


Рисунок 5.6 - Радиальное строение активной части однофазного УШР

Представлены расчеты обмоток и изоляций проектируемого реактора. Тепловой и механический расчет будет произведен в специализированных программных комплексах при дальнейших исследованиях на базе заводов производителей трансформаторов. Заинтересованность в разработке документации с дальнейшим серийным производством подтверждается актом внедрения от АО «Alageum electric», приведенном в приложении Ж.

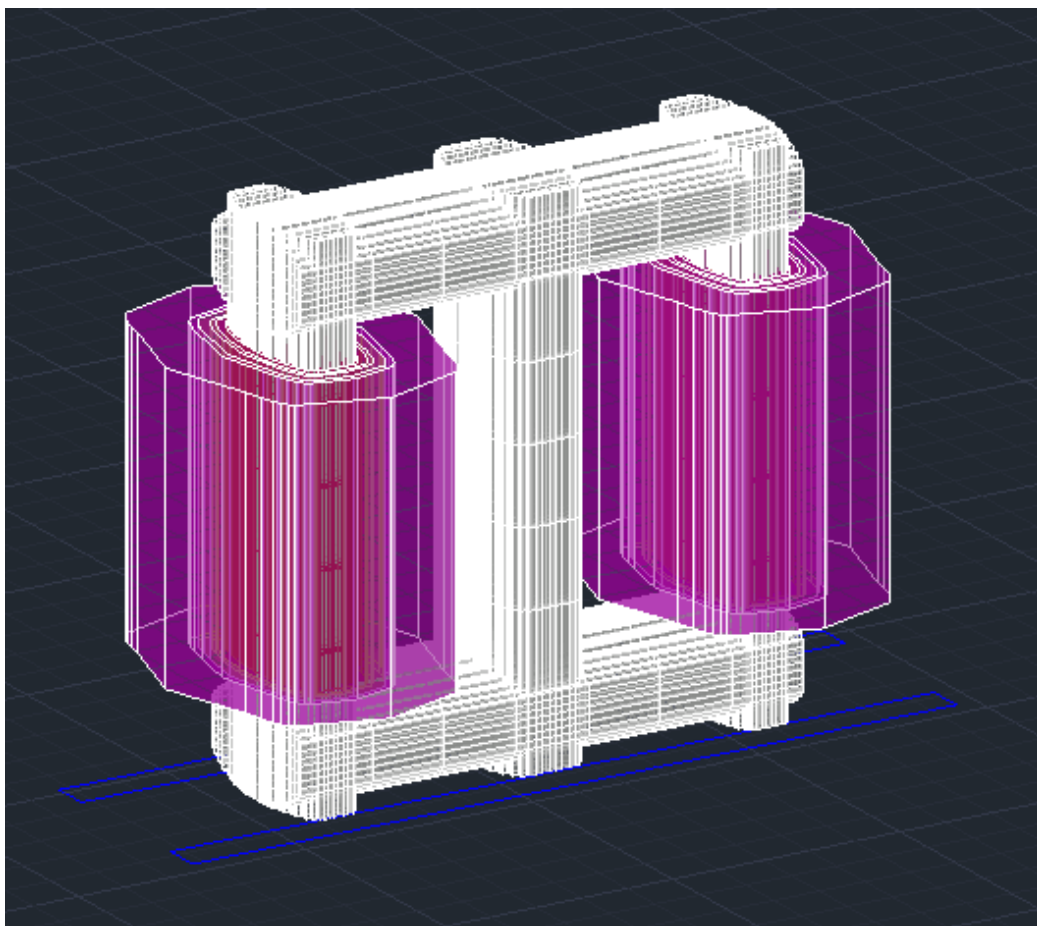


Рисунок 5.7 - Обмотки УШР в трехмерном исполнении

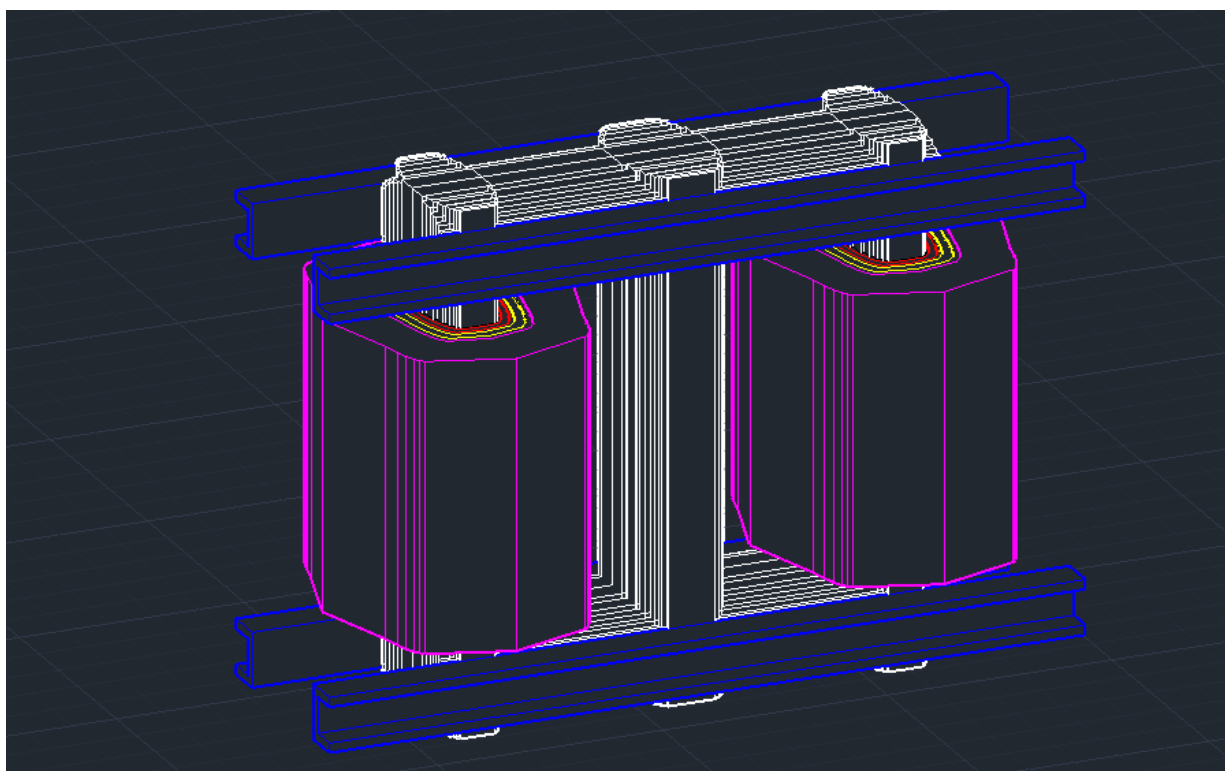


Рисунок 5.8 -Трехмерный вид одной фазы УШР

6 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЁХСТЕРЖНЕВОГО УШР

6.1 Постановка задачи оптимизации

В предшествующих главах разработана верифицированная имитационная модель трёхстержневого УШР, исследовано влияние конструктивных параметров магнитопровода на электромагнитные характеристики, а также выполнен расчёт конструктивных параметров обмоток. Результаты Главы 5 формируют модель стоимости активных материалов — основу целевой функции задачи оптимизации настоящей главы.

Задача оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР 110 кВ, 25 МВАр формулируется как задача минимизации скалярной целевой функции:

$$F(S, L_s) = \text{Cost}(S, L_s) + \lambda \cdot (I_{co_opt}(S, L_s) - I_{co_ном})^2 \rightarrow \min$$

где $\text{Cost}(S, L_s)$ — суммарная стоимость активных материалов (стали магнитопровода и меди обмоток), USD; $I_{co_opt}(S, L_s)$ — оптимальный ток сетевой обмотки, соответствующий минимуму THD при данной конструкции, А; $I_{co_ном} = 125$ А — номинальный ток реактора; $\lambda = 12\,500$ USD/А² — весовой коэффициент штрафного члена.

Первое слагаемое целевой функции является основным экономическим критерием. Второе слагаемое — квадратичный штраф за отклонение оптимального тока от номинального — реализует мягкое ограничение на точность номинального режима. Коэффициент λ выбран таким образом, что отклонение тока на 2 А формирует штраф \$50 000, соразмерный типичному разбросу стоимости конструкций (\$106 648–\$110 229).

Модель стоимости активных материалов:

$$\text{Cost}(S, L_s) = \rho_{cm} \cdot V_{cm}(S, L_s) \cdot c_{cm} + \rho_{Cu} \cdot V_{Cu}(S, L_s) \cdot c_{Cu}$$

где $\rho_{ст} = 7650$ кг/м³, $c_{ст} = 2.2$ USD/кг — плотность и удельная цена стали; $\rho_{Cu} = 8900$ кг/м³, $c_{Cu} = 9.0$ USD/кг — плотность и удельная цена меди. Объём стали включает два рабочих стержня (S), средний стержень (2S) и два ярма (2S); объём меди каждой обмотки определяется числом витков и средним радиусом витка, рассчитанными в Главе 5.

Ограничения задачи:

– Диапазон сечения рабочего стержня: $S \in [0.13; 0.16]$ м². Нижняя граница установлена по условию $I_{co_opt} \geq 122$ А при любом L_s ; верхняя — по условию $I_{ou_opt} \leq 840$ А.

– Диапазон длины стержня: $L_s \in [2.325; 2.800]$ м — из конструктивных ограничений на высоту реактора.

– Условие допустимости конфигурации: $|I_{co_opt} - 125| \leq 3$ А.

– Ограничение по току подмагничивания: $I_{ou_opt} \leq 840$ А — из условия рациональной мощности источника постоянного тока.

Значение $I_{co_opt}(S, L_s)$ не задаётся аналитически, а извлекается из результатов симуляции Matlab Simulink путём аппроксимации зависимости

THD(Ico) локальной параболой в окрестности минимума. Это делает целевую функцию F неявной функцией параметров, вычисляемой через нелинейную симуляцию, что обуславливает применение методов оптимизации с ограниченным числом обращений к «оракулу» целевой функции.

6.2 Двухэтапный алгоритм оптимизации

Вследствие высокой вычислительной стоимости одной симуляции Simulink разработан двухэтапный алгоритм оптимизации, сочетающий полный факторный эксперимент для формирования обучающей выборки с Байесовской оптимизацией для верификации глобального оптимума. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 6.1.

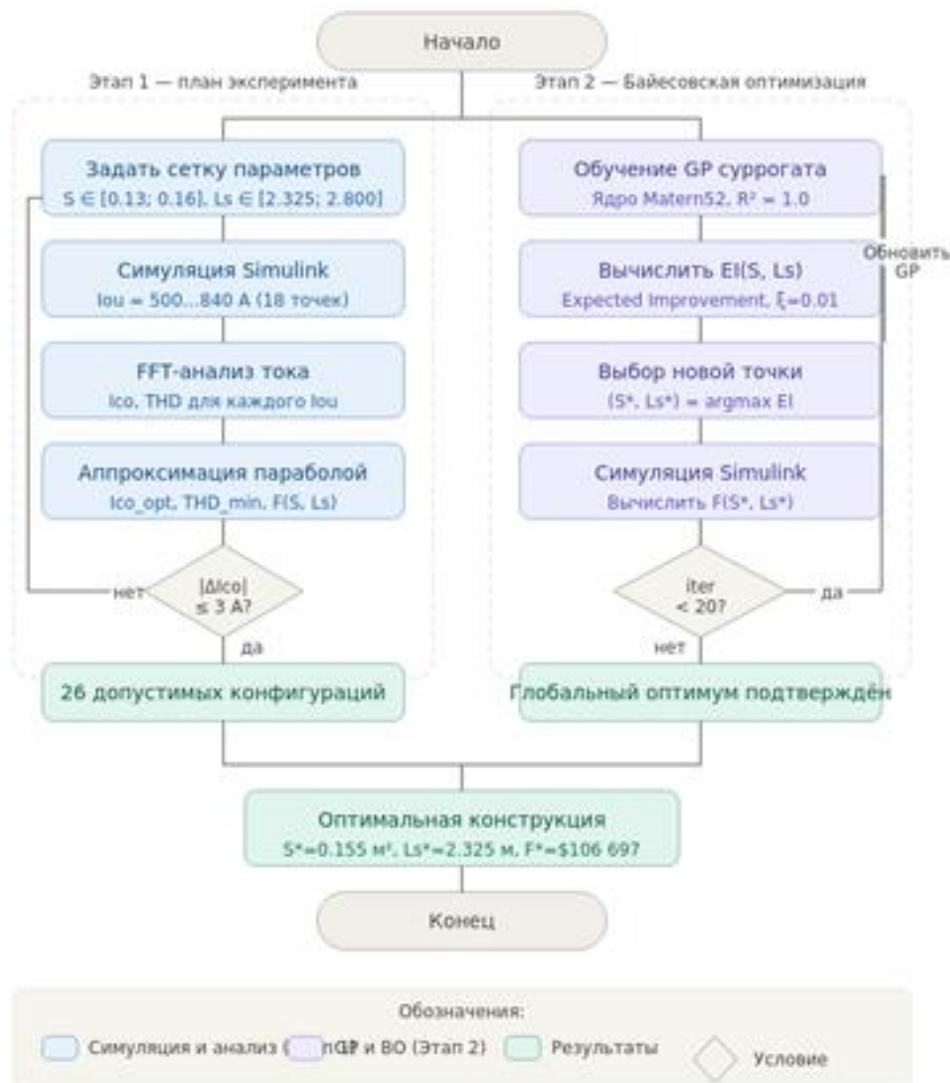


Рисунок 6.1 — Блок-схема двухэтапного алгоритма оптимизации конструктивных параметров УШР

Этап 1. Полный факторный эксперимент. Параметрическое пространство покрывается равномерной прямоугольной сеткой: $S \in \{0.130, 0.135, \dots, 0.155\} \text{ м}^2$ (6 уровней) $\times L_s \in \{2.325, 2.350, \dots, 2.800\} \text{ м}$ (20 уровней) = 120 конструкций.

Для каждой конструкции выполняется серия из 18 симуляций при $I_{ou} \in \{500, 520, \dots, 840\}$ А — суммарно 2160 симуляций.

По результатам FFT-анализа тока сетевой обмотки в установившемся режиме определяются I_{co} и THD для каждой точки. Зависимость $THD(I_{co})$ аппроксимируется локальной параболой в окрестности минимума (± 4 точки):

$$THD(I_{co}) \approx a \cdot I_{co}^2 + b \cdot I_{co} + c, \quad a > 0$$

Аналитические выражения для оптимального тока и минимального THD:

$$I_{co_opt} = -b/(2a), \quad THD_min = c - b^2/(4a)$$

Конфигурации с $|I_{co_opt} - 125| \leq 3$ А признаются допустимыми и включаются в обучающую выборку для суррогатной модели. По результатам Этапа 1 из 120 конструкций отобрано 26 допустимых конфигураций.

Этап 2. Суррогатная модель Gaussian Process и Байесовская оптимизация. По 26 допустимым конфигурациям строится суррогатная модель целевой функции F на основе регрессии Gaussian Process (GP). Входные переменные нормируются в единичный куб. Ядро ковариации — функция Матерна порядка $5/2$:

$$k(x, x') = \sigma^2(1 + \sqrt{5} \cdot r + 5r^2/3) \cdot \exp(-\sqrt{5} \cdot r), \quad r = \sqrt{(x-x')^T \Lambda^{-1} (x-x')}$$

Параметры σ^2 , Λ и σ^2_n оптимизируются максимизацией маргинального правдоподобия. Коэффициент детерминации суррогата на обучающей выборке $R^2 = 1.0$.

Критерий выбора следующей точки для симуляции — Expected Improvement (EI):

$$EI(x) = (f^* - \mu(x) - \xi) \cdot \Phi(Z) + \sigma(x) \cdot \varphi(Z), \quad Z = (f^* - \mu(x) - \xi)/\sigma(x)$$

где f^* — текущий минимум F ; $\Phi(\cdot)$, $\varphi(\cdot)$ — функция распределения и плотность стандартного нормального закона; $\xi = 0.01$ — параметр баланса исследования и уточнения. Процесс выполняется в течение 20 итераций.

6.3 Инвариантность THD_min к геометрии магнитопровода

Центральным результатом параметрического анализа является инвариантность минимального коэффициента гармонических искажений к геометрии магнитопровода. На рисунке 6.2 представлены кривые $THD(I_{co})$ для всех 120 исследованных конструкций. Цвет кривой кодирует номер конфигурации: синие кривые соответствуют малому S и большому L_s , красные — большому S и малому L_s . Звёздочкой отмечена оптимальная конструкция.

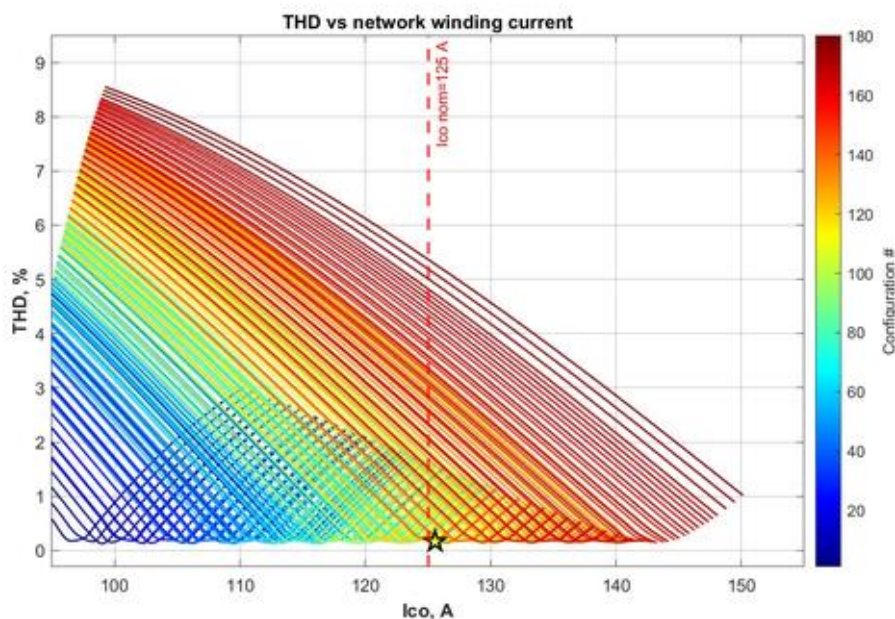


Рисунок 6.2 — Зависимость THD от тока сетевой обмотки для 120 исследованных конструкций. Минимумы всех кривых сосредоточены в узкой полосе 0.17–0.33%

Из рисунка 6.2 видно что, несмотря на существенный разброс положения минимума по оси тока (97–151 А в зависимости от конструкции), значение THD в минимуме практически одинаково для всех конструкций: $THD_{min} = 0.17–0.33\%$ при среднем значении 0.25% и коэффициенте вариации менее 16%.

Физическое объяснение инвариантности: в режиме полупериодного насыщения спектральный состав тока сетевой обмотки определяется нелинейной кривой намагничивания $B(H)$ электротехнической стали при фиксированной рабочей индукции $B = 1.72$ Тл. Поскольку кривая $B(H)$ является характеристикой материала и не зависит от геометрии стержня, а рабочая индукция фиксирована для всех конструкций (задаётся из уравнения ЭДС при данных напряжении и числе витков), гармонический состав тока в точке насыщения одинаков для всех конструкций.

На рисунке 6.3 представлены зависимости THD от тока обмотки управления I_{ou} . Для всех конструкций минимум THD достигается при $I_{ou} = 700–840$ А, что соответствует режиму полупериодного насыщения рабочих стержней.

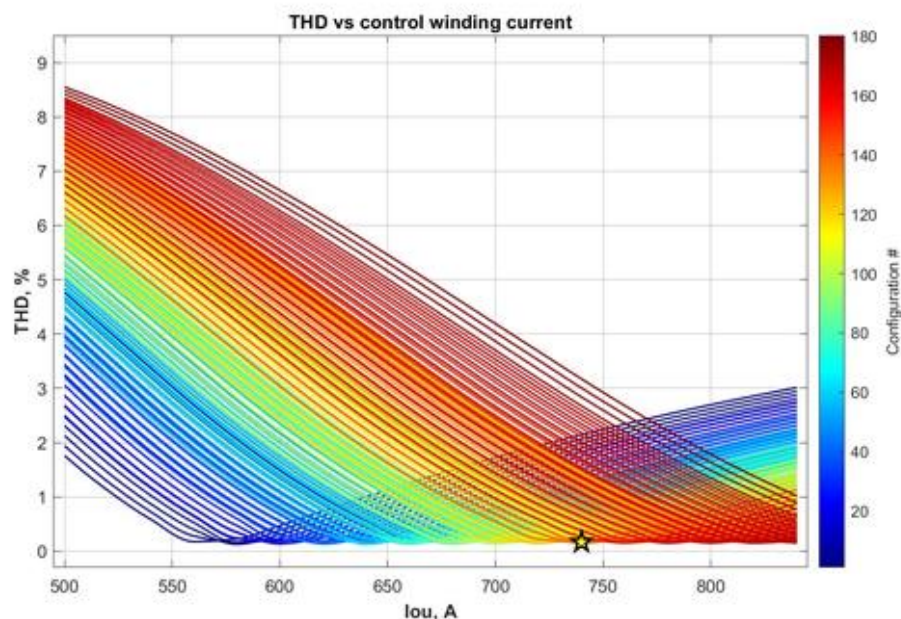


Рисунок 6.3 — Зависимость THD от тока обмотки управления I_{ou} . Минимум для всех конструкций достигается при $I_{ou} = 700\text{--}840\text{ A}$

Трёхмерная поверхность $THD(I_{ou}, I_{co})$ на рисунке 6.4 наглядно демонстрирует что все кривые сходятся к одному уровню $THD \approx 0$ в своих минимумах при различных значениях (I_{ou}, I_{co}) .

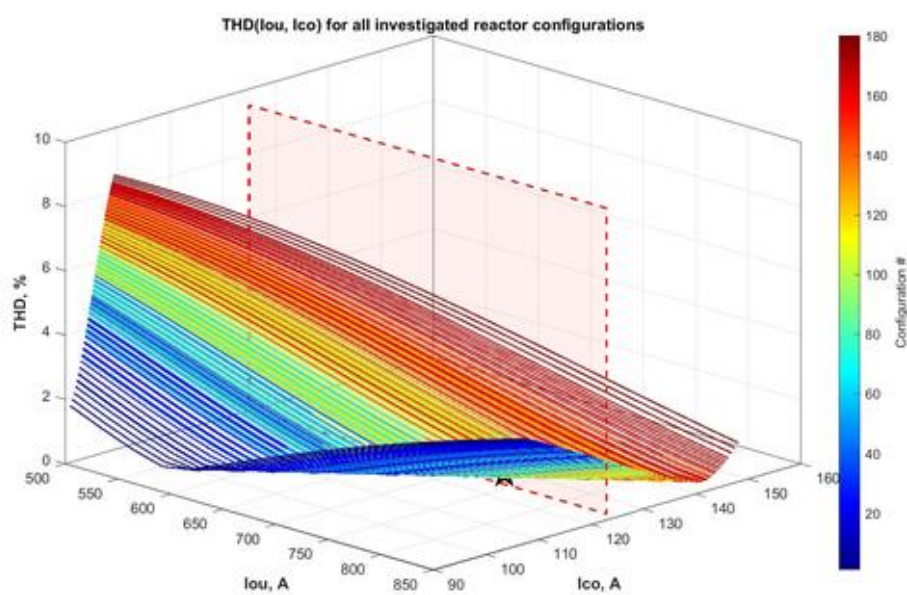


Рисунок 6.4 — Трёхмерная поверхность $THD(I_{ou}, I_{co})$ для всех конструкций. Все минимумы находятся на одном уровне $THD_{\min} \approx 0.17\text{--}0.33\%$

Установленная инвариантность $THD_{\min}$ имеет принципиальное значение для задачи оптимизации: поскольку все конструкции при правильно подобранных токах обеспечивают одинаковое качество тока, единственным

критерием выбора конструкции является стоимость активных материалов при условии обеспечения номинального тока $I_{co_opt} = 125$ А.

6.4 Закономерности влияния конструктивных параметров на I_{co_opt}

На рисунке 6.5 представлены зависимости оптимального тока I_{co_opt} от сечения рабочего стержня S при фиксированных значениях длины стержня L_s .

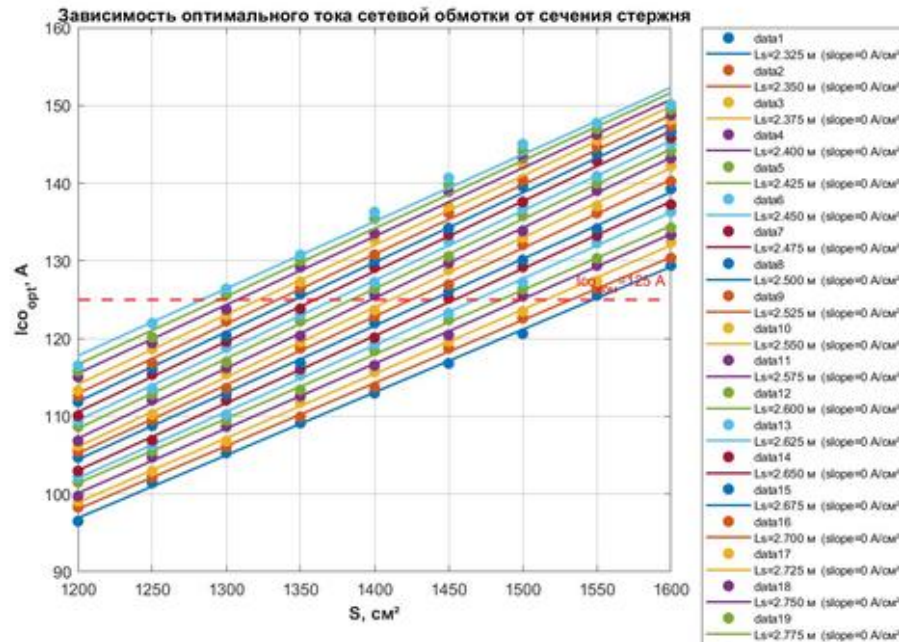


Рисунок 6.5 — Зависимость I_{co_opt} от сечения S при фиксированных L_s . Все прямые параллельны: наклон 0.1 А/см² инвариантен к L_s ($R^2 = 0.990–0.999$)

Для всех значений L_s зависимость $I_{co_opt}(S)$ является строго линейной ($R^2 = 0.990–0.999$) с единым наклоном $\partial I_{co_opt} / \partial S = 0.1$ А/см² = const для любого L_s . Физическое обоснование: число витков $N_1 = U_{co_ph} / (4.44 \cdot f \cdot B \cdot S) \propto 1/S$, поэтому МДС $N_1 \cdot I_{co_opt}$, необходимая для достижения полупериодного насыщения при фиксированном L_s , линейно возрастает с S . Практическое следствие: увеличение сечения стержня на 10 см² смещает оптимальный ток на $+1$ А независимо от длины стержня.

На рисунке 6.6 представлены зависимости I_{co_opt} от длины стержня L_s при фиксированных значениях S .

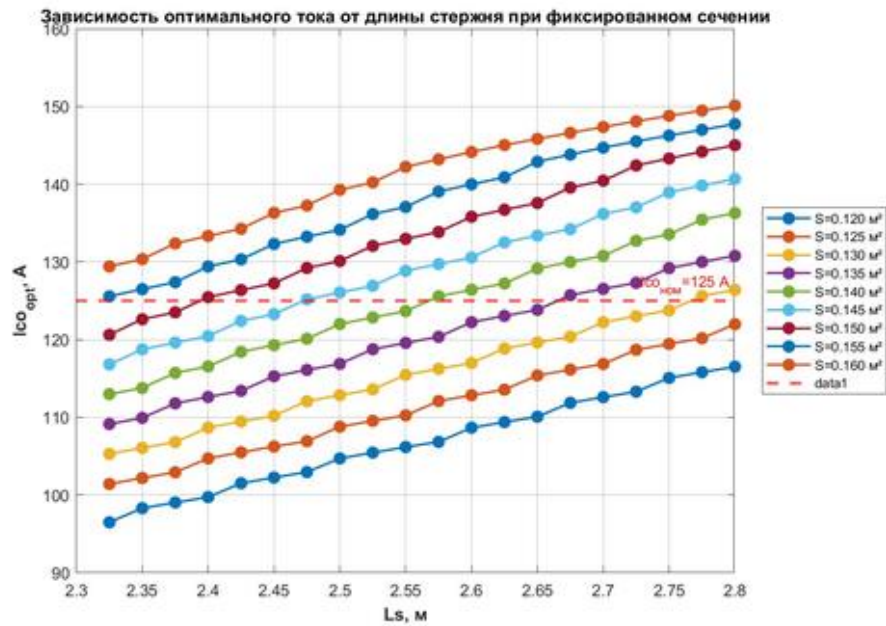


Рисунок 6.6 — Зависимость I_{co_opt} от длины L_s при фиксированных S . Точки пересечения с линией $I_{co_ном} = 125$ А образуют карту допустимых конфигураций

Зависимость $I_{co_opt}(L_s)$ при фиксированном S носит нелинейный характер с убывающим наклоном — аппроксимируется квадратичной функцией ($R^2 = 0.94$). Совместный анализ рисунков 6.5 и 6.6 позволяет сформулировать общую закономерность — аддитивную сепарабельность влияния параметров:

$$I_{co_opt}(S, L_s) = \alpha \cdot S + g(L_s), \quad \alpha = 0.1 \text{ A/cm}^2$$

где $g(L_s)$ — нелинейная функция длины стержня. Коэффициент $\alpha = 0.1$ А/см² инвариантен к L_s (доказательство — параллельность прямых на рисунке 6.5). Данная закономерность означает что влияния сечения и длины стержня на оптимальный ток независимы и аддитивны.

6.5 Результаты Байесовской оптимизации

По результатам Этапа 1 из 120 конструкций отобрано 26 допустимых конфигураций ($|\Delta I_{co}| \leq 3$ А). Их распределение в пространстве параметров (S , L_s) с цветовой кодировкой по значению F представлено на рисунке 6.7.

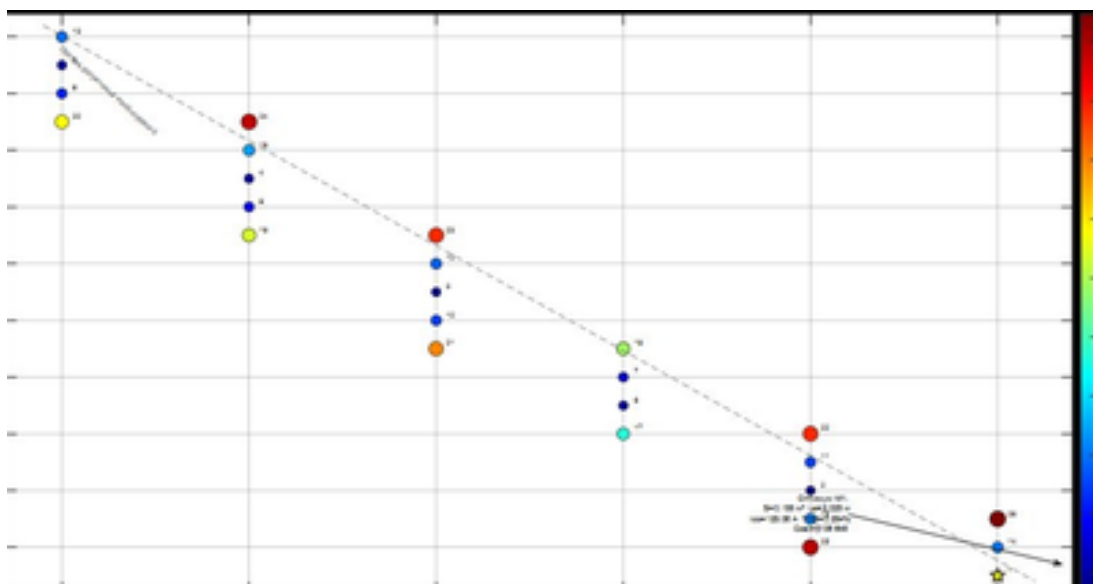


Рисунок 6.7 — Допустимые конфигурации в пространстве параметров (S , L_s). Размер и цвет точек пропорциональны F . Пунктир — полоса допустимых конфигураций. Числа — рейтинг по F

Из рисунка 6.7 видно что допустимые конфигурации образуют диагональную полосу с отрицательным наклоном $dL_s/dS < 0$ — прямое следствие закономерности $I_{co_opt} = 0.1 \cdot S + g(L_s)$: при увеличении S для сохранения $I_{co_opt} = 125$ А необходимо компенсирующим образом уменьшить L_s . Вдоль полосы целевая функция F монотонно убывает в направлении большего S и меньшего L_s .

В таблице 6.1 приведены все 26 допустимых конфигураций, ранжированных по значению целевой функции F .

Таблица 6.1 — Допустимые конфигурации УШР, ранжированные по $F = Cost + \lambda \cdot \Delta I_{co}^2$

№	S , м ²	L_s , м	I_{co} , А	ΔI_{co} , А	I_{ou} , А	THD, %	$M_{ст}$, кг	Cost, USD	F, USD
1	0.155	2.325	125.06	+0.06	730.7	0.284	22126	106 648	106 697
2	0.150	2.400	124.93	−0.07	730.0	0.282	21757	107 193	107 251
3	0.140	2.575	125.08	+0.08	730.8	0.282	21056	108 625	108 700
4	0.135	2.675	125.27	+0.27	731.8	0.285	20717	109 024	109 957
5	0.130	2.775	125.14	+0.14	731.1	0.282	20347	109 939	110 184
6	0.145	2.475	124.56	−0.44	728.0	0.276	21364	107 770	110 189
7	0.145	2.500	125.75	+0.75	734.4	0.293	21475	108 014	115 045
8	0.135	2.650	124.14	−0.86	725.4	0.334	20614	109 287	118 463
9	0.130	2.750	124.04	−0.96	724.6	0.332	20248	110 229	121 846
10	0.140	2.550	123.87	−1.13	723.4	0.330	20949	108 389	124 397
11	0.150	2.425	126.19	+1.19	736.8	0.301	21871	107 445	125 006

№	S, м²	Ls, м	Ico, A	ΔIco, A	Iou, A	THD, %	M _{ст} , кг	Cost, USD	F, USD
12	0.140	2.600	126.25	+1.25	737.1	0.302	21163	108 388	128 018
13	0.130	2.800	126.23	+1.23	737.0	0.300	20447	110 158	129 149
14	0.155	2.350	126.37	+1.37	737.8	0.305	22245	106 909	130 303
15	0.150	2.375	123.61	−1.39	721.7	0.326	21642	107 239	131 443
16	0.135	2.700	126.42	+1.42	738.1	0.304	20820	109 251	134 376
17	0.145	2.450	123.24	−1.76	719.4	0.318	21253	107 836	146 756
18	0.145	2.525	127.02	+2.02	741.7	0.317	21586	107 802	158 956
19	0.135	2.625	122.91	−2.09	717.5	0.310	20510	109 059	163 882
20	0.130	2.725	122.85	−2.15	717.2	0.309	20149	110 011	167 702
21	0.140	2.525	122.61	−2.39	715.8	0.305	20842	108 154	179 424
22	0.150	2.450	127.55	+2.55	745.3	0.327	21986	107 256	188 425
23	0.140	2.625	127.53	+2.53	745.2	0.326	21270	108 623	188 497
24	0.135	2.725	127.66	+2.66	746.1	0.328	20924	109 478	197 988
25	0.150	2.350	122.29	−2.71	714.1	0.300	21527	106 987	198 733
26	0.155	2.375	127.80	+2.80	747.1	0.332	22363	106 743	204 713

Из таблицы 6.1 следует что конфигурации №1–6 образуют группу с наименьшими значениями F и одинаковым $THD_{min} \approx 0.28\%$. Конфигурация №1 ($S=0.155$ м², $L_s=2.325$ м) занимает первое место по обоим критериям: минимальная стоимость \$106 648 и минимальное отклонение тока $\Delta I_{co} = +0.06$ А. Начиная с конфигурации №8 целевая функция F резко возрастает вследствие значимого штрафа за отклонение тока ($|\Delta I_{co}| > 0.8$ А).

По результатам 20 итераций Байесовской оптимизации новых конфигураций с $F < F^* = \$106\,697$ не найдено. Это подтверждает глобальный характер оптимума в исследованном пространстве параметров: GP суррогат не идентифицировал областей с положительным ожидаемым улучшением ($EI > 0$) относительно конфигурации №1.

6.6 Параметры оптимальной конструкции УШР

По результатам двухэтапной оптимизации идентифицирована оптимальная конструкция трёхстержневого УШР 110 кВ, 25 МВАр.

Параметры магнитопровода: сечение рабочего стержня $S^* = 0.155$ м² (радиус $r = 222$ мм); длина стержня $L_s^* = 2.325$ м; сечение среднего стержня и ярем $2S^* = 0.310$ м²; высота обмоток $h_{обм} = L_s^*(1 - 2 \cdot 0.1013) - 0.185 - 0.075 = 1.750$ м.

Электромагнитные характеристики: оптимальный ток сетевой обмотки $I_{co_opt} = 125.06$ А (отклонение от номинала $\Delta I_{co} = +0.06$ А, или 0.05%); ток обмотки управления $I_{ou_opt} = 730.7$ А; $THD_{min} = 0.284\%$.

Активные материалы: масса стали магнитопровода 22 126 кг; масса меди обмоток 6 441 кг; суммарная стоимость активных материалов \$106 648.

Целевая функция: $F^* = \$106\,697$. Штраф за отклонение тока составляет лишь \$49 (0.05% от F^*) — оптимальная конструкция практически точно обеспечивает номинальный режим.

Оптимум расположен на границе технически допустимого диапазона сечений при максимально возможном S . Это отражает структуру затрат: экономия меди вследствие уменьшения числа витков при росте S ($N_1 \propto 1/S$) превышает прирост стоимости стали в исследованном диапазоне. Верхняя граница $S = 0.155 \text{ м}^2$ определяется физическим ограничением $I_{ou} \leq 840 \text{ А}$: при $S = 0.160 \text{ м}^2$ оптимальный ток $I_{co_opt} > 128 \text{ А}$ при любом L_s из рассматриваемого диапазона.

6.7 Сравнительный анализ трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций

6.7.1 Методологическое обоснование сравнения.

Корректное технико-экономическое сравнение конструктивных схем требует их эквивалентности по целевым функциональным параметрам. Инвариантность THD_{min} , установленная в разделе 6.3, создаёт строгое научное основание для такого сравнения: поскольку при правильно подобранных параметрах все конструкции обеспечивают $THD_{min} = 0.17\text{--}0.33\%$ независимо от числа стержней, сравнение правомерно сводить к стоимости активных материалов. Сравнение выполнено для оптимальной конструкции ($S = 0.155 \text{ м}^2$, $L_s = 2.325 \text{ м}$).

6.7.2 Конструктивные варианты четырёхстержневой схемы.

В четырёхстержневой броневой конструкции рабочая часть магнитопровода выполнена из двух полустержней сечением S , расположенных рядом по оси симметрии. Два крайних стержня сечением S обеспечивают замыкание переменного магнитного потока и обмоток не несут. Рассматриваются два варианта исполнения сетевой обмотки:

– Вариант А (промышленное исполнение): единственная катушка СО охватывает оба полустержня одновременно, средний радиус витка $r_{avg,CO} = 667 \text{ мм}$ (против 435 мм в трёхстержневой).

– Вариант Б (альтернативное исполнение): отдельная катушка СО на каждом полустержне, $r_{avg,CO} = 435 \text{ мм}$, однако расстояние между полустержнями возрастает до 976 мм для размещения двух комплектов обмоток, что увеличивает длину ярм до 3349 мм.

6.7.3 Результаты сравнения.

Результаты расчёта активных материалов для трёх конструктивных схем

представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 — Сравнение активных материалов трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций УШР 110 кВ, 25 МВАр

Параметр	3-стержневая	4-стержн. вариант А	4-стержн. вариант Б
r_avg СО, мм	435	667	435
Длина ярма, мм	2 340	2 428	3 349
Масса стали, кг	13 273	13 739	26 914
Масса меди СО, кг	4 584	7 031	4 584
Масса меди итого, кг	6 442	8 888	6 442
Стоимость стали, USD	29 200	30 226	59 210
Стоимость меди, USD	57 976	79 993	57 976
Превышение vs 3-стержн.	—	+26.4%	+34.4%

6.7.4 Анализ причин различий.

В варианте А единственным отличием от трёхстержневой конструкции является средний радиус витка сетевой обмотки: r_avg,СО возрастает с 435 до 667 мм (+53.3%). Поскольку масса меди СО пропорциональна среднему радиусу витка при неизменных числе витков N₁ и сечении провода, масса меди СО увеличивается на 53.4% (с 4 584 до 7 031 кг), добавляя \$22 017. Из суммарного превышения \$23 044, медь составляет 95.5%.

В варианте Б масса меди идентична трёхстержневой. Однако необходимость размещения двух полных наборов обмоток между полустержнями увеличивает длину ярм на 43.1% (с 2 340 до 3 349 мм), что практически удваивает массу стали (с 13 273 до 26 914 кг) и добавляет \$30 010. Всё превышение \$30 010 обусловлено сталью.

Таким образом, трёхстержневая конструкция обеспечивает экономию на активных материалах 26.4% (vs вариант А) и 34.4% (vs вариант Б). Учитывая что активные материалы составляют ~45% полной стоимости реактора, экономия по полной стоимости изделия оценивается в 21% и 25% соответственно.

Выводы по Главе 6

1. Сформулирована задача оптимизации конструктивных параметров УШР с целевой функцией $F = \text{Cost} + \lambda \cdot (\Delta I_{\text{co}})^2$, объединяющей критерии минимума стоимости активных материалов и точности номинального режима ($\lambda = 12\,500 \text{ USD/A}^2$).

2. Установлена инвариантность минимального THD тока сетевой обмотки к геометрии магнитопровода: $\text{THD}_{\text{min}} = 0.17\text{--}0.33\%$ для всех 120 исследованных конструкций в диапазоне $S \in [0.13; 0.16] \text{ м}^2$, $L_s \in [2.325; 2.800]$

м. Физическая причина — фиксированная рабочая индукция $B = 1.72$ Тл и единая марка стали для всех конструкций.

3. Установлена линейная зависимость оптимального тока от сечения стержня с коэффициентом 0.1 А/см^2 , инвариантным к длине стержня ($R^2 = 0.990\text{--}0.999$), и нелинейная зависимость от L_s . Аддитивная сепарабельность $I_{co_opt} = 0.1 \cdot S + g(L_s)$ означает независимость влияний S и L_s на номинальный режим.

4. Методом Байесовской оптимизации с GP суррогатом (Matern52, $R^2=1.0$, 20 итераций) подтверждён глобальный характер оптимума: $S^*=0.155 \text{ м}^2$, $L_s^*=2.325 \text{ м}$, $I_{co}=125.06 \text{ А}$ ($\Delta I_{co}=+0.06 \text{ А}$), $THD=0.284\%$, стоимость \$106 648. Оптимум расположен на границе технически допустимого диапазона по условию $I_{ou} \leq 840 \text{ А}$.

5. Впервые на единой методологической основе выполнено количественное сравнение трёхстержневой и четырёхстержневой конструкций при идентичных электромагнитных характеристиках. Трёхстержневая конструкция требует на 26.4% меньших затрат относительно четырёхстержневой варианта А (доминирующий фактор: медь +53%) и на 34.4% — относительно варианта Б (доминирующий фактор: сталь +103%). Экономия по полной стоимости изделия составляет 21–25%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное к защите диссертационное исследование является самостоятельной и законченной работой, посвящённой электротехническому оборудованию - управляемым шунтирующим реакторам подмагничиванием постоянным током. Выполненные исследования позволяют обобщить и использовать результаты работы в производстве управляемых шунтирующих реакторов. Использовать технологические решения при организации серийного производства. В Приложении Ж размещен полученный акт внедрения от завода изготовителя трансформаторного оборудования. По результатам выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Анализ конструкций и опыта эксплуатации существующих управляемых шунтирующих реакторов позволил установить что применение принципа полупериодного насыщения — реализованного через встречно-параллельное соединение секций сетевой обмотки и включение компенсационной обмотки в треугольник — обеспечивает существенное снижение высших гармонических составляющих тока в трёхстержневой конструкции реактора. Именно этот принцип, заимствованный из практики четырёхстержневых реакторов, устраняет принципиальный недостаток трёхстержневых конструкций предыдущего поколения — высокий уровень гармоник тока сетевой обмотки.

2. Разработаны физические модели трёхстержневого УШР на базе трёхфазных трансформаторов мощностью 1.6 кВА. Экспериментально исследованы электромагнитные характеристики при токах подмагничивания от 0 до 15 А. Результаты подтвердили работоспособность принципа полупериодного насыщения в трёхстержневой конструкции и обеспечили базу данных для верификации имитационной модели.

3. В программном комплексе Matlab Simulink разработана имитационная модель трёхстержневого УШР, включающая нелинейные ферромагнитные элементы с аппроксимированной кривой намагничивания стали, трёхфазную схему обмоток со встречно-параллельным соединением секций и компенсационную обмотку в треугольнике. Верификация модели на данных физического эксперимента показала среднюю абсолютную погрешность $MARE = 5.0\%$ по току сетевой обмотки и $MARE = 2.5\%$ по коэффициенту гармонических искажений — в пределах допустимых погрешностей для нелинейных ферромагнитных устройств. Источники расхождений физически обоснованы: несимметрия питающего напряжения (222–229 В по фазам) и уровень гармоник напряжения сети около 2%.

4. В ходе систематического параметрического анализа 120 конструкций трёхстержневого УШР 110 кВ, 25 МВАр (2160 симуляций Simulink в диапазонах $S \in [0.13; 0.16]$ м², $L_s \in [2.325; 2.800]$ м) впервые установлена инвариантность минимального коэффициента гармонических искажений тока сетевой обмотки к геометрии магнитопровода: $THD_{min} = 0.17–0.33\%$ для всех исследованных конструкций независимо от сечения S и длины L_s рабочих

стержней. Физическая причина инвариантности: при фиксированной рабочей магнитной индукции $B = 1.72$ Тл спектральный состав тока в точке насыщения определяется исключительно кривой намагничивания стали — характеристикой материала, не зависящей от геометрии стержней. Данный результат принципиально переопределяет постановку задачи оптимизации: задача минимизации THD не имеет смысла, поскольку все конструкции обеспечивают одинаковое качество тока; единственным критерием оптимальности является стоимость активных материалов при условии $I_{co_opt} = I_{co_ном}$.

5. Установлена аддитивная независимость влияний конструктивных параметров на номинальный режим реактора: оптимальный ток сетевой обмотки описывается соотношением $I_{co_opt}(S, L_s) = \alpha \cdot S + g(L_s)$, где коэффициент чувствительности $\alpha = 0.1$ А/см² инвариантен к длине стержня ($R^2 = 0.990\text{--}0.999$ для всех L_s), а функция $g(L_s)$ носит нелинейный убывающий характер. Установленная закономерность позволяет без дополнительных симуляций оценивать смещение номинального режима при изменении геометрии магнитопровода: увеличение сечения рабочего стержня на 10 см² сдвигает оптимальный ток на +1 А независимо от длины стержня.

6. Установлено пороговое напряжение компенсационной обмотки $U_{co_пор} \approx 25$ кВ, при превышении которого дальнейшее увеличение числа витков не снижает THD_{min}. Данная закономерность инвариантна к геометрии магнитопровода. Принятое в расчёте значение $U_{co} = 31.5$ кВ обеспечивает работу с запасом в зоне насыщения компенсационного эффекта; снижение U_{co} до 25 кВ позволяет уменьшить расход меди компенсационной обмотки на ~20% без ухудшения качества тока.

7. Разработана методика двухэтапной оптимизации конструктивных параметров трёхстержневого УШР. На первом этапе полный факторный эксперимент на равномерной сетке параметров (120 конструкций, 2160 симуляций) с аппроксимацией зависимости THD(I_{co}) локальной параболой формирует обучающую выборку из 26 допустимых конфигураций. На втором этапе суррогатная модель Gaussian Process (ядро Matern52, $R^2=1.0$) в составе алгоритма Байесовской оптимизации с критерием Expected Improvement подтверждает глобальный характер найденного оптимума. По результатам оптимизации определена конструкция с параметрами: сечение рабочего стержня $S^* = 0.155$ м², длина стержня $L_s^* = 2.325$ м, ток сетевой обмотки $I_{co} = 125.06$ А (отклонение от номинала +0.06 А, или 0.05%), THD_{min} = 0.284%, стоимость активных материалов \$106 648.

8. На основе доказанной инвариантности THD_{min} проведено первое в открытой литературе количественное сравнение трёхстержневой и четырёхстержневой броневой конструкций УШР при идентичных электромагнитных характеристиках. Рассмотрены два варианта исполнения сетевой обмотки в четырёхстержневой конструкции. В варианте А (промышленное исполнение, единственная катушка охватывает оба полустержня) стоимость активных материалов превышает трёхстержневую

конструкцию на 26.4% вследствие увеличения среднего радиуса витка сетевой обмотки с 435 до 667 мм (+53% меди СО). В варианте Б (отдельные катушки на каждом полустержне) превышение составляет 34.4% вследствие роста длины ярм на 43% и удвоения массы стали. Трёхстержневая конструкция является экономически предпочтительной в обоих случаях сравнения; с учётом доли активных материалов в полной стоимости реактора (~45%) экономия по стоимости изделия составляет 21–25%.

9. Исследованы динамические режимы УШР 110 кВ при наборе номинальной мощности. Установлено пороговое значение активного сопротивления R^* , включаемого в цепь сетевой обмотки, при превышении которого дальнейшее увеличение сопротивления не приводит к значимому сокращению времени установления номинального режима. Применение R^* позволяет сократить время набора мощности с 7 с до 0.8 с — ускорение в 8.75 раза без каких-либо конструктивных изменений реактора.

10. По результатам параметрического анализа и оптимизации разработана рабочая конструкторская документация на изготовление трёхстержневого УШР 110 кВ мощностью 25 МВАр, включающая геометрические параметры магнитопровода, расчёт числа витков и радиальных размеров обмоток ($N_1 = 1368$ витков СО, $N_2 = 113$ витков ОУ, $N_3 = 650$ витков КО), выбор марок и сечений проводников, изоляционные расстояния. Документация ориентирована на производство на трансформаторных заводах АО «Asia Trafo» и АО «Кентауский трансформаторный завод» с использованием стандартного трансформаторного оборудования без специальной оснастки.

Совокупность полученных результатов формирует научно обоснованную методическую основу для проектирования трёхстержневых УШР с режимом полупериодного насыщения. Установленные закономерности — инвариантность THD_{min} , аддитивная сепарабельность $I_{co_opt}(S, L_s)$, пороговое напряжение компенсационной обмотки — представляют самостоятельную научную ценность и могут быть использованы при проектировании реакторов других классов напряжения и мощности.

Практическая значимость работы реализована в акте внедрения результатов на предприятии-изготовителе трансформаторного оборудования (Приложение Ж). Потребителями результатов являются АО «KEGOC», АО «Алатау Жарык Компаниясы» и региональные электросетевые компании Республики Казахстан.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: верификация имитационной модели в составе комплекса Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) на базе RTDS симулятора с подключением физической модели реактора для исследования системных эффектов взаимодействия УШР с электрической сетью 500 кВ в реальном времени; расширение задачи оптимизации на трёхпараметрическое пространство с включением напряжения компенсационной обмотки как третьего параметра; применение алгоритмов обучения с подкреплением для управления током подмагничивания в несимметричных режимах электрической сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Приказ Министра энергетики Республики Казахстан. Об утверждении Энергетического баланса Республики Казахстан до 2035 года (с изменениями от 30.01.2023 г.). 24 марта 2022 года № 104. <https://adilet.zan.kz> 12.03.2024.
- 2 Постановление Правительства Республики Казахстан. Об утверждении Программы развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств. 30 июня 2022 года № 452. <https://adilet.zan.kz> 11.02.2024.
- 3 Указ Президента Республики Казахстан. О концепции по переходу Республики Казахстан к «Зеленой экономике». 30 мая 2013 года № 577. <https://adilet.zan.kz> 12.04.2024.
- 4 Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана». 1 сентября 2023 года. Вторая сессия Парламента VIII созыва. <https://www.akorda.kz> 01.02.2024.
- 5 Постановление Правительства Республики Казахстан. Об утверждении Программы развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств. 30 июня 2022 года № 452. <https://adilet.zan.kz> 15.01.2024.
- 6 Электрические системы: Под ред. В.А. Веникова — М: Высшая школа, 1971. — 438 с.
- 7 Долгополов А.Г., Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий// Новости Электротехники. – 2012. - №3(75).
- 8 R. Bogdanovics. Magnetically Controlled Shunt Reactors Overview. // Closing Conference of the Project «Doctoral School of Energy and Geotechnology II», Chapter II. – 2015. – P. 152-153.
- 9 Долгополов А.Г., Ивакин В.Н. Управляемые шунтирующие реакторы. Обзор и сравнительные характеристики. // Новости электротехники. - 2013. - №6(84).
- 10 Гусев С.И., Столяров Е.И., Мустафа Г.М. и др. Модель управляемого подмагничиванием реактора для отражения его при расчетах процессов в линиях электропередачи // Электричество. - 2010. - № 6. – С.2-9.
- 11 Евдокунин Г.А. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы – СПб: Издательский дом «Родная ладога», 2013г. – 280 с.
- 12 Долгополов А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы (принцип действия, конструкции, режимы работы, релейная защита и автоматика). – М.: ИД «Энергия», 2015. – 137 с.
- 13 Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. ISBN 0-7803-3455-8. 441 p.
- 14 Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ 50 МВАр пущен в эксплуатацию. // Электричество. - 2002. - № 3.
- 15 Дорожко Л.И., Лейтес Л.В. Сравнительный анализ различных конструкций управляемых реакторов // Электротехника. - 1991. - № 2. - С. 18-24.
- 16 Александров Г.Н., Кашина В.А Сравнение технико-экономических

показателей неуправляемых и управляемых реакторов // Электротехника. - 1997. - № 1.

17 Соколов С.Е., Долгополов А.Г. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Новости электротехники. – 2012. - №3 (75).

18 Fisher F., Friedlander E. D.C. controlled 100 MVA reactor // GEC Journal. - 1955. - Vol. 22., № 2. – P. 93-105.

19 Kramer W. Drehstromiransformator mit regelbaren Magnetisierungsstrom // ETZ-A. - 1959. -Bd 80. H. 4.

20 Либкинд М.С. Управляемый реактор для линии передачи переменного тока. - М.: Изд-во АН СССР, 1961. - 140 с.

21 Соколов С.Е. Исследование схем питания обмотки подмагничивания управляемого реактора с вращающимся магнитным полем // Энергетика и электрификация. - Алма-Ата: КазПТИ, 1971. - № 1.

22 Zhang Keju, Wang Xin, Bing He. Research on Reactive Power Compensation Based on Magnetic Saturation Controllable Reactor // IEEE Access. - 2022. - Vol.10.— P. 31377 – 31384.

23 Tao Zheng, Yanjie Zhao. Analysis on the Effects of Energization Mode for Magnetically Controlled Shunt Reactor // IEEE PES General Meeting. Conference & Exposition. – 2014.

24 Romualds Bogdanovics, Maria Makarova. Dual model of single-winding magnetically Controlled Shunt Reactor // IEEE 2nd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE). – 2014.

25 Tong Ben, Fangyuan Chen, Long Chen, Ahmed Abu-Siada, Libing Jing, Rongge Yan. Electromagnetic Vibration Analysis of Magnetically Controlled Reactor Considering DC Magnetic Flux // IEEE Access. – 2020. - Vol.8.

26 Yifan Wang, Guozhu Chen. A multi-valve controlled saturable reactor and its harmonic optimization // COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical. - 2014. - 33(4). – P. 1346-1365.

27 Boris Bazilev, Victor Besspalov, Svetlana Dyagileva, Petr Makarov, Maria Makarova, Boris Oleksyuk. Dual scheme based mathematical modeling of Magnetically Controlled Shunt Reactors 6–500 kV // Conference: Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ). - 2012. – P. 1 – 5.

28 Boris V. Oleksyuk, Vladimir N. Tulsy, Stefan Palis. Magnetically Controlled Shunt Reactors as Sources of Current and Voltage Harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. - Vol: 33, Issue: 4. - P. 1818 – 1824.

29 Соколов С.Е., Борисов Г.О., Гусев А.П. Заславская Т.Б. Управляемые ферромагнитные реакторы и их использование для управления режимами протяженных ЛЭП. // Наука. Новосибирск, 1993.

30 Соколов С.Е., Брянцев А.М. Трехфазный управляемый реактор с цилиндрическими обмотками // Тезисы докладов на V Всесоюзная межвузовская. конференция по теории и методам расчета нелинейных эл. цепей и систем. - Ташкент, 1975. - вып. 2.

31 Брянцев А.М., Соколов С.Е., Бикташев Ш.Ш и др. Стержневой управляемый реактор с пространственным магнитопроводом в электрической сети 35–110 кВ // Электрические станции. - 1982. - №5.

32 Соколов С.Е. О взаимосвязи гармоник нелинейности магнитного потока и напряженности поля трехфазных ферромагнитных устройств // Изв. вузов. Энергетика. - 1981. - № 6.

33 Соколов С.Е., Борисов Г.О., Гусев А.П., и др. Управляемые ферромагнитные реакторы и их использование для управления режимами протяженных ЛЭП // Новосибирск: Наука, 1993.

34 Бобриков С. А., Сомов В.А. Метод изготовления магнитопровода катушки со стальным сердечником, имеющего заданную зависимость между намагничивающим током и потоком // Изв. вузов. Электромеханика. - 1963.- №12.

35 Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для энергетики России /Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А. и др. // Научно-техническая газета «Энергопрогресс», спецвыпуск, 2004.

36 Meng Song, Shifeng Shena, Dada Wang, Kunnan Cao, Hongda Dong, Liqin Wang, Cengceng Hao, Qiang Feng, Xiaoyu Li, Li Ren. Research of a Hybrid Controllable Reactor // Advanced Materials Research. - 2013. – P. 2232 – 2235.

37 Dale S.L. Dolan, P.W. Lehn, Analysis of a Virtual Air Gap Variable Reactor // IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. - 2007. – P. 1182 – 1187.

38 Kashif Mehmood, Zhou Li, Muhammad Faizan Tahir, Khalid Mehmood Cheema. Fast excitation control strategy for typical magnetically controllable reactor for reactive power compensation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. - 2021. – Vol. 129 – P. 1 – 10.

39 Zhou Li, Kashif Mehmood, Kaihua Xie. Magnetically controllable reactor based multi-FACTS coordination control strategy // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2021. – Vol. 133. – P. 1 – 19.

40 Aibek Murat, Sergey Sokolov, Almaz Saukhimov, Andrey Dolgoplov. Research and Modeling of magnetically controlled shunt MCRs in PSCAD/EMTDC // 2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. – 2020. - P. 155-159.

41 Li Ren, Ying Xu, Fengshun Jiao, Hongda Dong, Shifeng Shen, Jingdong Li, Meng Song, Jing Shi, Yuejin Tang. Evaluation of Three Designs for a 35-kV Class Superconducting Reactor // IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. – 2014. - Vol. 24, №. 4.

42 Becker H. Ein statischer Phasenschieber zur Kompensation von Blindleistung // ETZ-B. - 1971. - Bd 23. H. 12.

43 Брянцев А.М. Подмагничиваемые ферромагнитные устройства с предельным насыщением участков магнитной цепи // Электричество - 1986 - №2.

44 Reichert K.J., Kauferle J., Glavitsh H. Controllable reactor compensator for more extensive utilization of high voltage systems // CIGRE. 25 Session. – 1974-Report 32-17.

45 Ying Xu, Li Ren, Yuejin Tang, Meng Song, Jingdong Li, Jing Shi, Hongda Dong, Kunnan Cao. Study of a Small-scale Controllable Reactor and Conceptual Design of a 35kV/5Mvar HTS Reactor // Advanced Materials Research. – 2014 –

Vol. 960-961. – P. 1258-1263.

46 GuoSheng Zhao, Pei Li. The Characteristics Analysis of Controllable Reactor of Transformer Type. // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia. – 2019 - P. 4231-4234.

47 Hongda Dong, Li Ren, Ying Xu, Yuejin Tang, Meng Song, Dada Wang, Kunnan Cao. Prototype Test for Confirming the Concept of HTS Magnetically Controlled Saturable Reactor // Advanced Materials Research ISSN: 1662-8985 – 2013 - Vol. 732-733 - P. 1090-1094.

48 Ying Xu, Li Ren, Yuejin Tang, Meng Song, Jingdong Li, Jing Shi, Hongda Dong, Kunnan Cao. Study of a Small-scale Controllable Reactor and Conceptual Design of a 35kV/5Mvar HTS Reactor // Advanced Materials Research. - 2014. – P. 1258-1263.

49 Zuoshuai Wang, Yuejin Tang, Li Ren, Sinian Yan, Zhangwei Yang, Ying Xu, Chi Zhang. Development of a New Type of HTS Controllable Reactor With Orthogonally Configured Core // IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. – 2017 - Vol. 27. №. 4.

50 Yu Zhang, Jingdong Li, Zuoshuai Wang, Li Ren, Shuqiang Guo, Ying Xu, Yuejin Tang, Wei Wang, Ziheng Hu, Bin Zhang. Study on AC Loss Characteristics in HTS Windings of a HTS Controllable Reactor With Orthogonally Configured Core // IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. – 2019 - Vol. 29, №. 5.

51 Zuoshuai Wang, Yuejin Tang, Sinian Yan, Li Ren, Kang Gong, Lu Chen, Yu Zhang, Ying Xu. Excitation Effect Analysis of a Novel HTS Controllable Reactor With Orthogonally Configured Core Based on Dynamic Inductance Matrix // IEEE transactions on applied superconductivity. – 2018. - Vol. 28, №. 3.

52 А.Қ. Мұрат, Е.Т. Әмитов, Л.Ш. Утешкалиева. Исследование и разработка управляемых реакторов трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током// Вестник Алматинского университета энергетики и связи № 1 (72) 2026, сс 70-86.

53 АС СССР №1394247 А1. Оpubл. БИ № 17 от 07.05.88. Трехфазный управляемый насыщающийся реактор. / Соколов С.Е. Трубанов В.А. – 3 с.

54 Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. – М.: Знак, 2010 г. - 288 с.

55 Mehmet Tümay, Tuğçe Demirdelen, Selva Bal, Rahmi İlker Kayaalp, Burcu Doğru, Mahmut Aksoy. A review of magnetically controlled shunt reactor for power quality improvement with renewable energy applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017 - №77. – P. 215 - 228.

56 Yakun Li, Teng Li, Yonggang Ma and Wei Zhang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Mathematical Model and Simulation of an Improved Magnetically Controlled MCR // Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation. – 2015 – Vol. 377. - P. 11 – 18.

57 Liang Yan-ping, Zhang Fang, Zhang Hai-ting, An Zhen. Leakage Inductance Calculation and Simulation Research of Extra-high Voltage Magnetically Controlled Shunt MCR // 2010 International Conference on Mechanic Automation

and Control Engineering, Wuhan, China, - 2010.

58 Xuxuan Chen, Baichao Chen, Cuihua Tian, Jiaxin Yuan, Yaozhong Liu. Modeling and Harmonic Optimization of a Two-Stage Saturable Magnetically Controlled MCR for an Arc Suppression Coil // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. – 2012. - Vol. 59, №. 7. – P. 2824-2831.

59 Tao Zheng, Xiaoxiao Liu, Junqi Wei, M. Asghar Khan, Xiaoli Wang. Protection scheme for turn-to-turn faults of magnetically controlled shunt MCR based on waveform similarity comparison // Electric Power Systems Research. – 2019. – Vol. 177. – P. 1 – 8.

60 Tao Zheng, Ting Huang, Fenfen Zhang, Yanjie Zhao, Lianguang Liu. Modeling and impacts analysis of energization transient of EHV/UHV magnetically controlled shunt MCR // 2017 International Transactions on Electrical Energy Systems – 2017. - 27(7).

61 Mingxing Tian, Qingfu Li and Qunfeng Li, A Controllable Reactor of Transformer Type//IEEE transactions on power delivery.-2004-Vol.19,№.4.–P.1– 12.

62 Zhao Shi-shuo, YIN Zhong-dong, Li Peng. Research of Magnetically Controlled MCR Simulation Model and its Experiments // 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, 2012.

63 Chen X, B. Chen, C. Tian, J. Yuan. Modeling and simulation of the multi-stage saturable magnetically controlled MCR with very low harmonics. // In: Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients. - 2013.

64 P.K. Muttik, P.Wang, M.W.H. Minchin. Detailed Simulation of SVC Transient Performance Using PSCAD. // 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. №.00EX409) – 2010 – Vol.2.

65 M. Salimi, A. M. Gole, R. P. Jayasinghe. Improvement of Transformer Saturation Modeling for Electromagnetic Transient Programs // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013) in Vancouver, Canada - 2013.

66 Yao Yao, Baichao Chen, Cuihua Tian. Modeling and characteristics research on EHV magnetically controlled MCR. // 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007). – Singapore, 2007.

67 Georgy Evdokunin, Mikhail Dmitriev, Transformers in the electrical network Modeling of transient processes taking into account the configuration of the magnetic system // Electrical engineering news. – 2008. - 5(53).

68 A. R. Luchko, T. V. Popova, Simulation modeling of electromagnetic processes in magnetically coupled electrical circuits // Electrical Engineering and Power Engineering - 2009 - №1.

69 Luchko A.R., Ebadian M. Principles of mathematical modeling of dynamic processes in bias-controlled shunt MCRs in SimPowerSystems (Matlab) // Electricity. - 2008. - № 3. - P. 70–75.

70 Tao Zheng, Kai Yu. Research on the Stimulation Modeling of Magnetically Controlled Shunt MCR // International conference on power system technology. – 2018. – P. 1 – 8.

71 Liang Yan-ping, Zhang Yue, Zhang Hai-ting, An Zhen. The 500 kV MCSR Modeling and Steady-state Characteristics Analysis. // International Conference on Electrical Machines and Systems. – 2011.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЗАДАНИЕ

на изготовление физической модели управляемого реактора с подмагничиванием постоянным током (пофазное исполнение) на трех трехстержневых магнитопроводах на базе трансформатора ТСЗИ

Исходные номинальные параметры трансформатора ТСЗИ

Номинальная мощность на стержень -0,533 кВА

Номинальное напряжение -380 В;

Номинальный ток первичной обмотки – 2,42 А.

Ток холостого хода – 20% - 0,48 А. (прямоугольный стык)

Индукция в стержнях $B = 1,68$ Тл. Индукция в ярах $B = 1,62$ Тл.

Сечение стержней - $0,251 \text{ м}^2$

Сечение ярм – $0,26 \text{ м}^2$.

Обмоточные данные приведены на рисунке А1

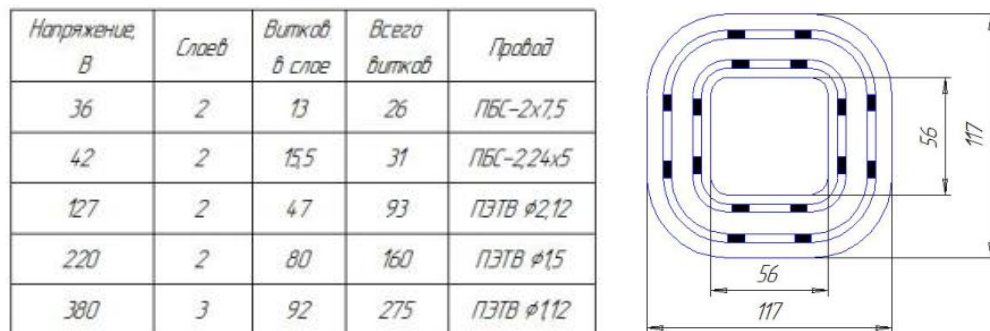


Рисунок А1

Для модели управляемого реактора необходимо изготовить три трехстержневых магнитопровода с прямым стыком согласно рисунка А2, с сохранением величины индукции, высоты и сечения крайних стержней (1,2) и с увеличением сечения ярм и среднего стержня в 1,8 раза по отношению к сечению крайних стержней, с сохранением обмоточных данных ТСЗИ (согласно рисунка 1). Обмоток на среднем стержне нет. Обмотка на 24 В не нужна. Эскиз магнитопровода и размещение обмоток (рабочих и измерительных) показаны на рисунке А2.

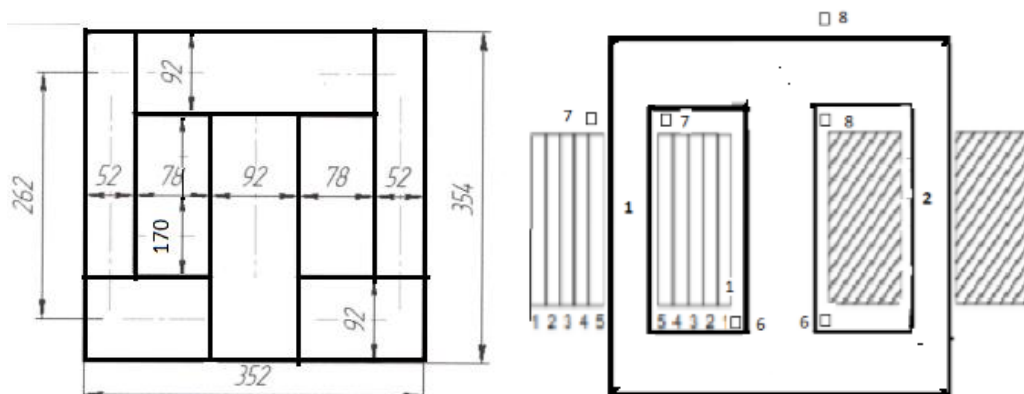


Рисунок А2

1- первичная обмотка – 380 В;

2 – вторичная обмотка -220 В; 3 – вторичная обмотка 127 В;

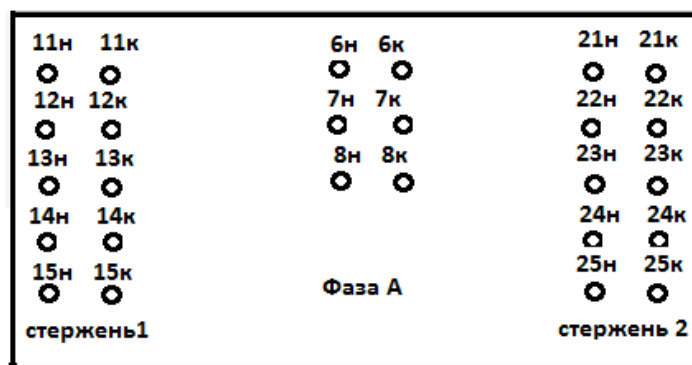
4 – вторичная обмотка 42 В; 5 – вторичная обмотка 36 В;

6 ,7, 8– измерительные обмотки по 10 витков проводом диаметром 0,5 -1,0 мм.

Защитный кожух выполняется без верхней крышки и крепится к нижней части магнитопроводов и должен быть разъемным для обеспечения доступа к активной части. Верхняя крышка выполняется из текстолита толщиной не менее 5 мм в виде клеммника, и крепится к активной верхней части трансформаторов на шпильках.

Все обмотки изготавливаются отдельно каждая с выводом начал и концов на клеммник, показанный на рисунке А3.

Для изготовления такого магнитопровода необходимо увеличение ширины среднего стержня увеличение длины пластин среднего и крайних стержней за счет увеличения ширины пластин ярем и уменьшения длины коротких пластин ярем за счет увеличения ширины пластин среднего стержня. Тогда ширина магнитопровода останется без изменений, а высота увеличится за счет увеличения ширины пластин ярем



Маркировка выводов обмоток:

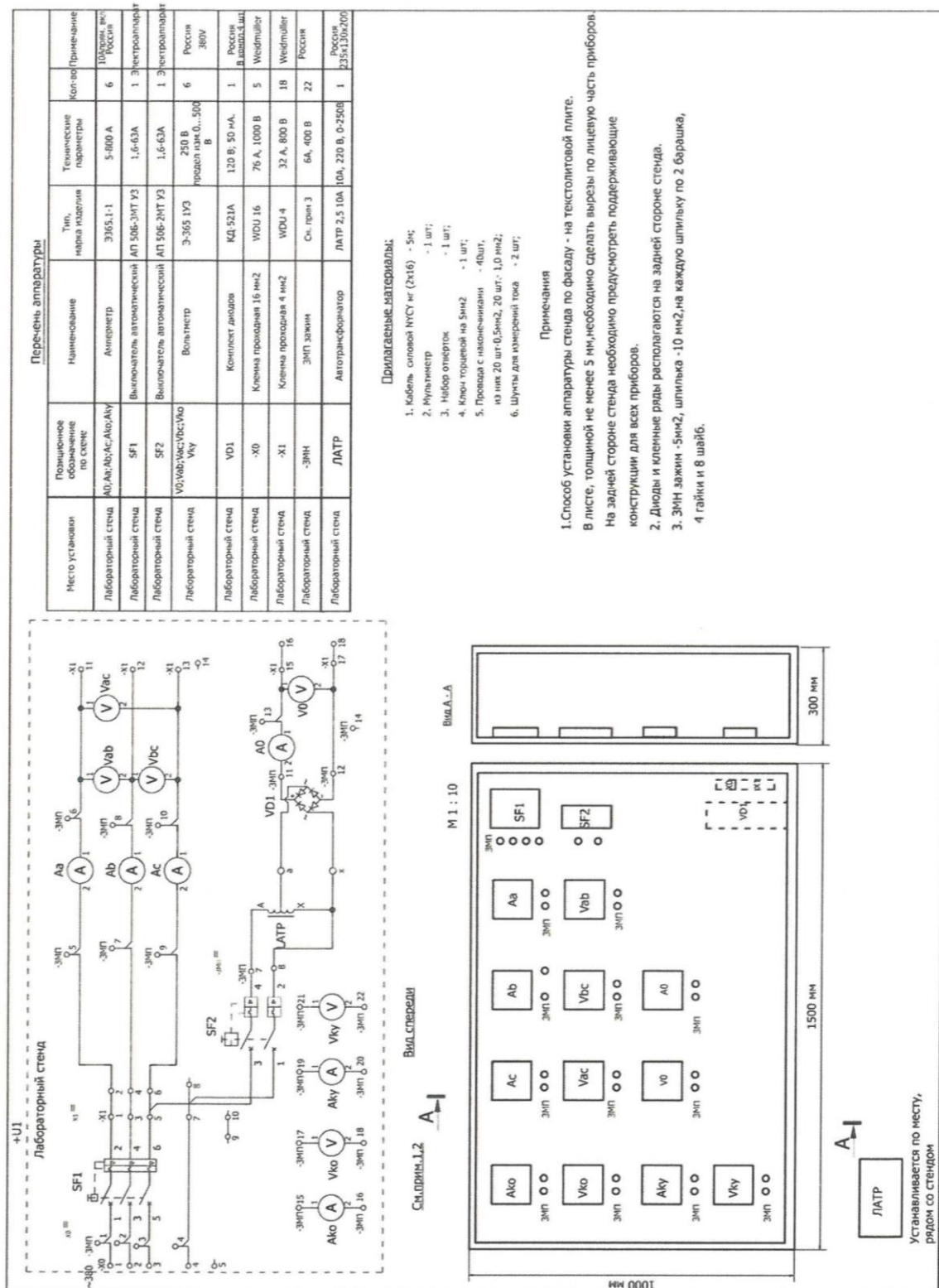
- 11н – первичная (первая) обмотка стержня 1, начало;
- 11к - первичная (первая) обмотка стержня 1, конец;
- 12н – вторичная (вторая) обмотка стержня 1, начало;
- 12к – вторичная (вторая) обмотка стержня 1, конец;
-
-
- 21н – первичная (первая) обмотка стержня 2, начало;
- 21к – первичная (первая) обмотка стержня 2, конец; и т.д

Рисунок А3

Клеммы выполняются в виде шпилек с резьбой М5 и крепятся двумя гайками с обеих сторон с шайбами и контргайкой. С внутренней стороны к клеммам присоединяются выводы начал и концов обмоток. С наружной стороны предусматриваются две – три гайки и барашки для сборки различных схем

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Схема и размещение оборудования испытательного стенда



ПРИЛОЖЕНИЕ В

АО «Кентауский трансформаторный завод»

ПРОТОКОЛ

Испытания образца физической модели управляемого реактора с подмагничиванием постоянным током (пофазное исполнение) на трех трехстержневых магнитопроводах на базе трансформатора ТСЗИ изготовленной согласно входящего письма №9200/39 от 16.01.2018г. АО Каз НИПИИТЭС «Энергия»

1. Основные технические данные

Таблица 1

Номинальная мощность на стержень, кВА	Номинальные напряжения обмоток, В					Измерительная обмотка
	Первичной обмотки, В	Вторичных обмоток, В				
0,533	380	220	127	42	36	10
	Количество витков					
	275	160	93	31	26	
	Марка и сечение провода, мм ²					
	ПЭТВ Ø1,0	ПЭТВ Ø1,5	ПЭТВ Ø2,36	ПБС 2,24x5	ПБС 2x9	ПЭТВ Ø0,85
Сечение стержней-0,251м ² , Сечение ярм-0,46м ²						

2. Результаты проверок и испытаний реактора для фазы «__А__»

Таблица 2

Наименование испытаний	Фактическое значение параметров (требований)					
1.Измерение сопротивления изоляции	Обмотки	Измеренные значения, Мом			T= __12__ °C	
	Первичная	Не менее 100 МОм			Измерение производилось между обмотками и относительно заземленных частей трансформатора	
	Вторичная					
	Управляющие					
	Измерительная					
2.Измерение коэффициента трансформации	Стержни магнитопровода	Отводы обмоток		Измеренные значения Ктр.	Откл. %	Расч. Ктр
	Стержень 1	11Н-11К	12Н-12К	1,7188	-0,492	1,7273
			13Н-13К	2,958	-1,139	2,9921
			14Н-14К	8,878	-1,874	9,0476
			15Н-15К	10,587	+0,303	10,555
	Стержень 2	21Н-21К	22Н-22К	1,7192	-0,469	1,7273
			23Н-23К	2,959	-1,106	2,9921
			24Н-24К	8,875	-1,907	9,0476
			25Н-25К	10,590	+0,331	10,555
	Параллельное соединение обмоток стержней	11Н-11К + 21Н-21К	12Н-12К+22Н-22К	1,7218	-0,318	1,7273
			13Н-13К+23Н-23К	2,961	-1,039	2,9921
			14Н-14К+24Н-24К	8,888	-1,764	9,0476
			15Н-15К+25Н-25К	10,595	+0,379	10,555

Продолжение таблицы 2				
3.Измерение сопротивления обмоток постоянному току при температуре_12_°C	Стержень магнитопровода		Отводы обмоток	Сопротивление, Ом
	Стержень 1		11Н-11К	2,356
			12Н-12К	0,5492
			13Н-13К	0,12211
			14Н-14К	0,18293
			15Н-15К	0,08206
	Стержень 2		21Н-21К	2,405
			22Н-22К	0,5539
			23Н-23К	0,12289
			24Н-24К	0,17469
			25Н-25К	0,0867
Измерительные обмотки		6Н-6К	0,11319	
		7Н-7К	0,07342	
		8Н-8К	0,10700	
4.Испытание приложенным напряжением частотой 50 Гц	Обмотки между собой и относительно заземленных частей в течение 60с испытание напряжением 3 кВ выдержали			
5. Измерение тока и потерь холостого хода (Стержень 1)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	0,417		10,28/
6. Измерение тока и потерь холостого хода (Стержень 2)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	0,363		10,04
7. Измерение тока и потерь холостого хода (параллельное соединение первичных обмоток)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	1,587		29,8



Испытания провели:

Занимаемая должность	Ф.И.О.	Подпись	Дата
Испытатель электрических машин и аппаратов	Топышев К.Х.		
Начальник (мастер) испытательной лаборатории	Атеев Т.Р.		28.02.18г

АО «Кентауский трансформаторный завод»

ПРОТОКОЛ

Испытания образца физической модели управляемого реактора с подмагничиванием постоянным током (пофазное исполнение) на трех трехстержневых магнитопроводах на базе трансформатора ТСЗИ изготовленной согласно входящего письма №9200/39 от 16.01.2018г. АО Каз НИПИИТЭС «Энергия»

1. Основные технические данные

Таблица 1

Номинальная мощность на стержень, кВА	Номинальные напряжения обмоток, В					Измерительная обмотка
	Первичной обмотки, В	Вторичных обмоток, В				
0,533	380	220	127	42	36	
	Количество витков					
	275	160	93	31	26	10
	Марка и сечение провода, мм ²					
	ПЭТВ Ø1,0	ПЭТВ Ø1,5	ПЭТВ Ø2,36	ПБС 2,24x5	ПБС 2x9	ПЭТВ Ø0,85
Сечение стержней-0,251м ² , Сечение ярм-0,45м ²						

2. Результаты проверок и испытаний реактора для фазы « В »

Таблица 2

Наименование испытаний	Фактическое значение параметров (требований)					
1.Измерение сопротивления изоляции	Обмотки	Измеренные значения, Мом Т= 12 °С				
	Первичная	Не менее 100 МОм				
	Вторичная					
	Управляющие					
	Измерительная	Измерение производилось между обмотками и относительно заземленных частей трансформатора				
2.Измерение коэффициента трансформации	Стержни магнитопровода	Отводы обмоток		Измеренные значения Ктр.	Откл. %	Расч. Ктр
	Стержень 1	11Н-11К	12Н-12К	1,7193	-0,463	1,7273
			13Н-13К	2,957	-1,173	2,9921
			14Н-14К	8,875	-1,907	9,0476
			15Н-15К	10,583	+0,265	10,555
	Стержень 2	21Н-21К	22Н-22К	1,7195	-0,452	1,7273
			23Н-23К	2,958	-1,139	2,9921
			24Н-24К	8,880	-1,852	9,0476
			25Н-25К	10,585	+0,284	10,555
	Параллельное соединение обмоток стержней	11Н-11К + 21Н-21К	12Н-12К+22Н-22К	1,7219	-0,313	1,7273
			13Н-13К+23Н-23К	2,9662	-0,866	2,9921
			14Н-14К+24Н-24К	8,888	-1,764	9,0476
			15Н-15К+25Н-25К	10,594	+0,369	10,555

Продолжение таблицы 2				
3.Измерение сопротивления обмоток постоянному току при температуре __12__°C	Стержень магнитопровода	Отводы обмоток		Сопротивление, Ом
	Стержень 1	11Н-11К		2,358
		12Н-12К		0,5533
		13Н-13К		0,12267
		14Н-14К		0,17486
		15Н-15К		0,08232
	Стержень 2	21Н-21К		2,371
		22Н-22К		0,5544
		23Н-23К		0,12254
		24Н-24К		0,17703
		25Н-25К		0,08730
	Измерительные обмотки	6Н-6К		0,11009
		7Н-7К		0,07847
		8Н-8К		0,10606
4.Испытание приложенным напряжением частотой 50 Гц	Обмотки между собой и относительно заземленных частей в течение 60с испытание напряжением 3 кВ выдержали			
5. Измерение тока и потерь холостого хода (Стержень 1)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	0,296		9,81
6. Измерение тока и потерь холостого хода (Стержень 2)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	0,301		9,978
7. Измерение тока и потерь холостого хода (параллельное соединение первичных обмоток)	Подводимое напряжение, В	Ток холостого хода		Измеренные потери холостого хода, Вт
		Io, А	Io, %	
	220	1,198		27,48



Испытания провели:

Занимаемая должность	Ф.И.О.	Подпись	Дата
Испытатель электрических машин и аппаратов	Топышев К.Х.		
Начальник (мастер) испытательной лаборатории	Атеев Т.Р.		28.02.18 г

АО «Кентауский трансформаторный завод»

ПРОТОКОЛ

Испытания образца физической модели управляемого реактора с подмагничиванием постоянным током (пофазное исполнение) на трех трехстержневых магнитопроводах на базе трансформатора ТСЗИ изготовленной согласно входящего письма №9200/39 от 16.01.2018г. АО Каз НИПИТЭС «Энергия»

1. Основные технические данные

Таблица 1

Номинальная мощность на стержень, кВА	Номинальные напряжения обмоток, В					Измерительная обмотка
	Первичной обмотки, В	Вторичных обмоток, В				
0,533	380	220	127	42	36	10
	Количество витков					
	275	160	93	31	26	
	Марка и сечение провода, мм ²					
	ПЭТВ Ø1,0	ПЭТВ Ø1,5	ПЭТВ Ø2,36	ПБС 2,24x5	ПБС 2x9	ПЭТВ Ø0,85
Сечение стержней-0,251м ² , Сечение ярм-0,46м ²						

2. Результаты проверок и испытаний реактора для фазы «__С__»

Таблица 2

Наименование испытаний	Фактическое значение параметров (требований)					
1.Измерение сопротивления изоляции	Обмотки	Измеренные значения, Мом T= __12__ °C				
	Первичная	Не менее 100 МОм				
	Вторичная					
	Управляющие					
	Измерительная					
2.Измерение коэффициента трансформации	Стержни магнитопровода	Отводы обмоток		Измеренные значения Ктр.	Откл. %	Расч. Ктр
	Стержень 1	11Н-11К	12Н-12К	1,7196	-0,446	1,7273
			13Н-13К	2,962	-1,006	2,9921
			14Н-14К	8,875	-1,907	9,0476
			15Н-15К	10,588	+0,313	10,555
	Стержень 2	21Н-21К	22Н-22К	1,7202	-0,411	1,7273
			23Н-23К	2,960	-1,073	2,9921
			24Н-24К	8,881	-1,841	9,0476
			25Н-25К	10,587	+0,303	10,555
	Параллельное соединение обмоток стержней	11Н-11К + 21Н-21К	12Н-12К+22Н-22К	1,7222	-0,295	1,7273
			13Н-13К+23Н-23К	2,963	-0,972	2,9921
			14Н-14К+24Н-24К	8,885	-1,797	9,0476
			15Н-15К+25Н-25К	10,603	+0,455	10,555

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ПАТЕНТ
PATENT**

№ 5118

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2020/0195.2

(22) 25.02.2020

(45) 03.07.2020

(54) Жоғары кернеулі электр желілерінің реактивті қуатын реттеуге арналған құрылғы
Устройство для регулирования реактивной мощности линий электропередач высокого напряжения
Device for reactive-power control of high voltage transmission lines

(73) «Алматы энергетика және байланыс университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Алматинский университет энергетики и связи» (KZ)
«Almaty University of Power Engineering and Telecommunication» Non-Commercial Joint-Stock Company (KZ)

(72) Соколов Сергей Евгеньевич (KZ) Соколова Ирина Сергеевна (KZ) Мұрат Айбек Қайратұлы (KZ) Гирько Артур Андреевич (KZ)	Sokolov Sergey Yevgenyevich (KZ) Sokolova Irina Sergeyevna (KZ) Murat Aibek Kairatuly (KZ) Girko Artur Andreyevich (KZ)
---	--



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Куантыров
Е. Куантыров
Y. Kuantyrov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 3339

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2018/0242.2

(22) 10.04.2018

Қазақстан Республикасы пайдалы модельдер мемлекеттік тізілімінде тіркеу күні /
Дата регистрации в Государственном реестре полезных моделей Республики
Казakhstan / Date of the registration in the State Register of Utility Models of the
Republic of Kazakhstan: 05.11.2018

(54) Ауыртпалық түсіріп кернеумен реттелген трансформатор
Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой
Transformer with voltage regulation under load

(73) "Энергия" Қазақстандық отын-энергетика жүйелерін ғылыми-зерттеу және жобалау-іздістету институты"
акционерлік қоғамы (KZ)
Акционерное общество "Казахстанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт топливно-
энергетических систем "Энергия" (KZ)
"Энергия" Kazakh Research-and-Development and Planning-and-Surveying Institute of Fuel-and-Energy Systems" Joint-
Stock Company (KZ)

(72) Соколов Сергей Евгеньевич (KZ)
Соколова Ирина Сергеевна (KZ)
Мурат Айбек Кайратұлы (KZ)
Исаев Андрей Леонидович (KZ)
Кожабаяв Хайрулла Байдылдаевич (KZ)
Ильясов Султан Сайдулаевич (KZ)

Sokolov Sergey Evgenyevich (KZ)
Sokolova Irina Sergeyevna (KZ)
Murat Aybek Kayratuly (KZ)
Isayev Andrey Leonidovich (KZ)
Kozhabayev Khayrulla Baydildayevich (KZ)
Ilyasov Sultan Saydulayevich (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРДЫҢ КУӘЛІГІ
УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 105542

Мурат Айбек Кайратұлы (KZ)

және/и Соколов Сергей Евгеньевич (KZ); Соколова Ирина Сергеевна (KZ); Исасев Андрей Леонидович (KZ); Кожабасов Хайрулла Байдиляевич (KZ); Ильясов Султан Сайдулаевич (KZ)

*пайдалы модельдің авторы(лары) болып табылатындығы осымен куәландырылады
является(ются) автором(ами) полезной модели*

(11) 3339

(54) Ауыртпалық түсіріп кернеумен реттелген трансформатор
Трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой

(73) "Энергия" Қазақстандық отын-энергетика жүйелерін ғылыми-зерттеу және жобалау-
іздістету институты" акционерлік қоғамы (KZ)
Акционерное общество "Казахстанский научно-исследовательский и проектно-
изыскательский институт топливно-энергетических систем "Энергия" (KZ)



«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д.1 – Сводная таблица описания моделей

№	Описание	№	Описание
1	сечение стержня - 0,115526 м ² сечение ярма – 0,22643 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В - 38500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 10500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 504 Кол-во витков ОУ 238	7	сечение стержня - 0,144408 м ² сечение ярма – 0,28304 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 3000//КОРЕНЬ(3) - 5400/КОРЕНЬ(3) 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 39-71, 137-412 Кол-во витков ОУ 238
2	сечение стержня - 0,115526 м ² сечение ярма – 0,22643 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В - 38500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 10500 Индукция СО, Тл - 1,57 – 1,97 Напряжение одного витка СО, В - 40,27 – 50,52 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1649 - 1314 Кол-во витков КО 552-440 Кол-во витков ОУ 238	8	сечение стержня - 0,150184 м ² сечение ярма – 0,29436 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 3000//КОРЕНЬ(3) - 5400/КОРЕНЬ(3) 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 39-71, 137-412 Кол-во витков ОУ 238
3	сечение стержня - 0,115526 м ² сечение ярма – 0,22643 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В - 38500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 10500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл - 1,57 – 1,97 Напряжение одного витка ОУ, В - 40,27 – 50,52 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 504 Кол-во витков ОУ 260 - 207	9	сечение стержня - 0,150184 м ² сечение ярма – 0,26432 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 137-412 Кол-во витков ОУ 238
4	сечение стержня - 0,103973 м ² сечение ярма – 0,20379 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 3000/КОРЕНЬ(3) - 5400/КОРЕНЬ(3) 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11	10	сечение стержня - 0,150184 м ² сечение ярма – 0,27934 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72

	Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 39-71, 137-412 Кол-во витков ОУ 238		Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 137-412 Кол-во витков ОУ 238
5	сечение стержня - 0,127079 м ² сечение ярма – 0,24907 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 3000/КОРЕНЬ(3) - 65400/КОРЕНЬ(3) 170500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 39-71, 137-412 Кол-во витков ОУ 238	11	сечение стержня - 0,150184 м ² сечение ярма – 0,30938 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1159 Кол-во витков КО 137-412 Кол-во витков ОУ 238
6	сечение стержня - 0,132855 м ² сечение ярма – 0,26040 м ² Фазное напряжение СО, В - 115000/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение КО, В – 3000//КОРЕНЬ(3) - 5400/КОРЕНЬ(3) 10500/КОРЕНЬ(3)-31500/КОРЕНЬ(3) Фазное напряжение ОУ, В - 5500 Индукция СО, Тл - 1,72 Напряжение одного витка СО, В - 44,11 Индукция ОУ, Тл – 1,72 Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 39-71, 137-412 Кол-во витков ОУ 238		

Код Matlab

```

clear
clc
close all
Q = 25e6;
Uco = 115000;
Uou = 5500;
S = 0.150184;
Sy = 0.30938;
Bco = 1.72;
Bou = 1.72;
Ts = 5e-5;
THD = [];
for Uko = [16500:1000:31500];
    for Iou = [100:30:820];
        sim('threelimb_shunt_reactor_model110kV6')
        FFTDATA = power_fftscope(current);
        FFTDATA.cycles = 1;
        FFTDATA.fundamental = 50;
        FFTDATA.maxFrequency = 550;
        results_fft= power_fftscope(FFTDATA);
        FFTDATAB = power_fftscope(logsout);
        FFTDATAB.cycles = 1;
        FFTDATAB.fundamental = 50;
        FFTDATAB.maxFrequency = 550;
        results_fftB= power_fftscope(FFTDATAB);
        FFTDATAK = power_fftscope(Iko);
        FFTDATAK.cycles = 1;
        FFTDATAK.fundamental = 150;
        FFTDATAK.maxFrequency = 750;
        results_fftK= power_fftscope(FFTDATAK);
        THD = [THD; Uko Iou results_fft.magFundamental
results_fft.magFundamental/1.4142 results_fft.THD
100*results_fft.mag./results_fft.magFundamental results_fft.phase.'
results_fftB.magFundamental results_fftB.DCcomponent
results_fftK.magFundamental results_fftK.magFundamental/1.4142 results_fftK.THD
100*results_fftK.mag./results_fftK.magFundamental results_fftK.phase.'];
    end
end
writematrix (THD, "S 0,150184 Sy 0,30938 B1 1.72 B2 1.72 Uko 3000 _ 5400
Uou 5500 Uco = 115000 Iou 100_820.xlsx")

```

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 В, 10,5 В – 31,5 кВ.

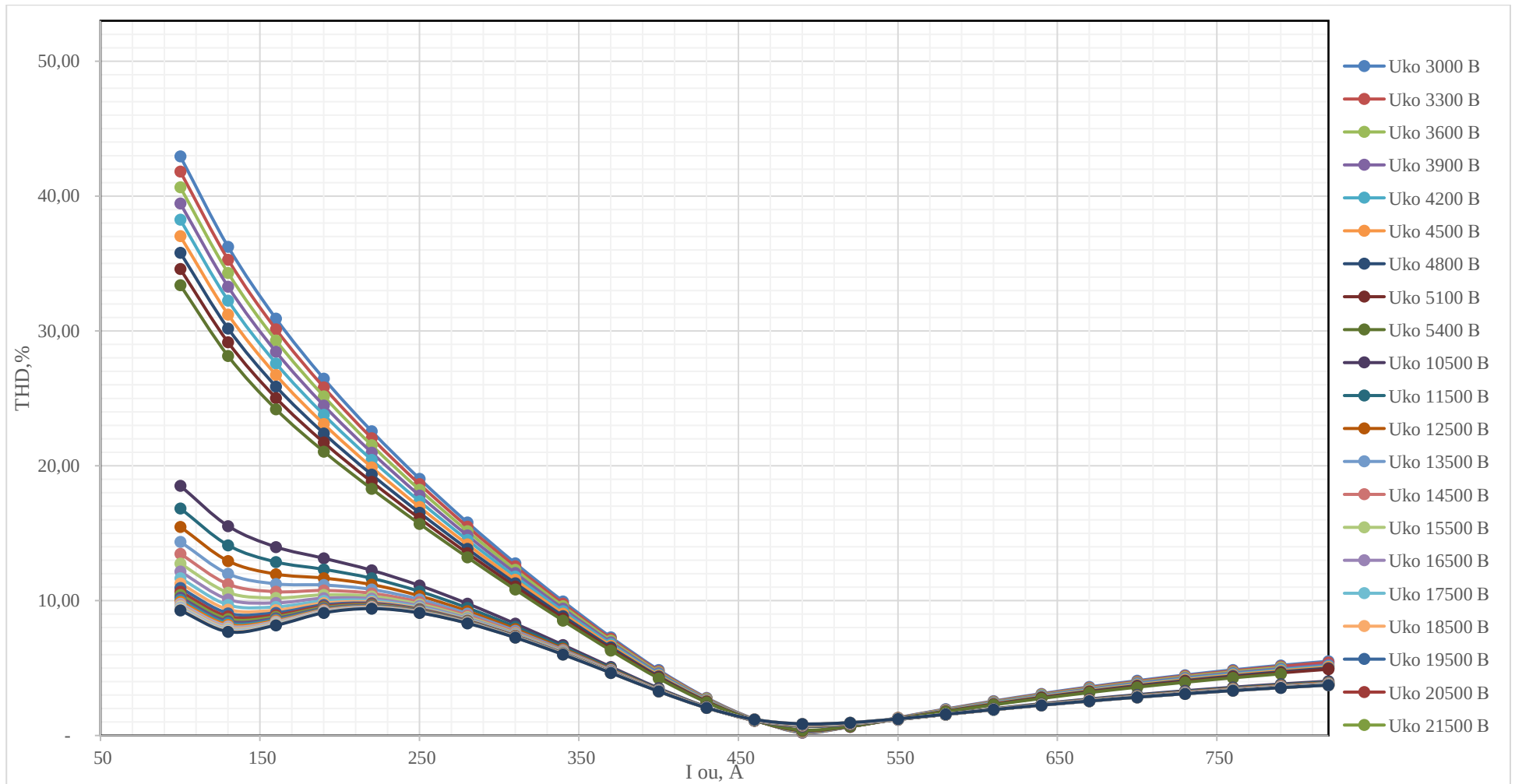


Рисунок Д.1 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{стержня} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,20379 \text{ м}^2$

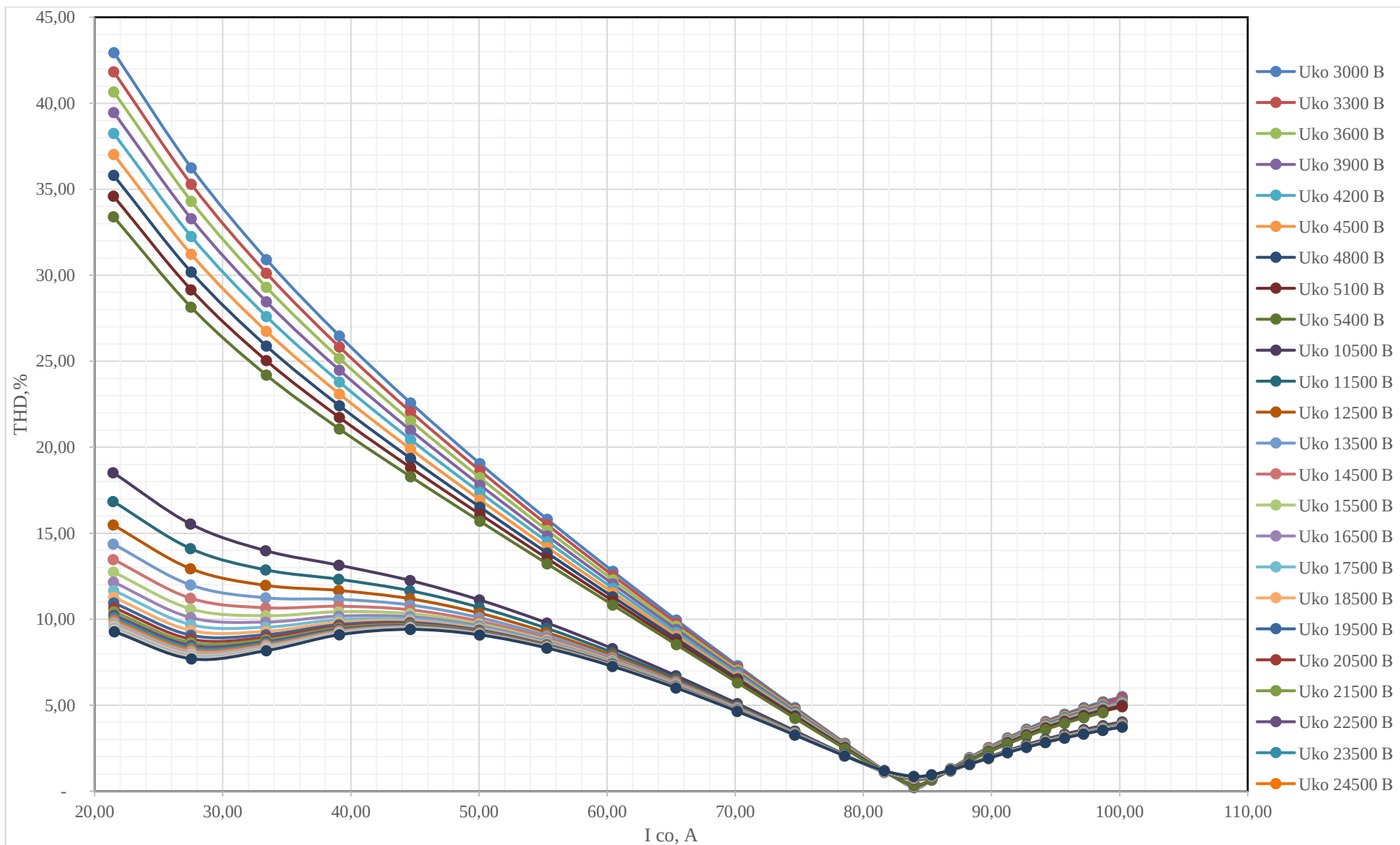


Рисунок Д.2 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

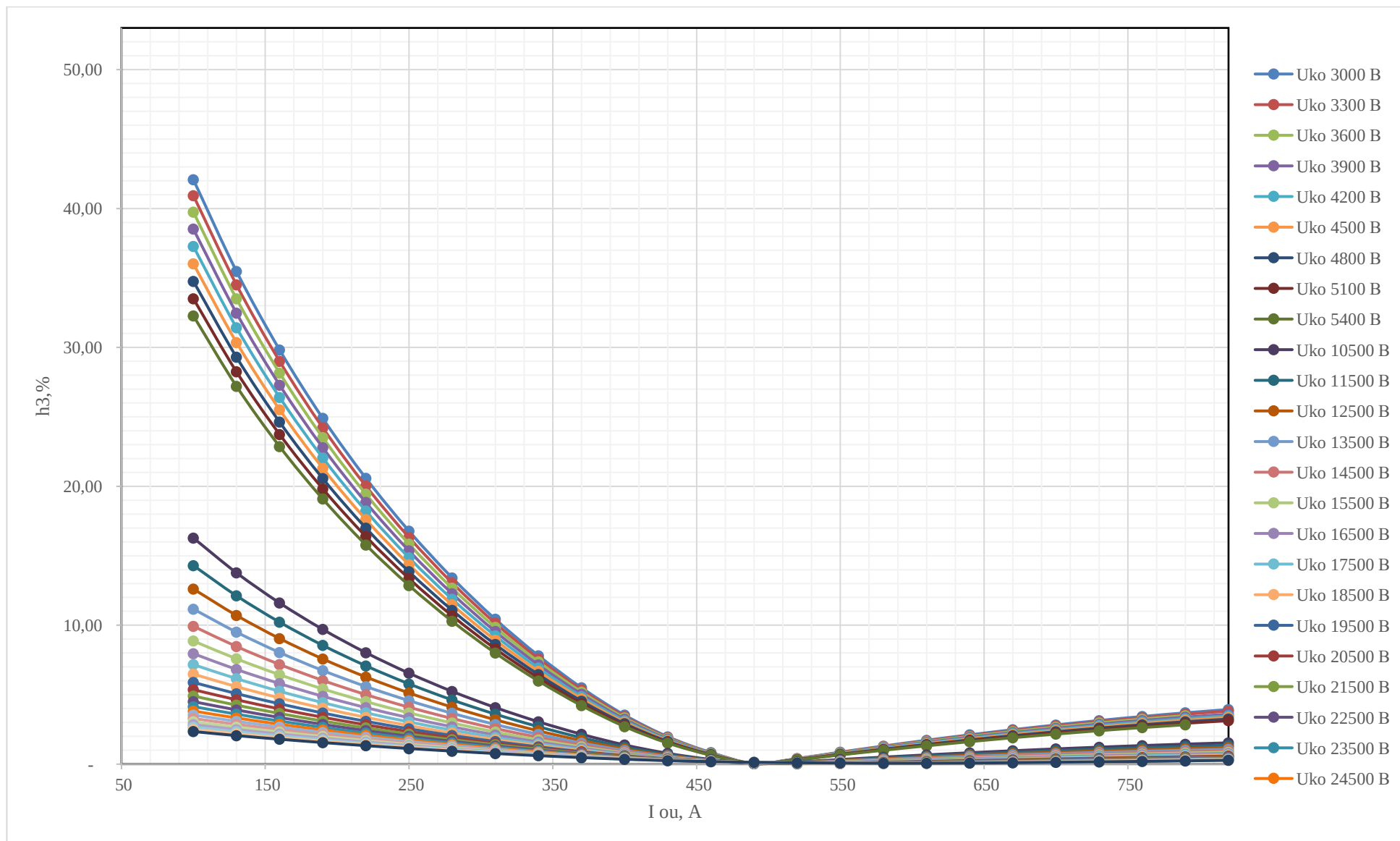


Рисунок Д.3 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

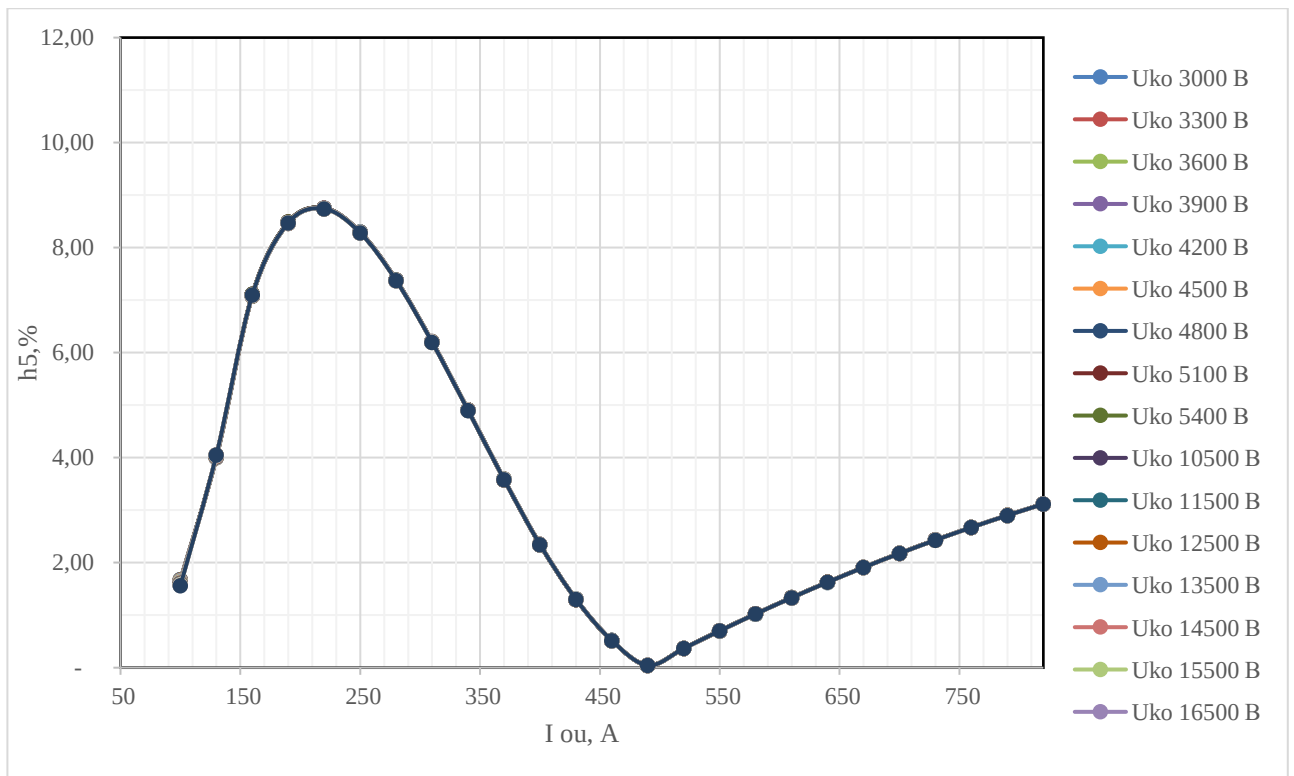


Рисунок Д.4 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

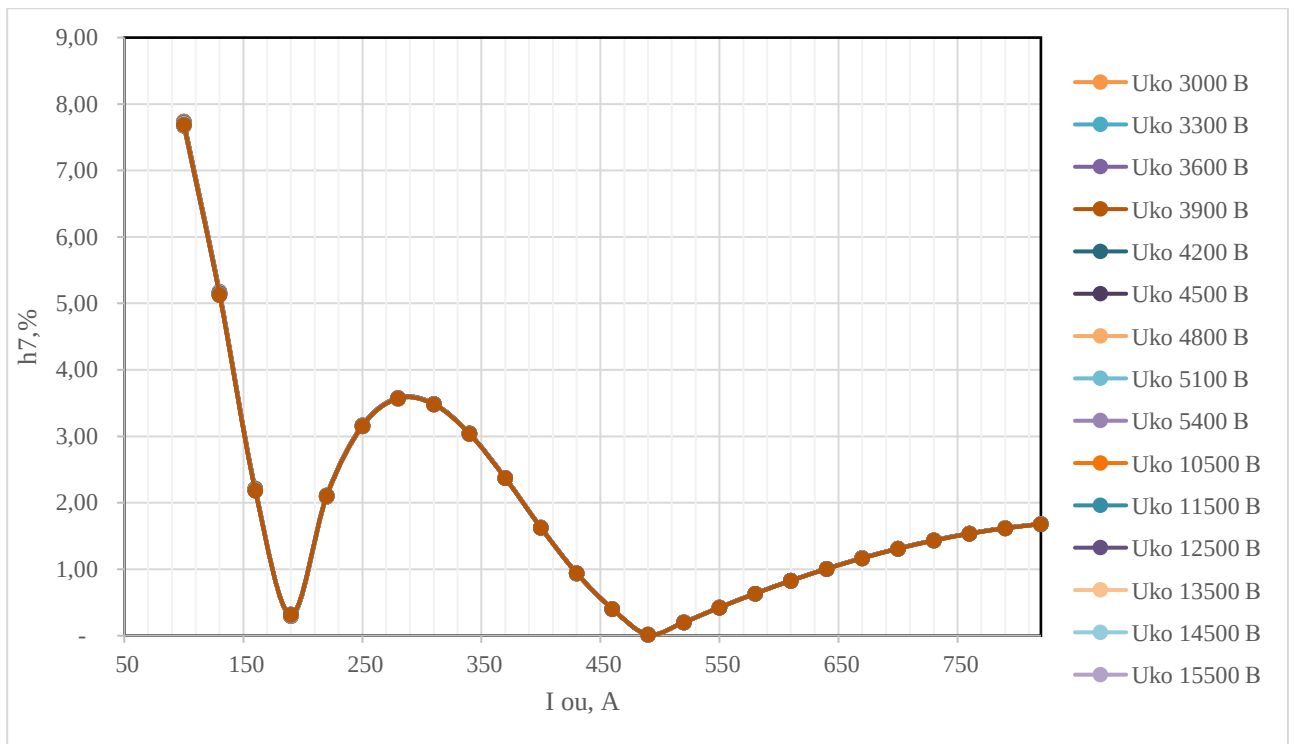


Рисунок Д.5 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

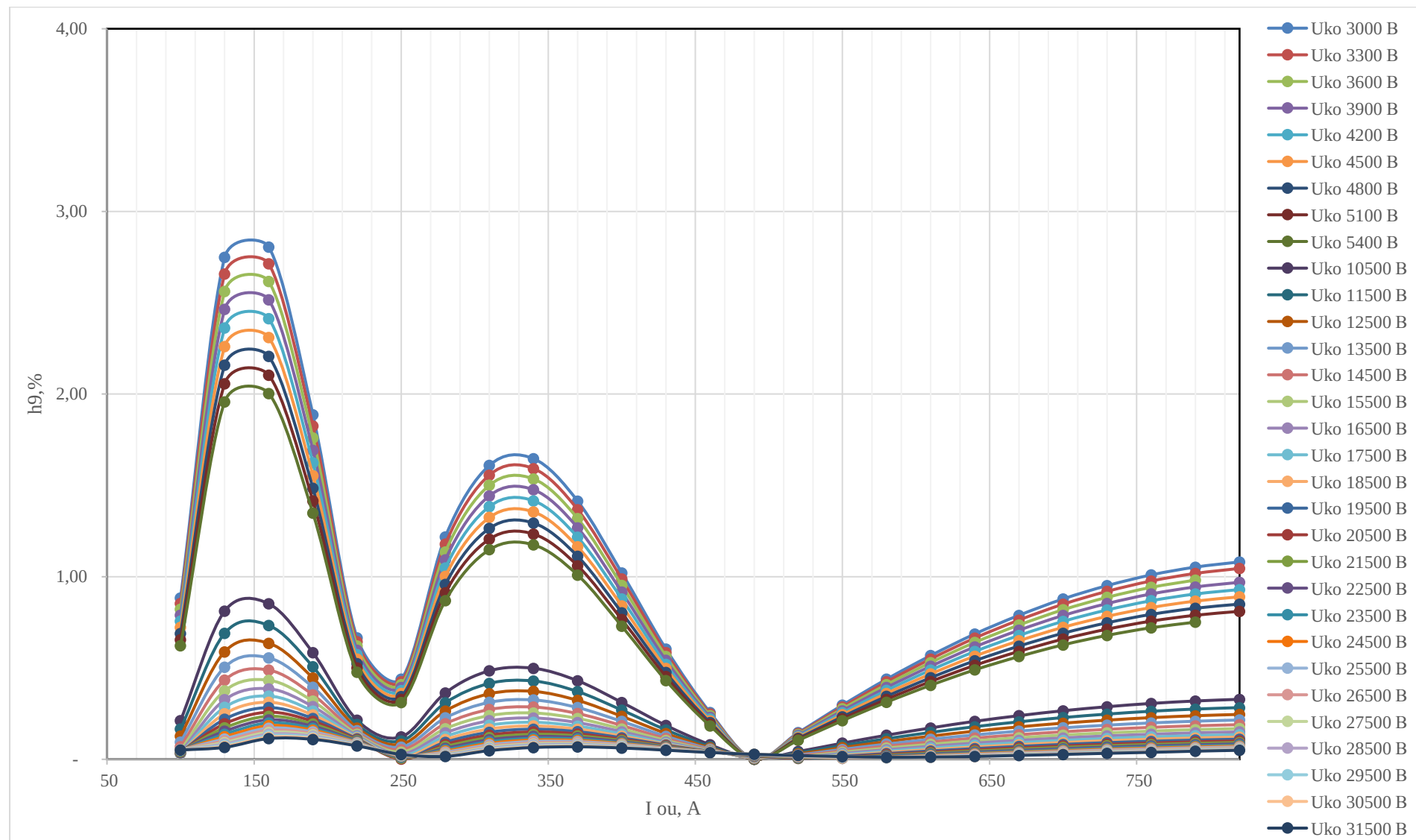


Рисунок Д.6 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

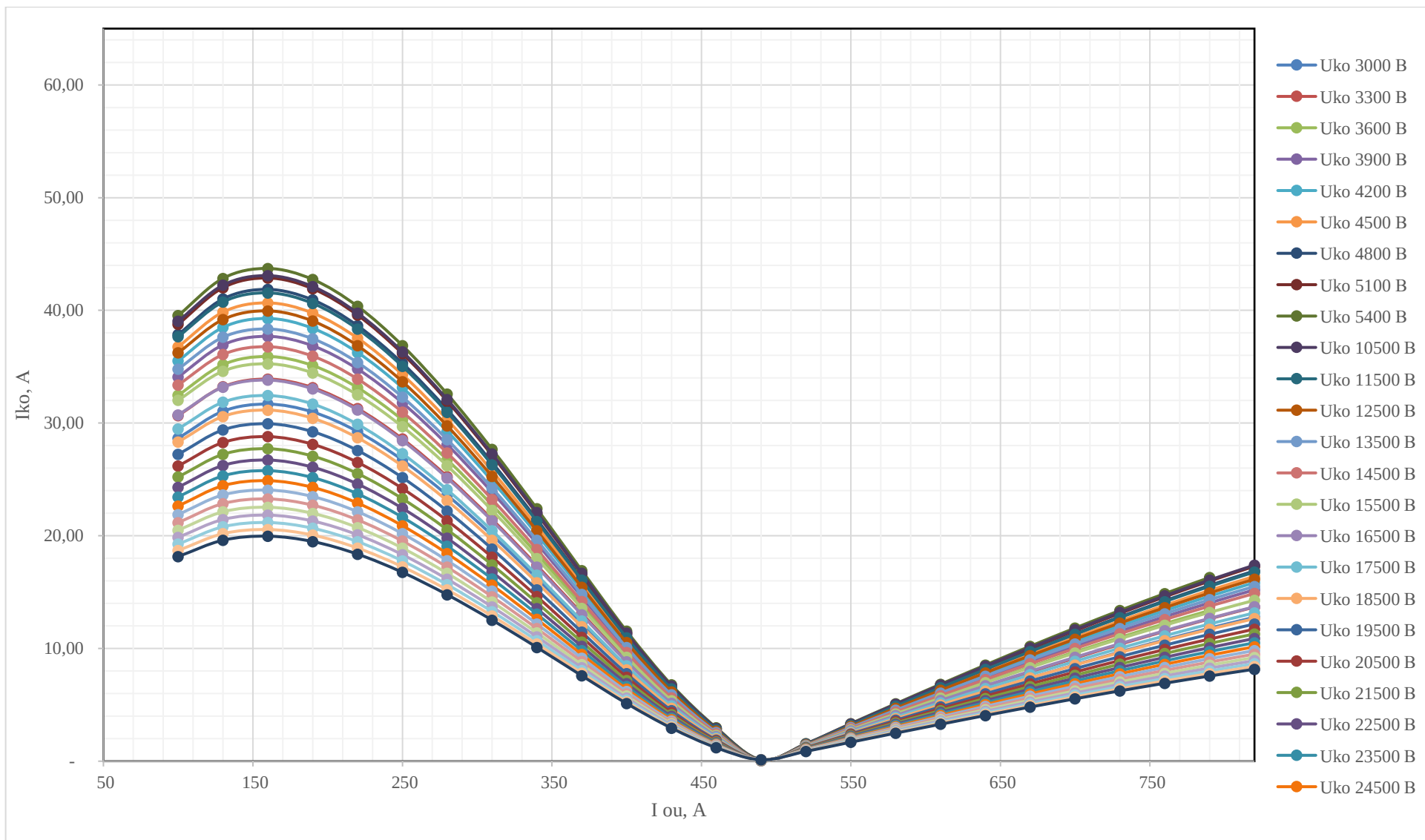


Рисунок Д.7 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$, $S_{стержня} = 0,103973 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,20379 \text{ м}^2$

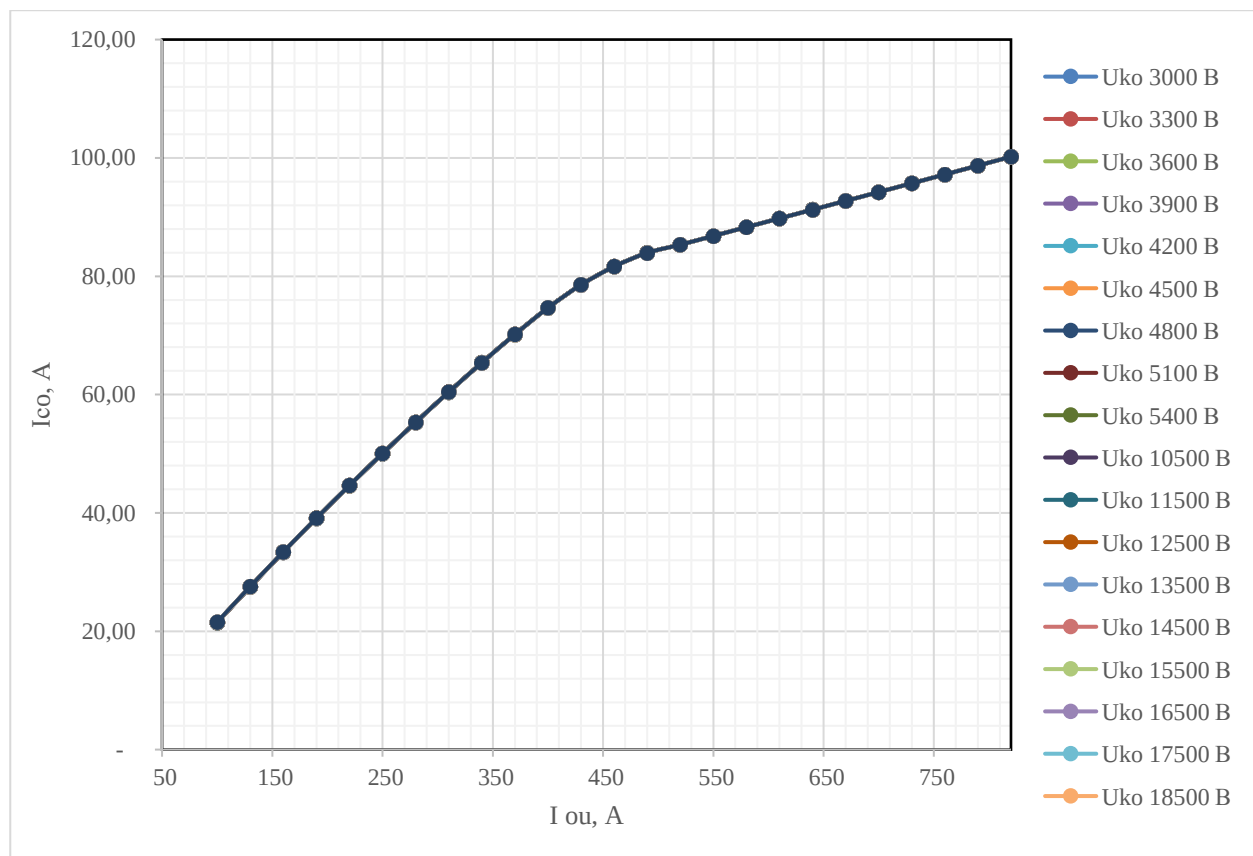


Рисунок Д.8 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,103973 \text{ м}^2$,
 $S_{\text{ярем}} = 0,20379 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ.

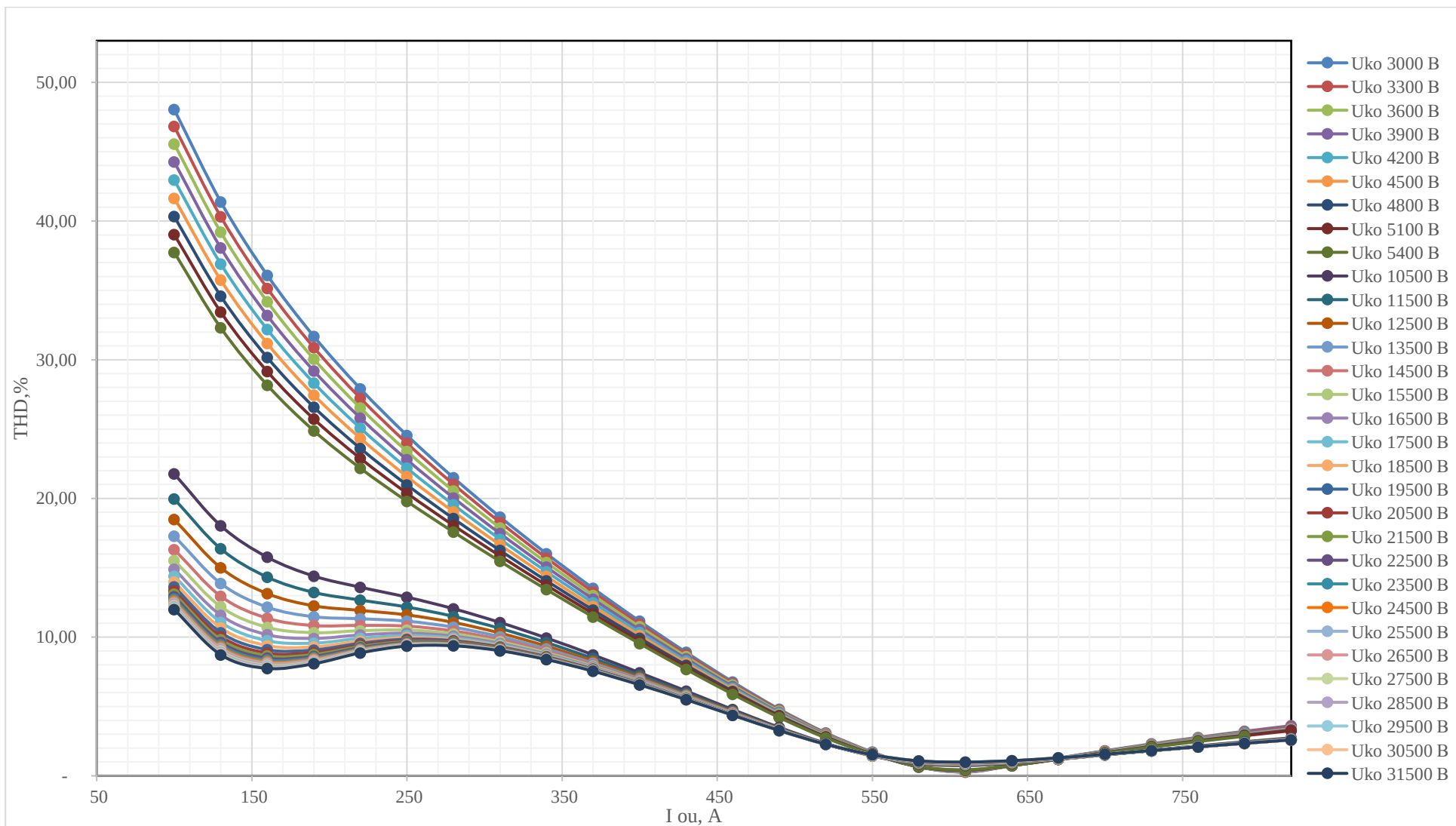


Рисунок Д.9 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

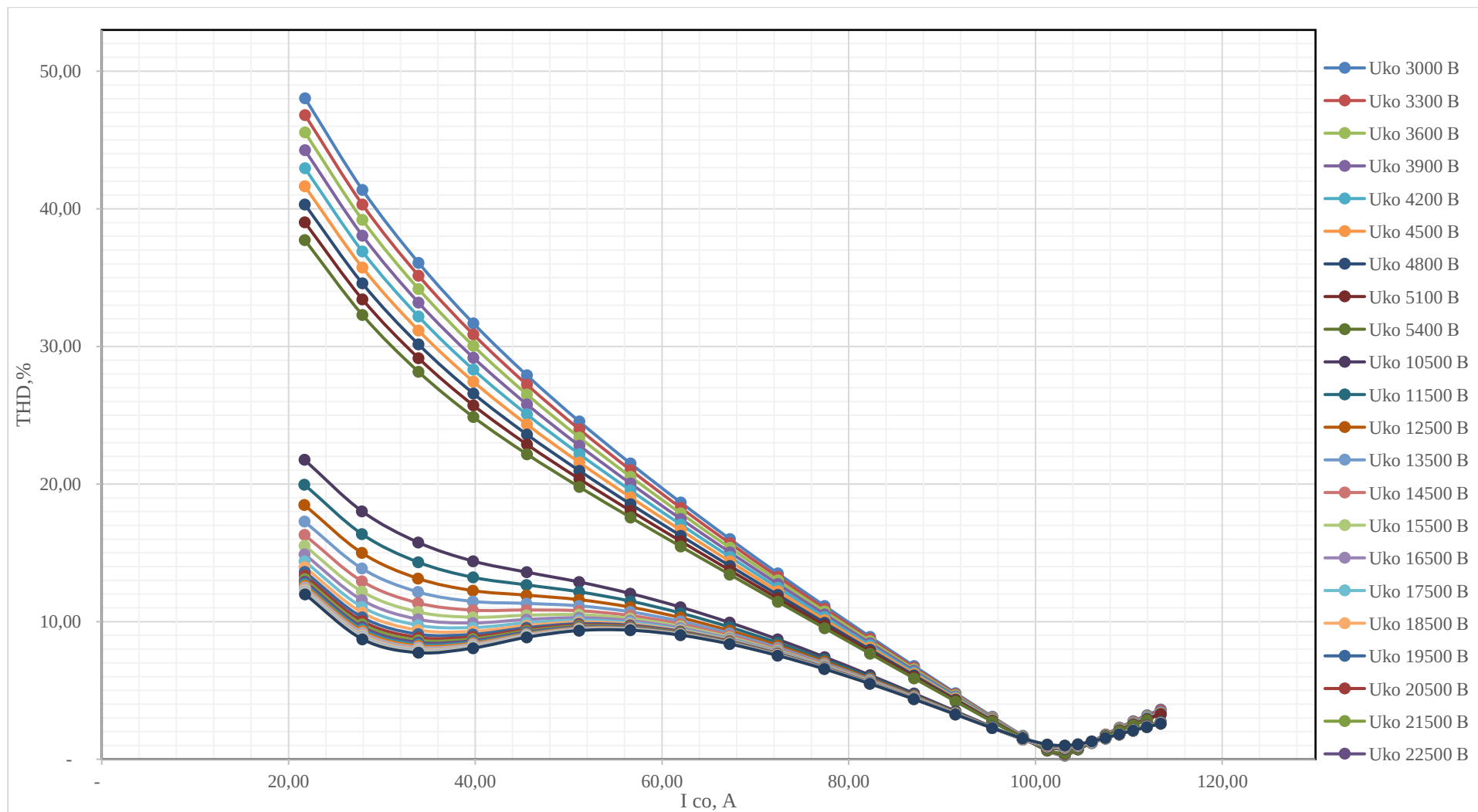


Рисунок Д.10 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

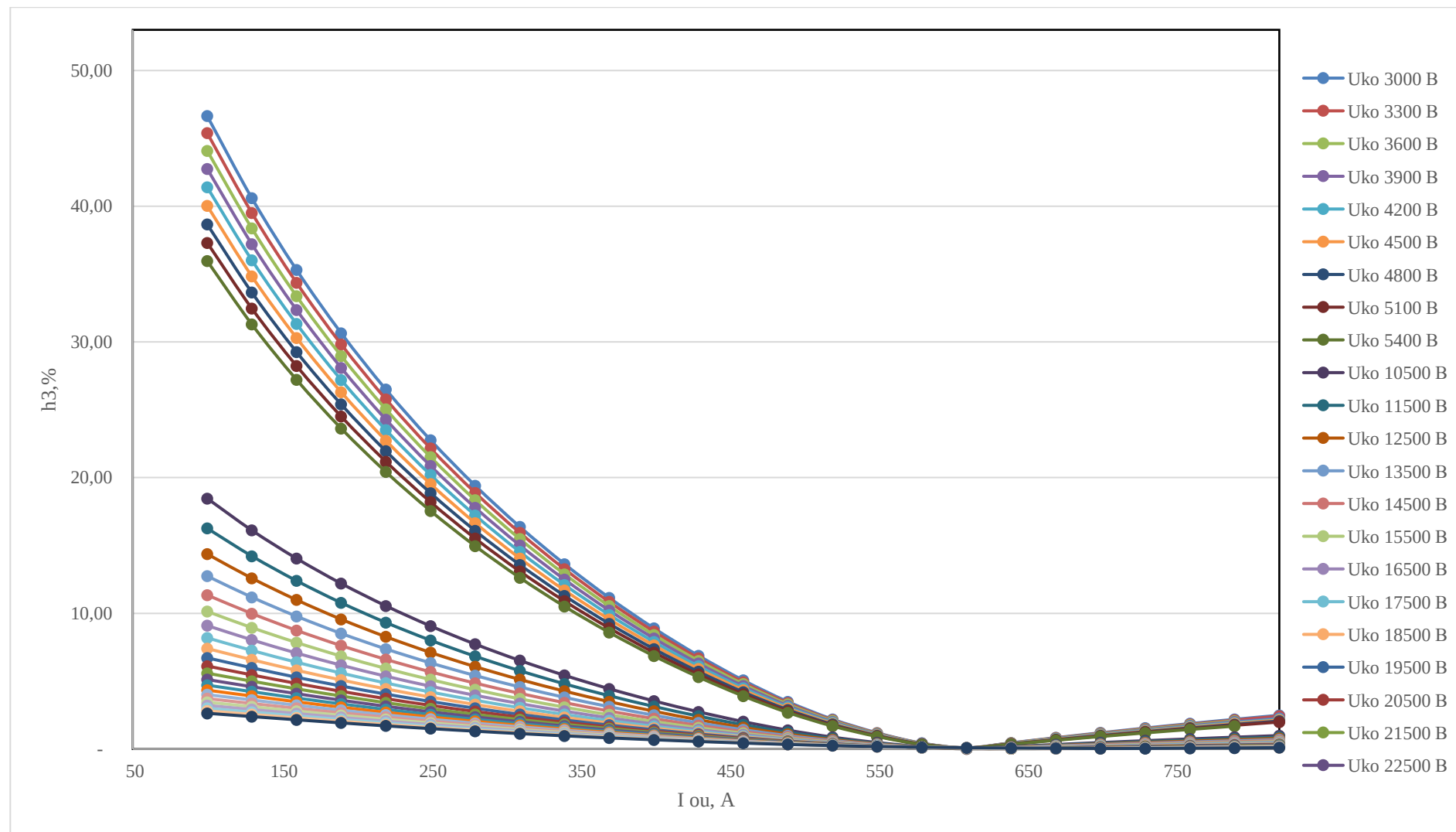


Рисунок Д.11 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

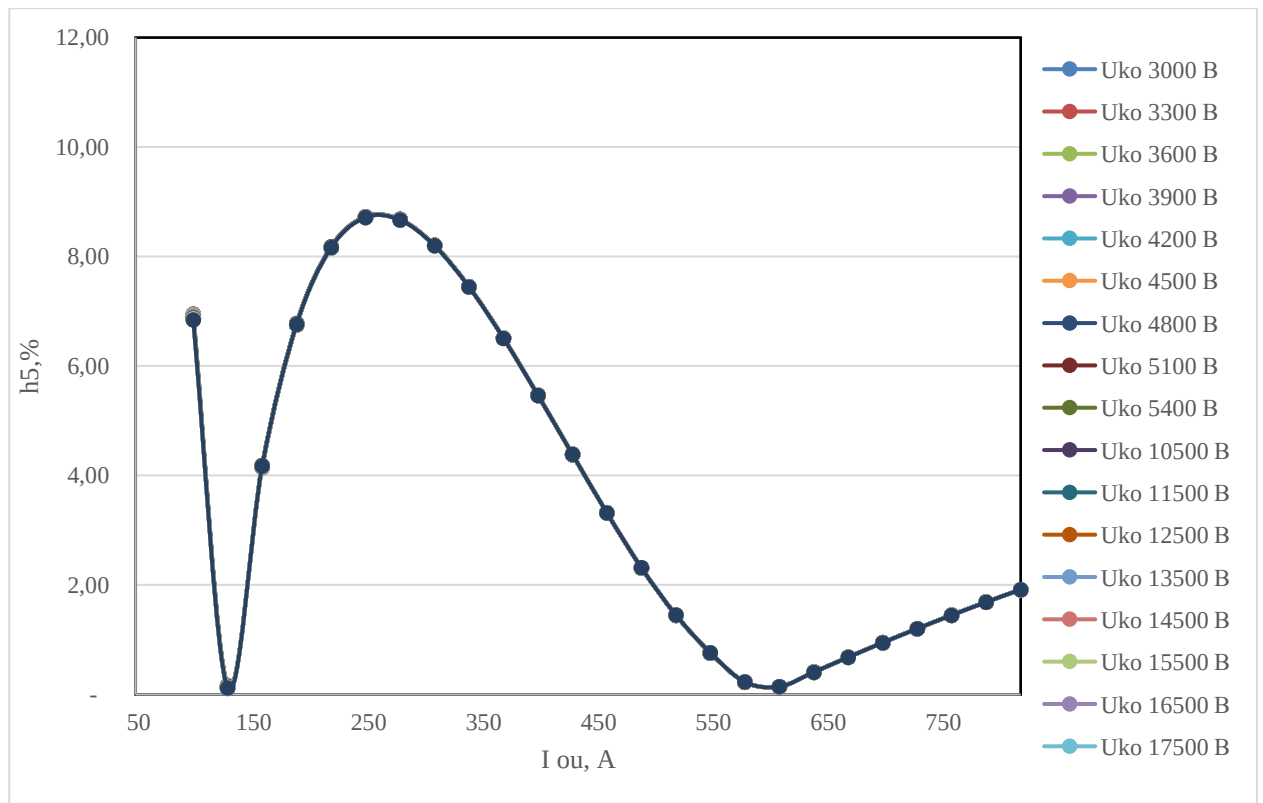


Рисунок Д.12 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

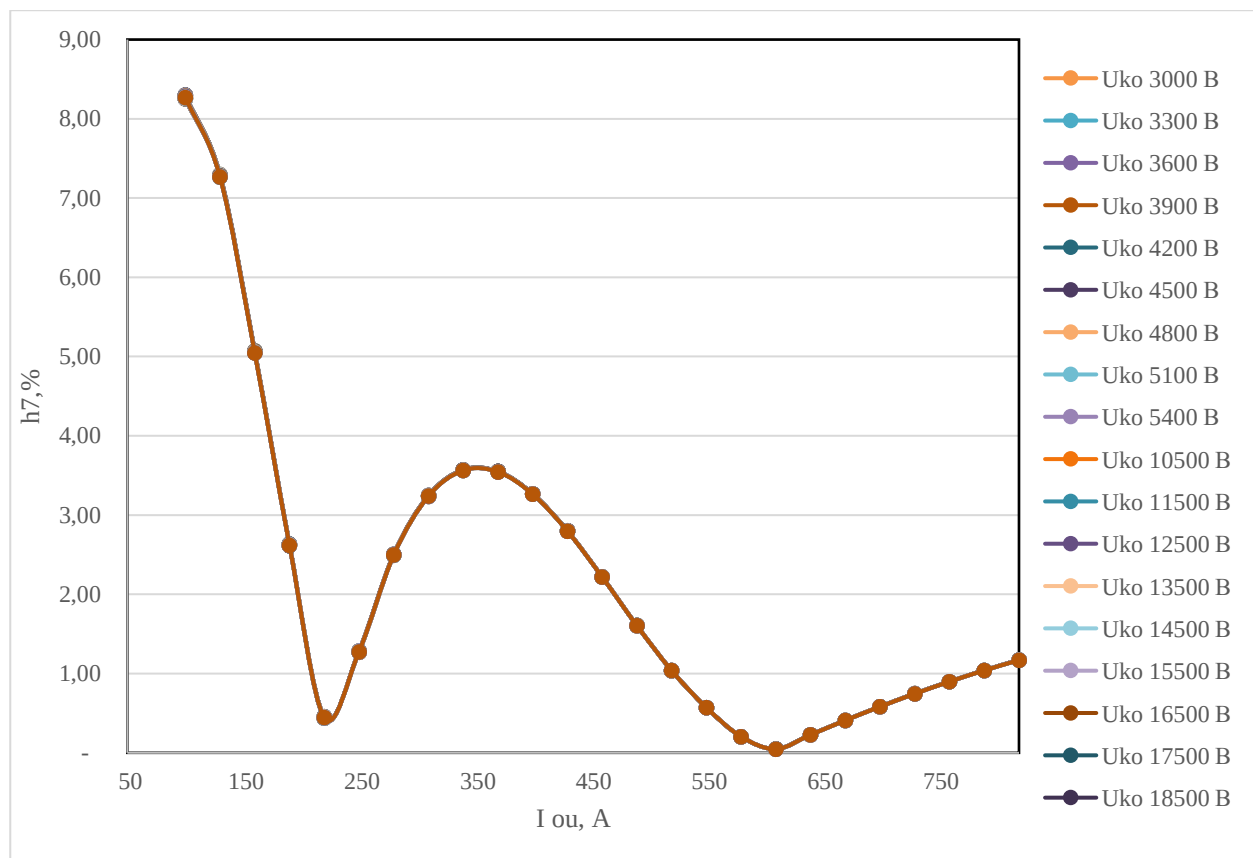


Рисунок Д.13 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

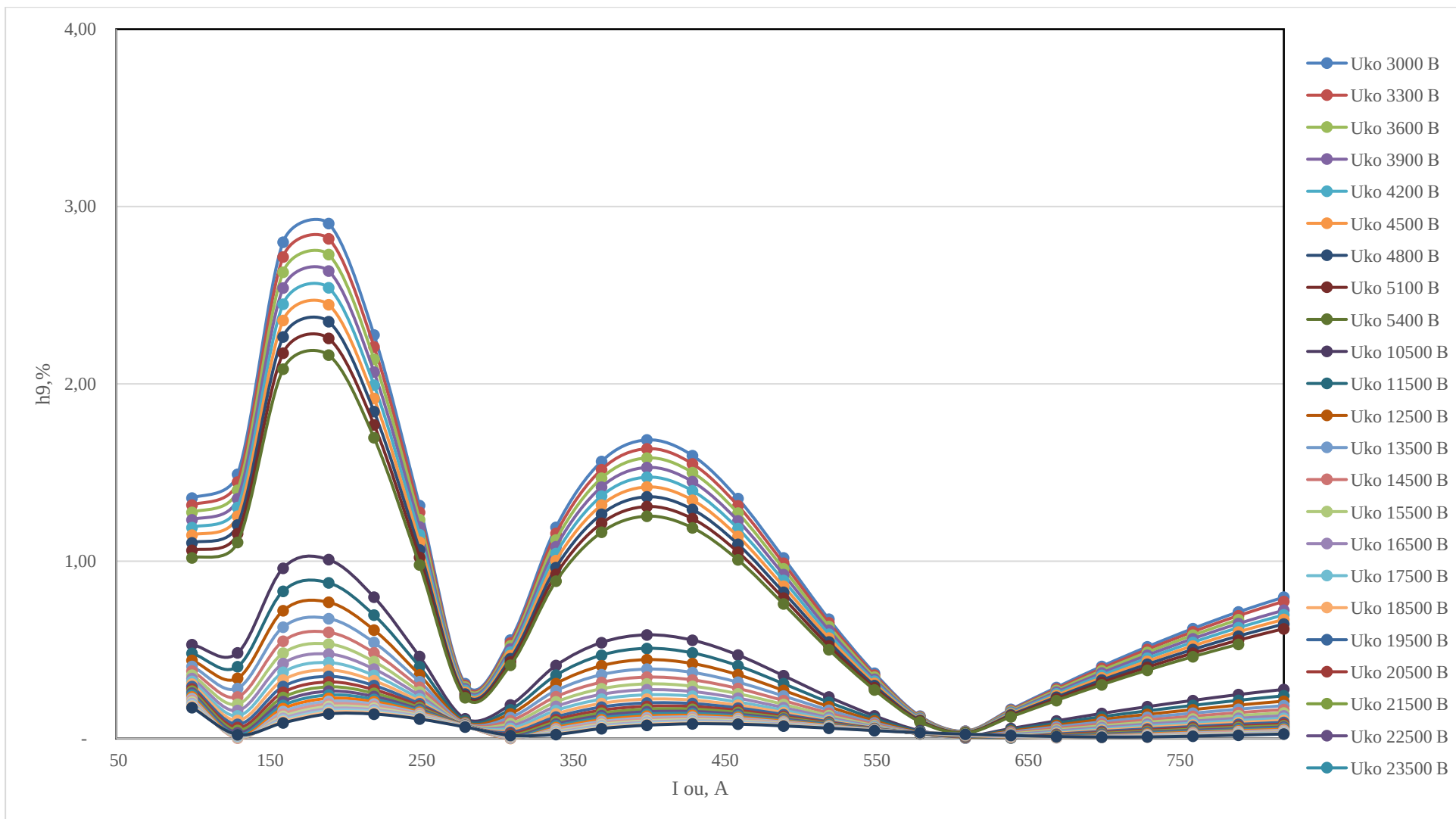


Рисунок Д.14 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

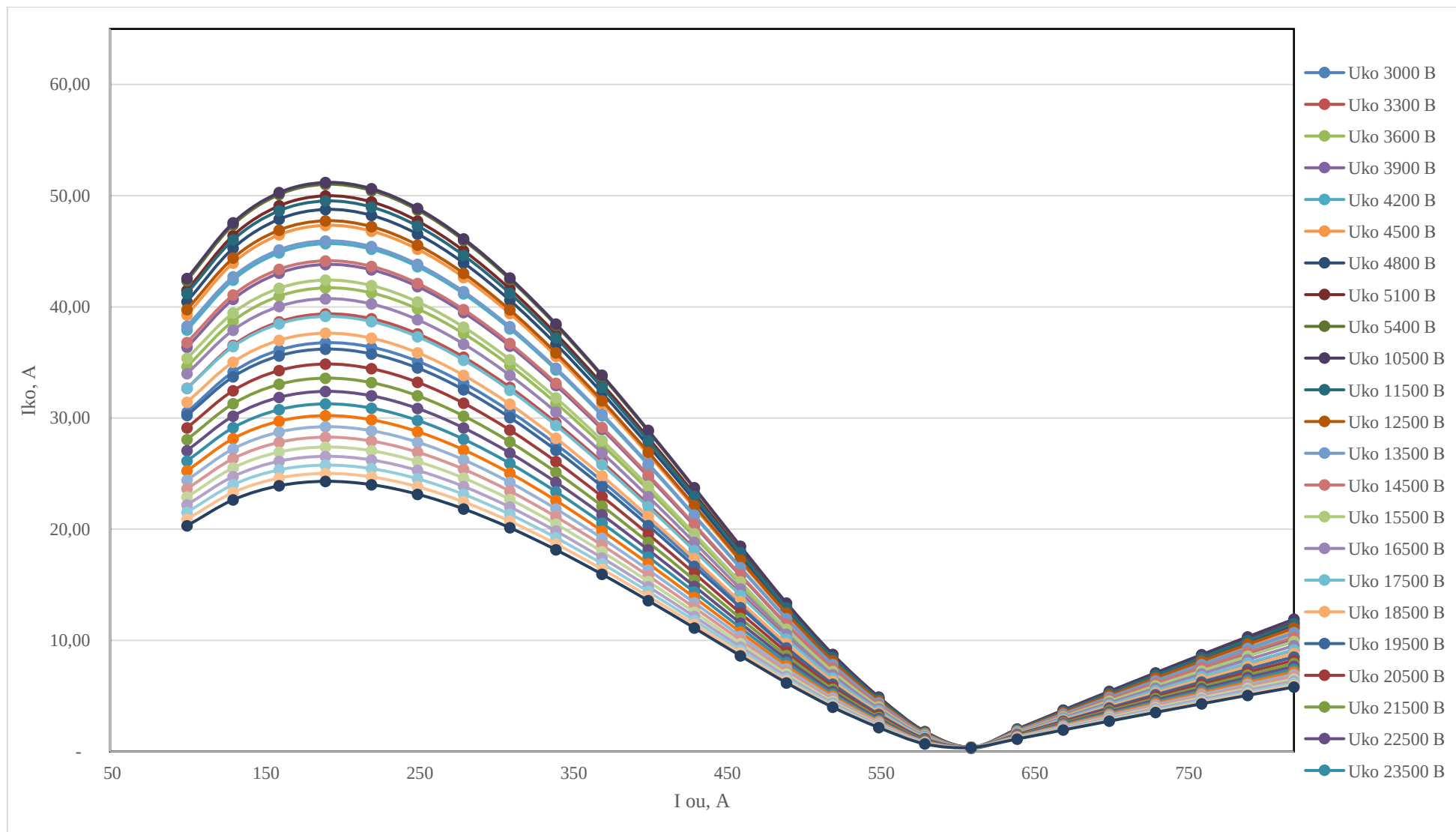


Рисунок Д.15 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$, $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

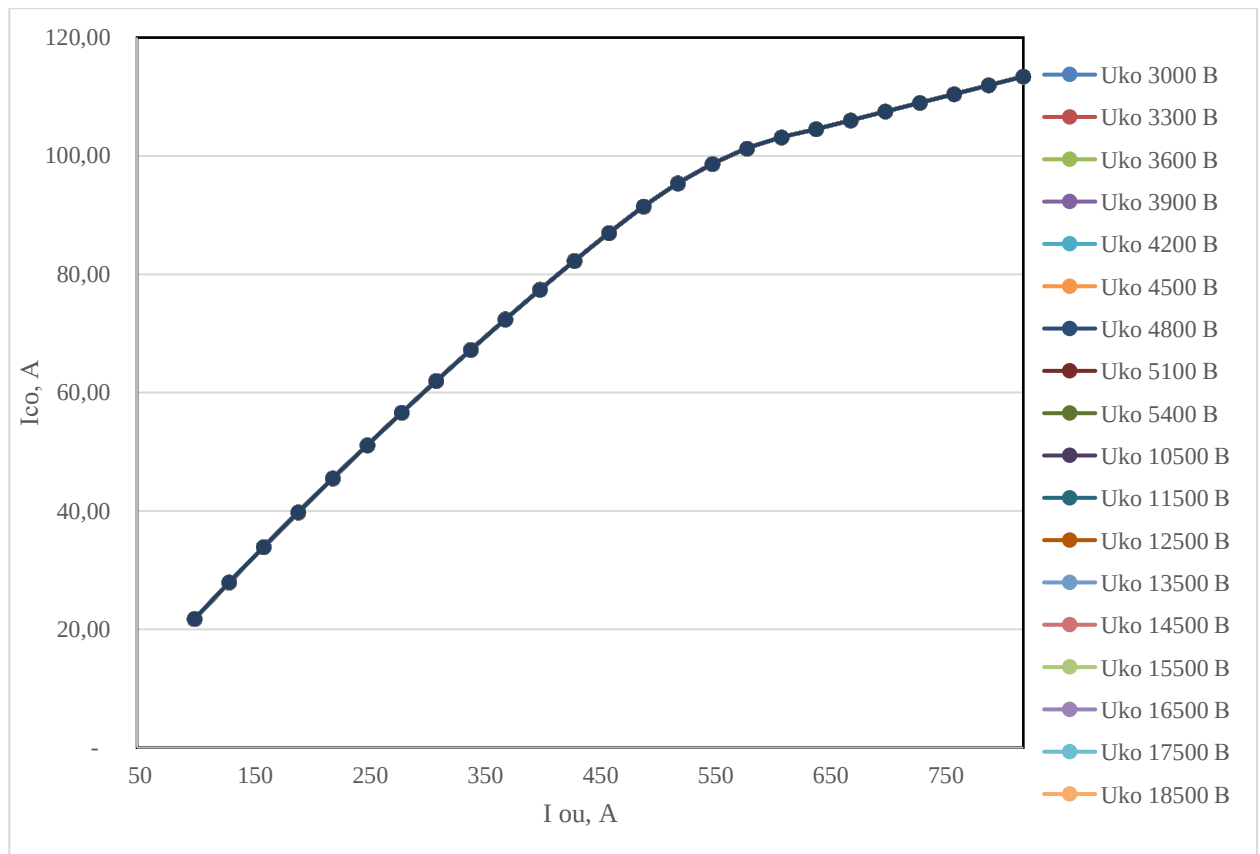


Рисунок Д.16 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,127079 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,24907 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ.

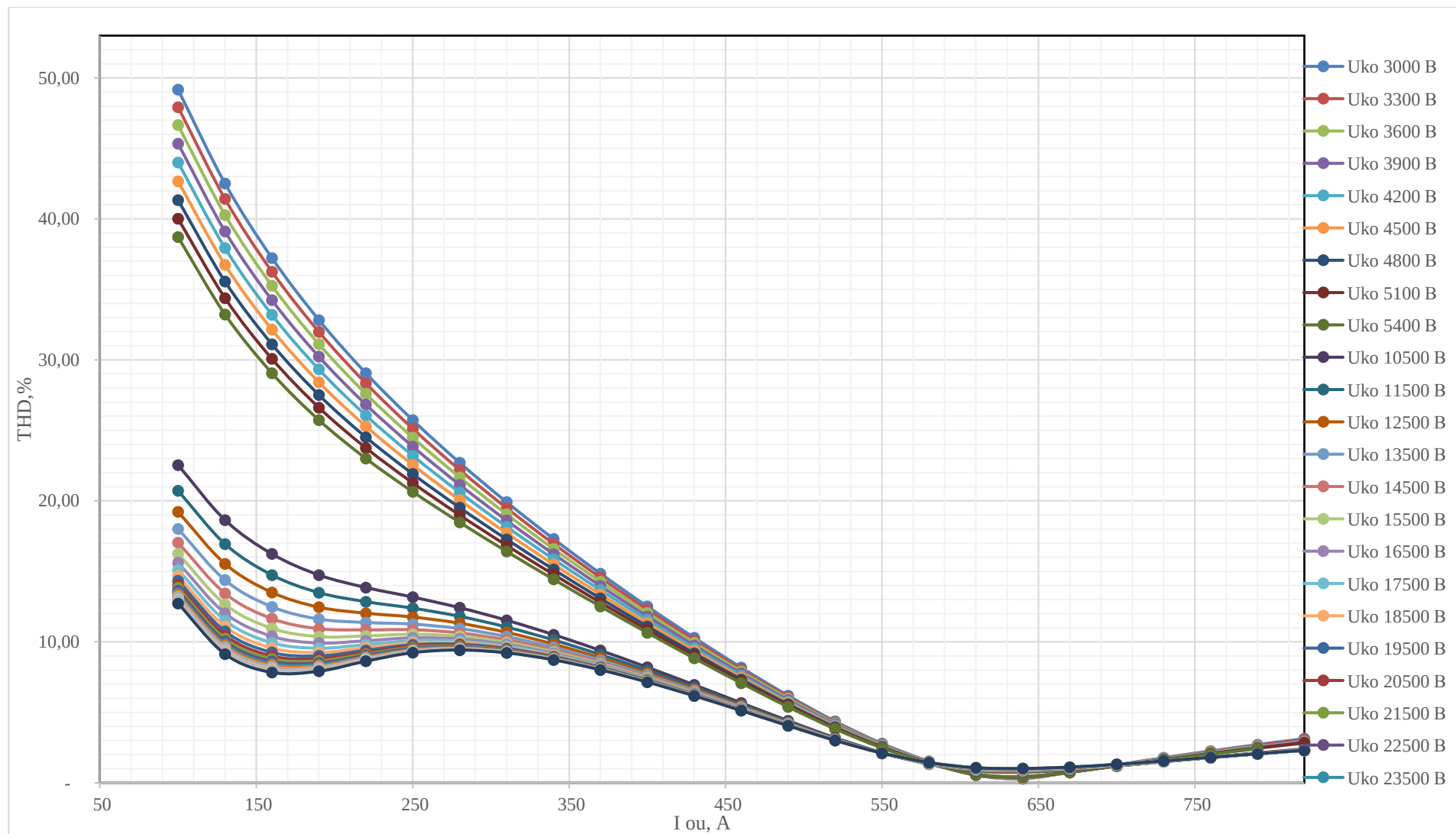


Рисунок Д.17 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

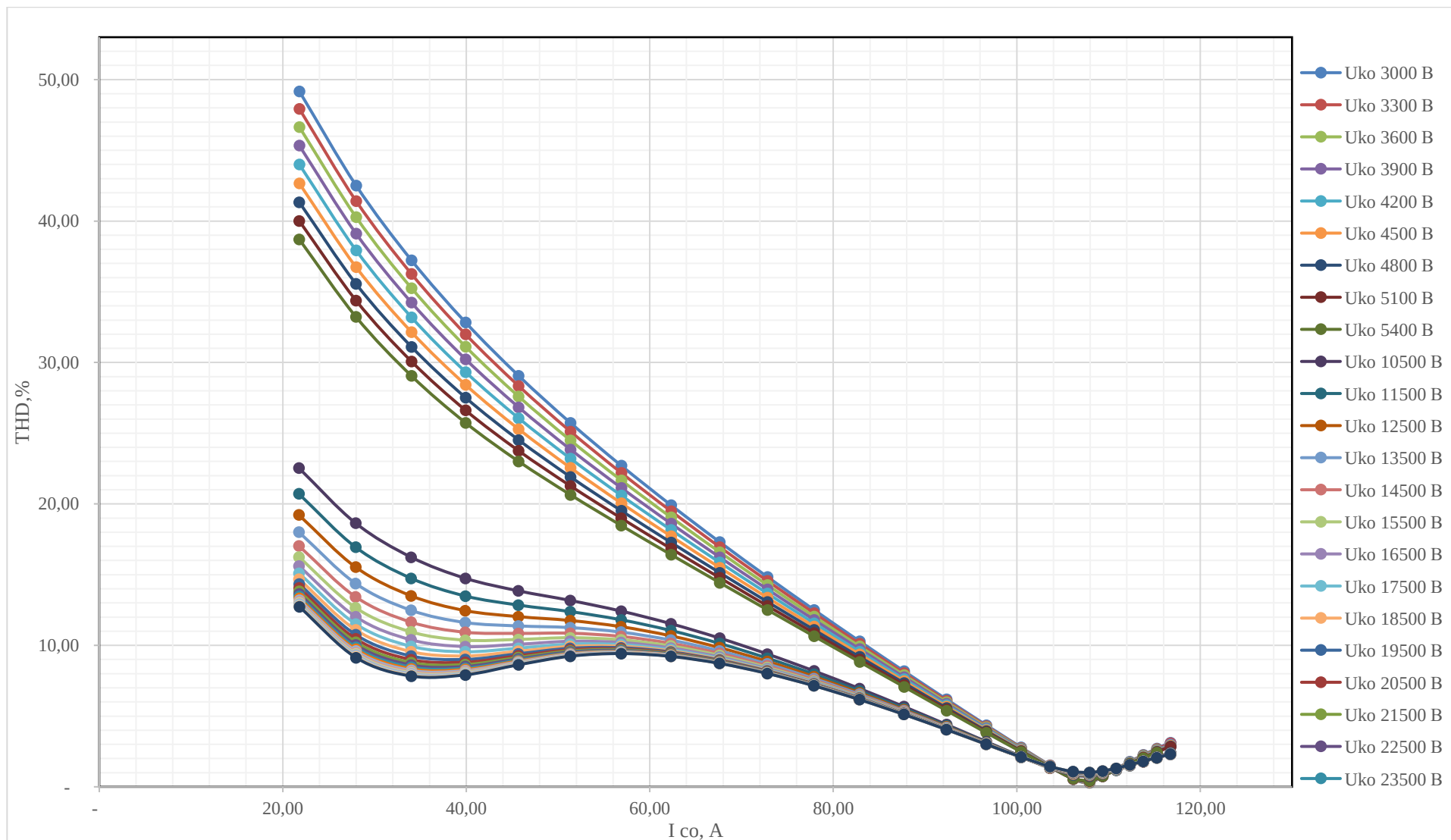


Рисунок Д.18 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

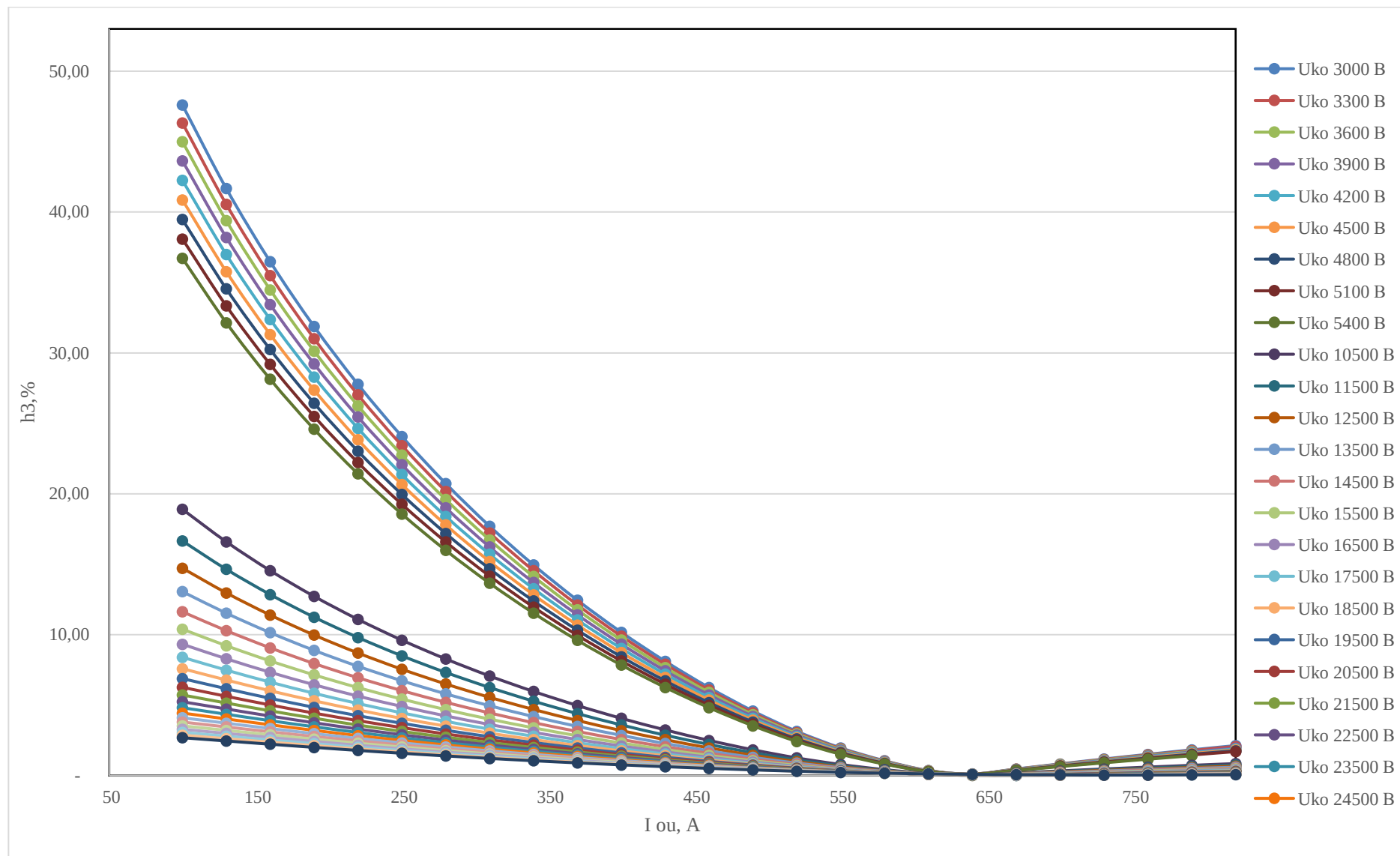


Рисунок Д.19 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

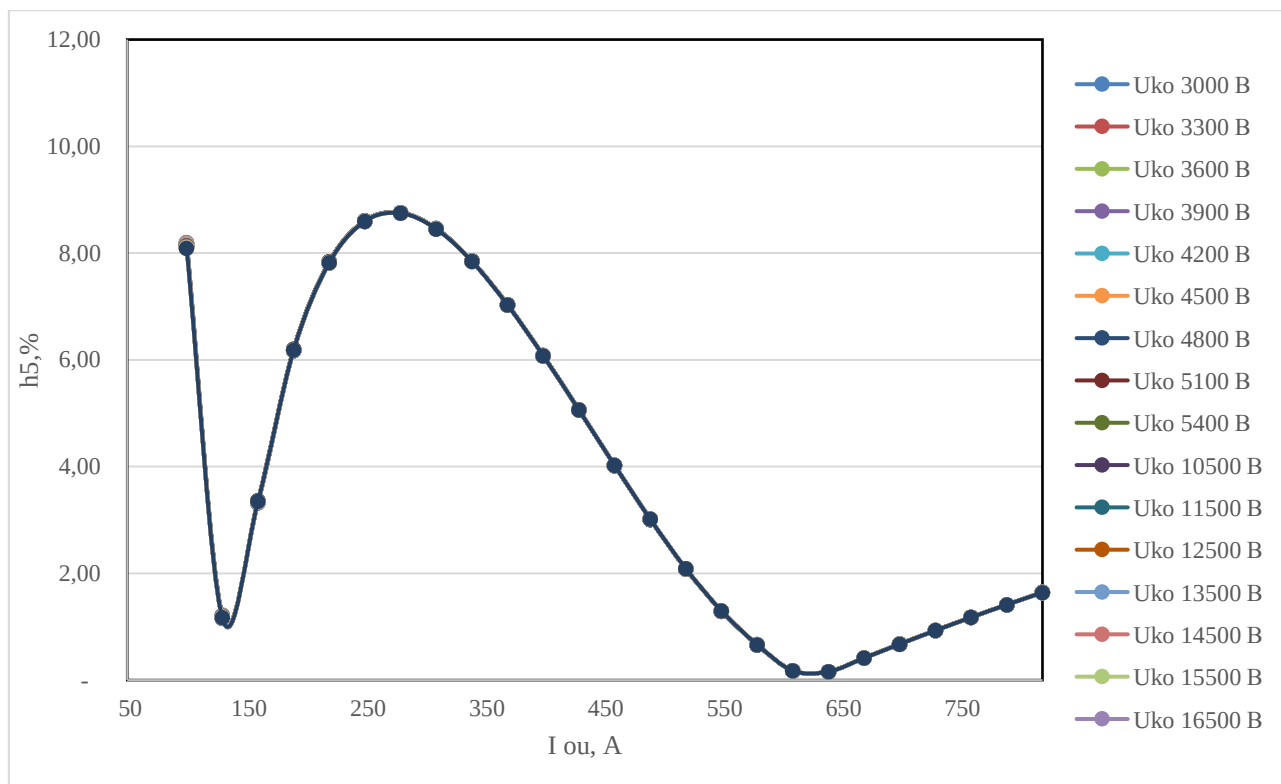


Рисунок Д.20 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

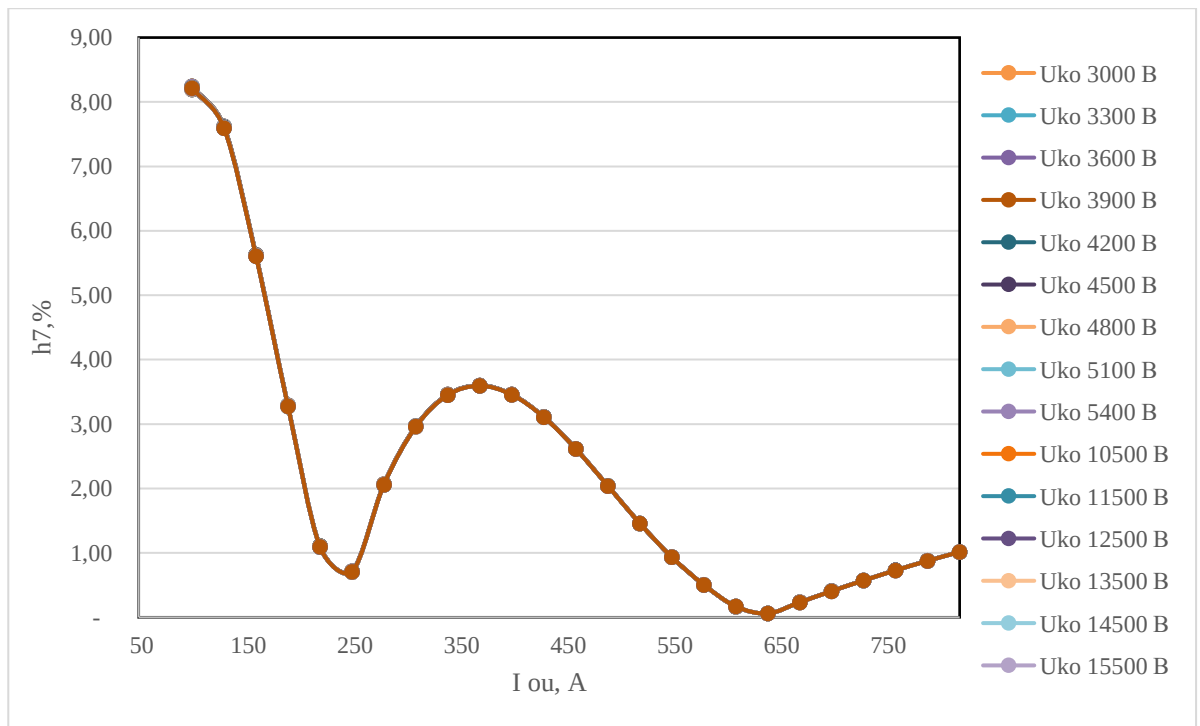


Рисунок Д.21 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

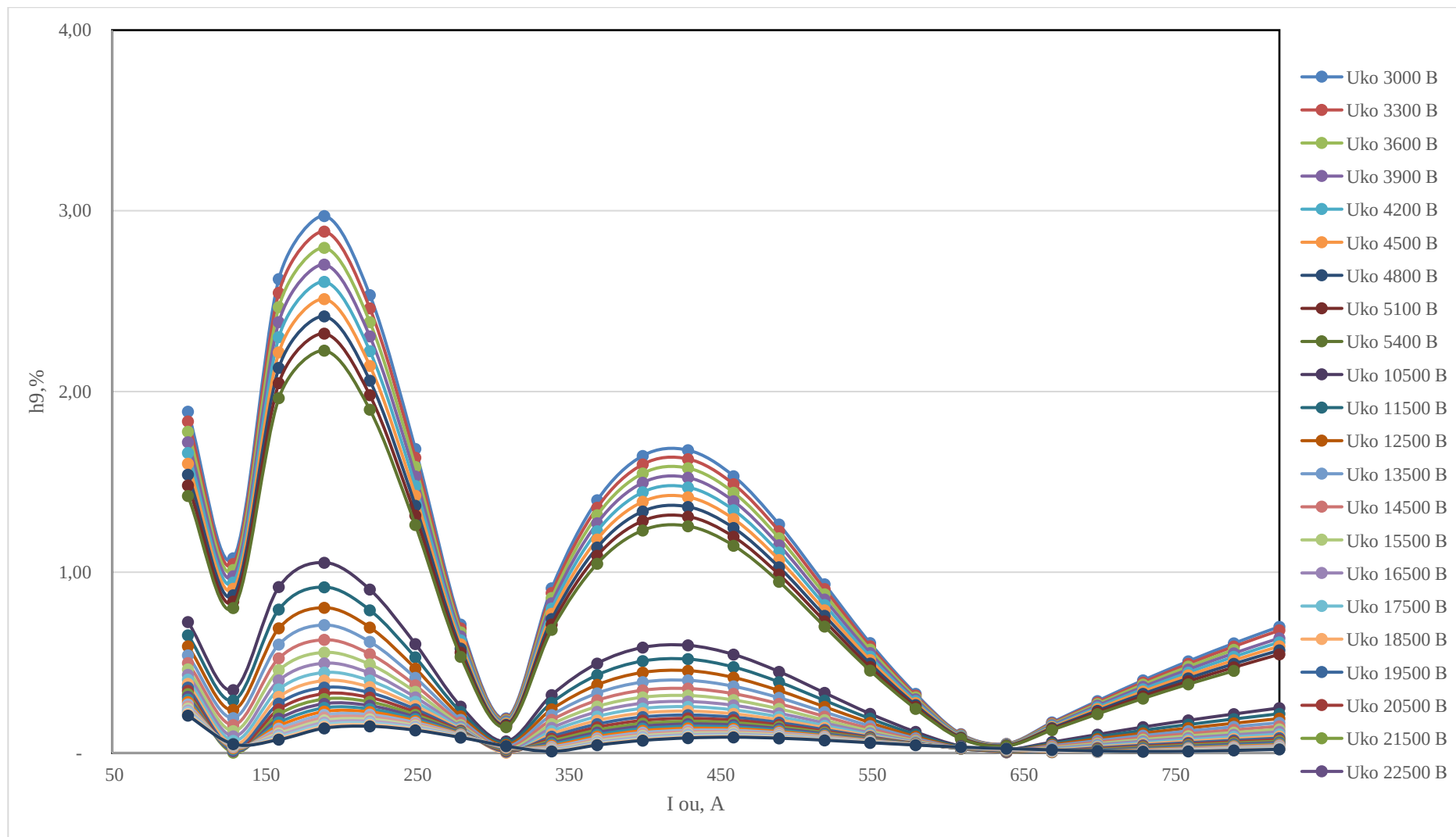


Рисунок Д.22 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

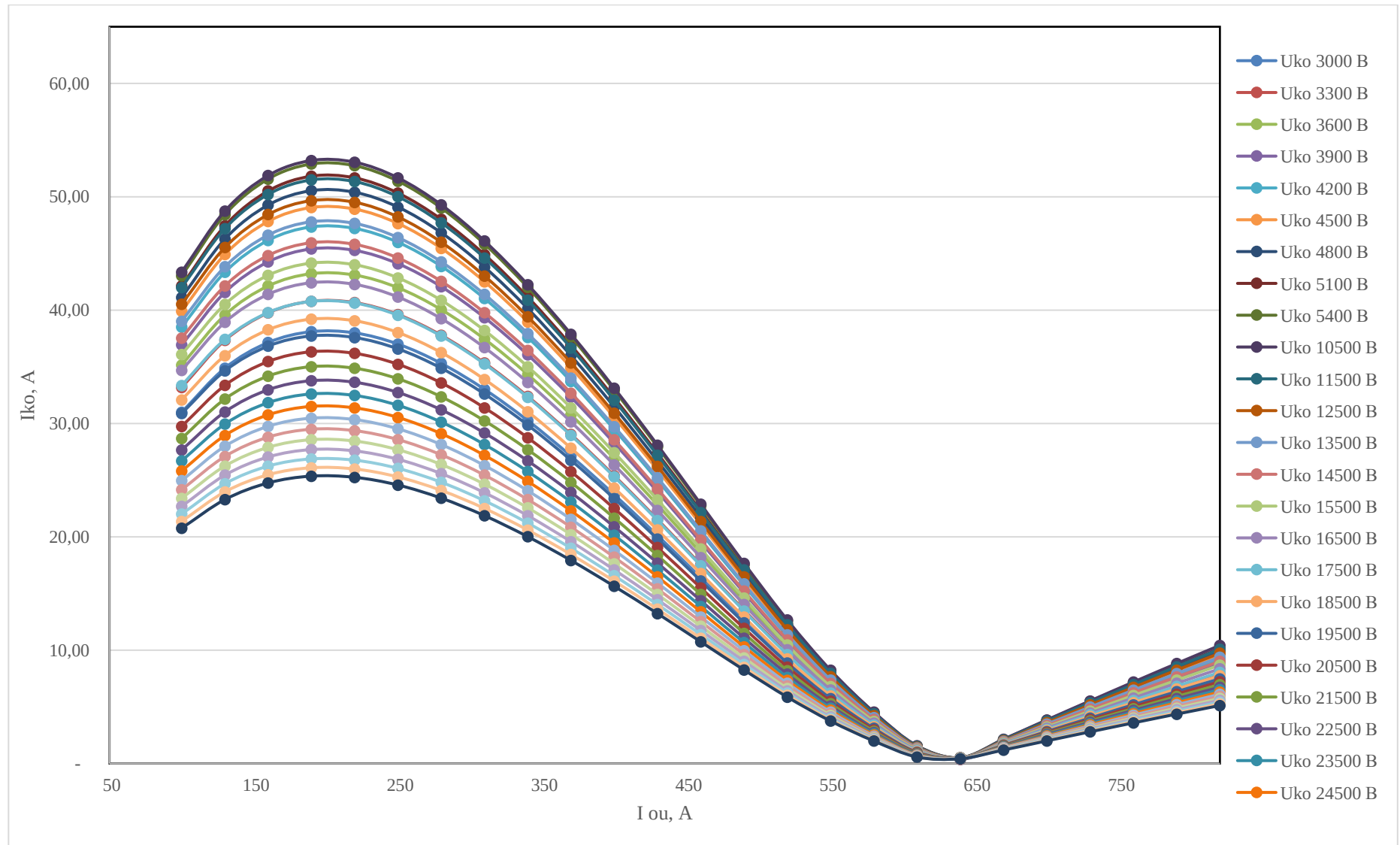


Рисунок Д.23 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} , $S_{\text{стержня}} = 0,132855 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26040 \text{ м}^2$

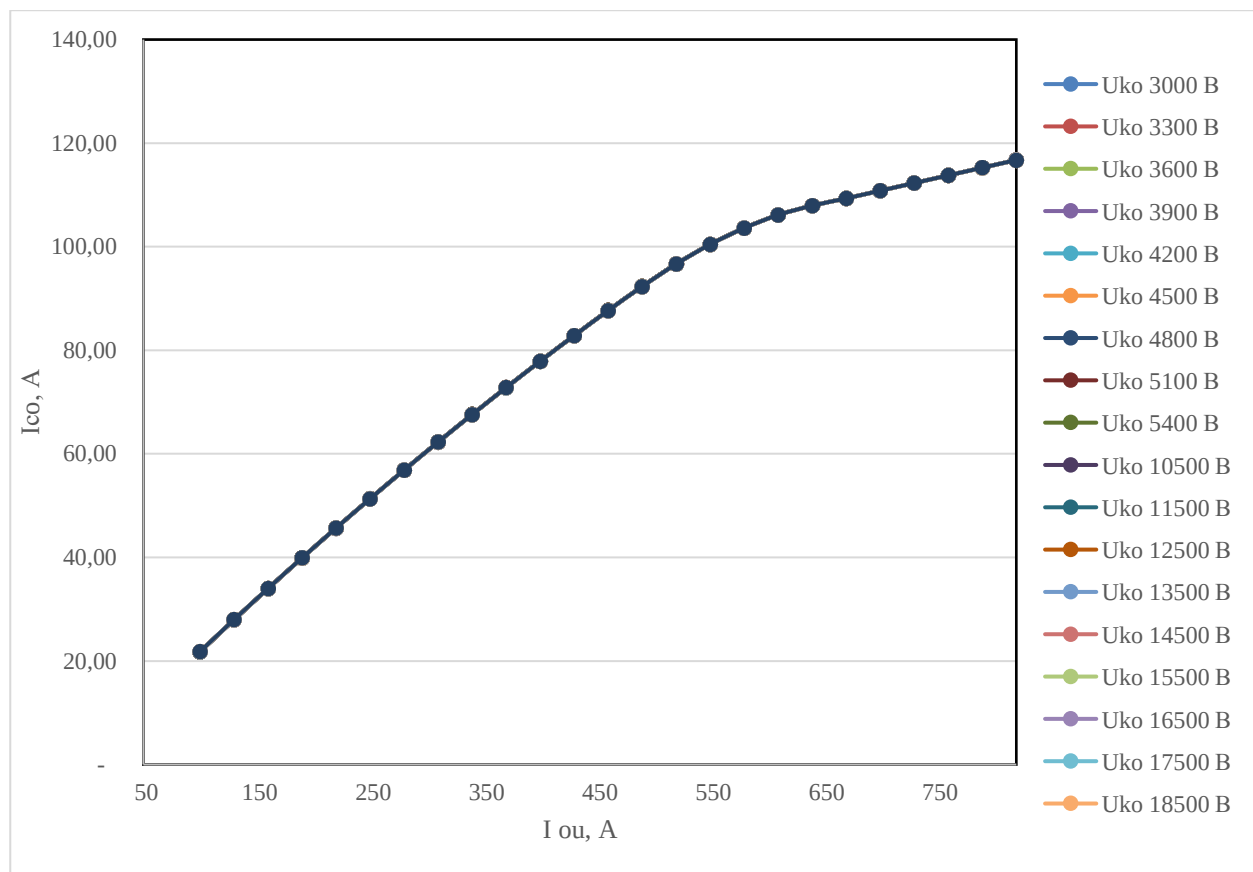


Рисунок Д.24 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} - 0,27172 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ.

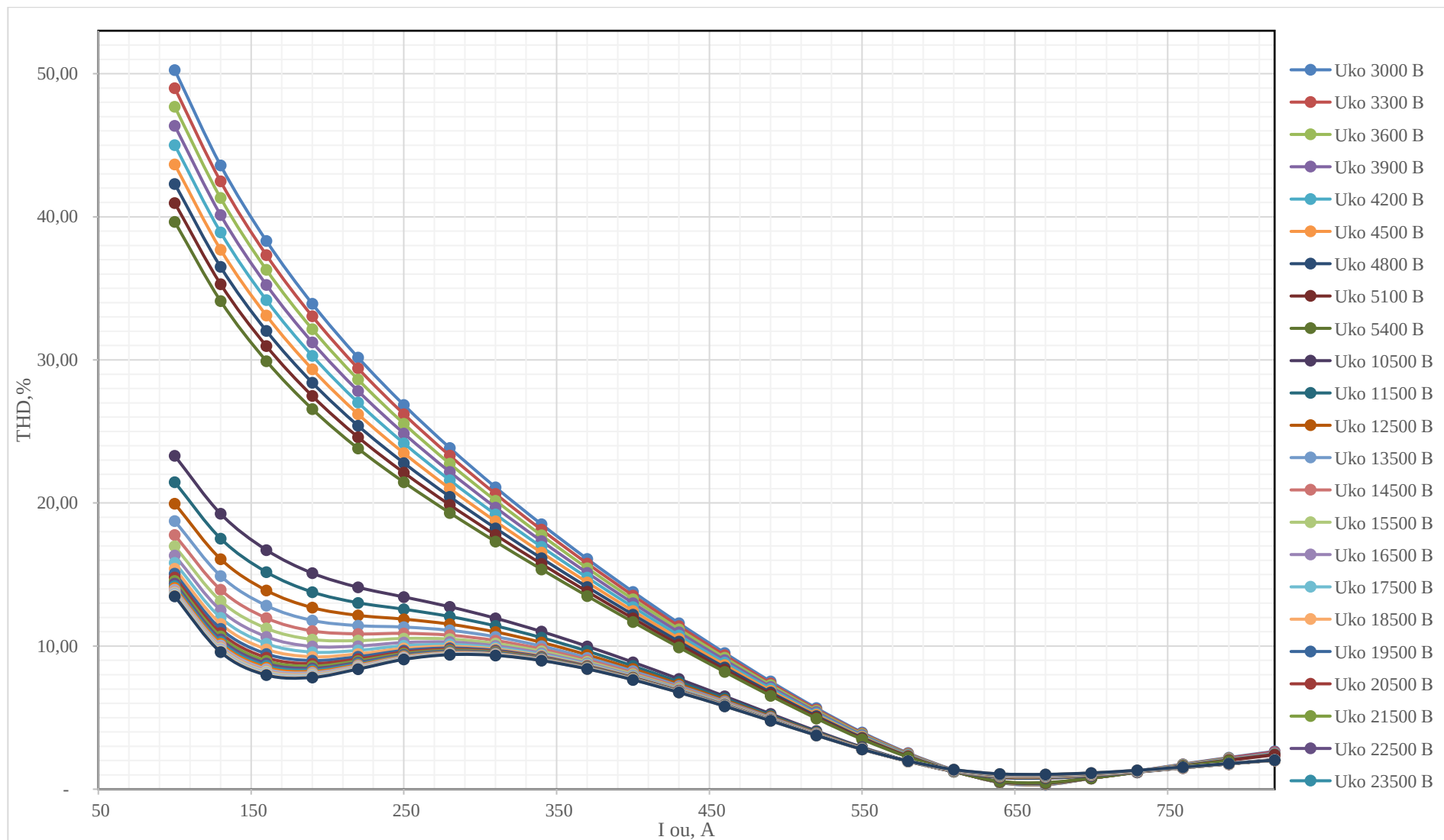


Рисунок Д.25 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

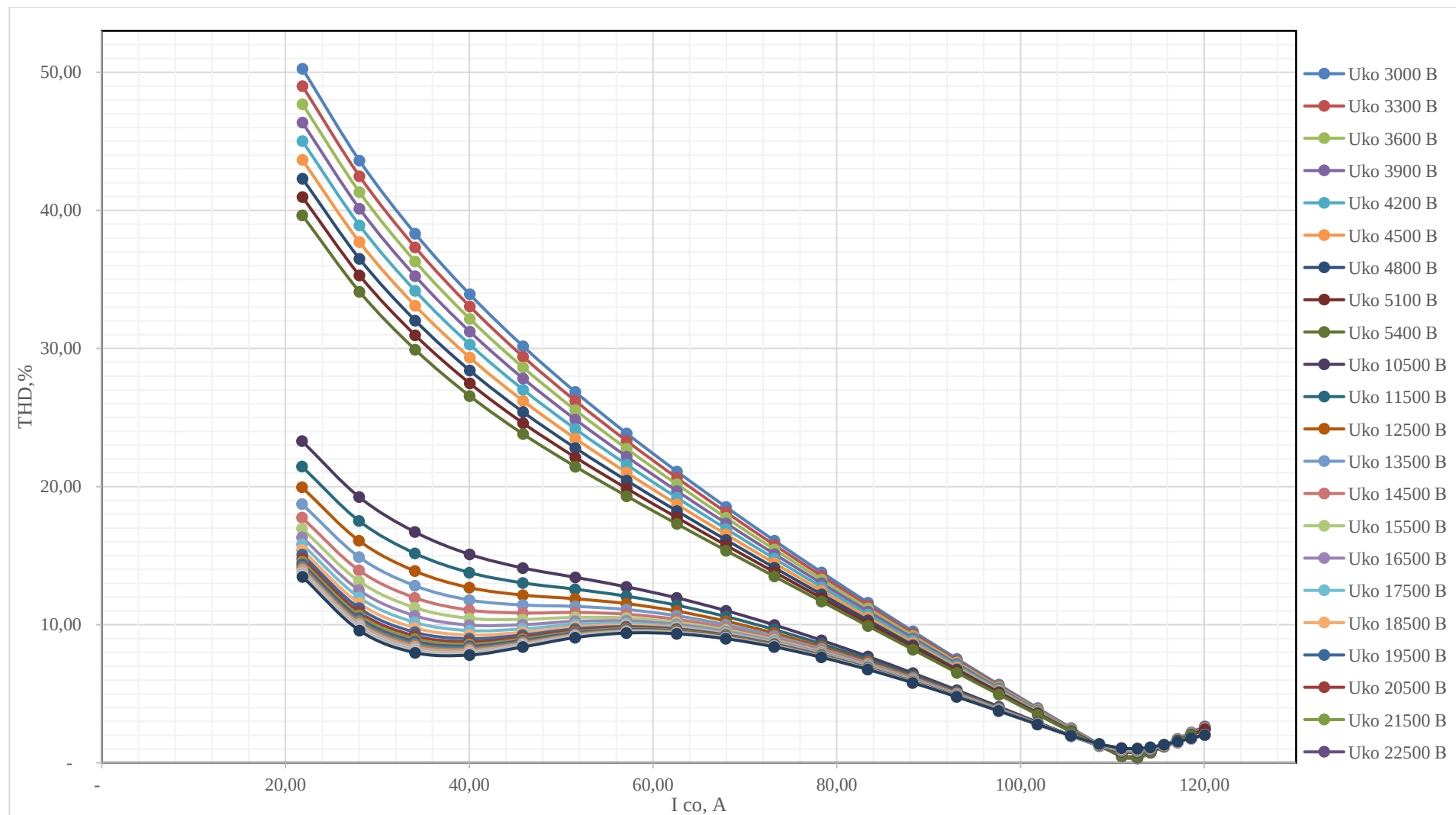


Рисунок Д.26 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

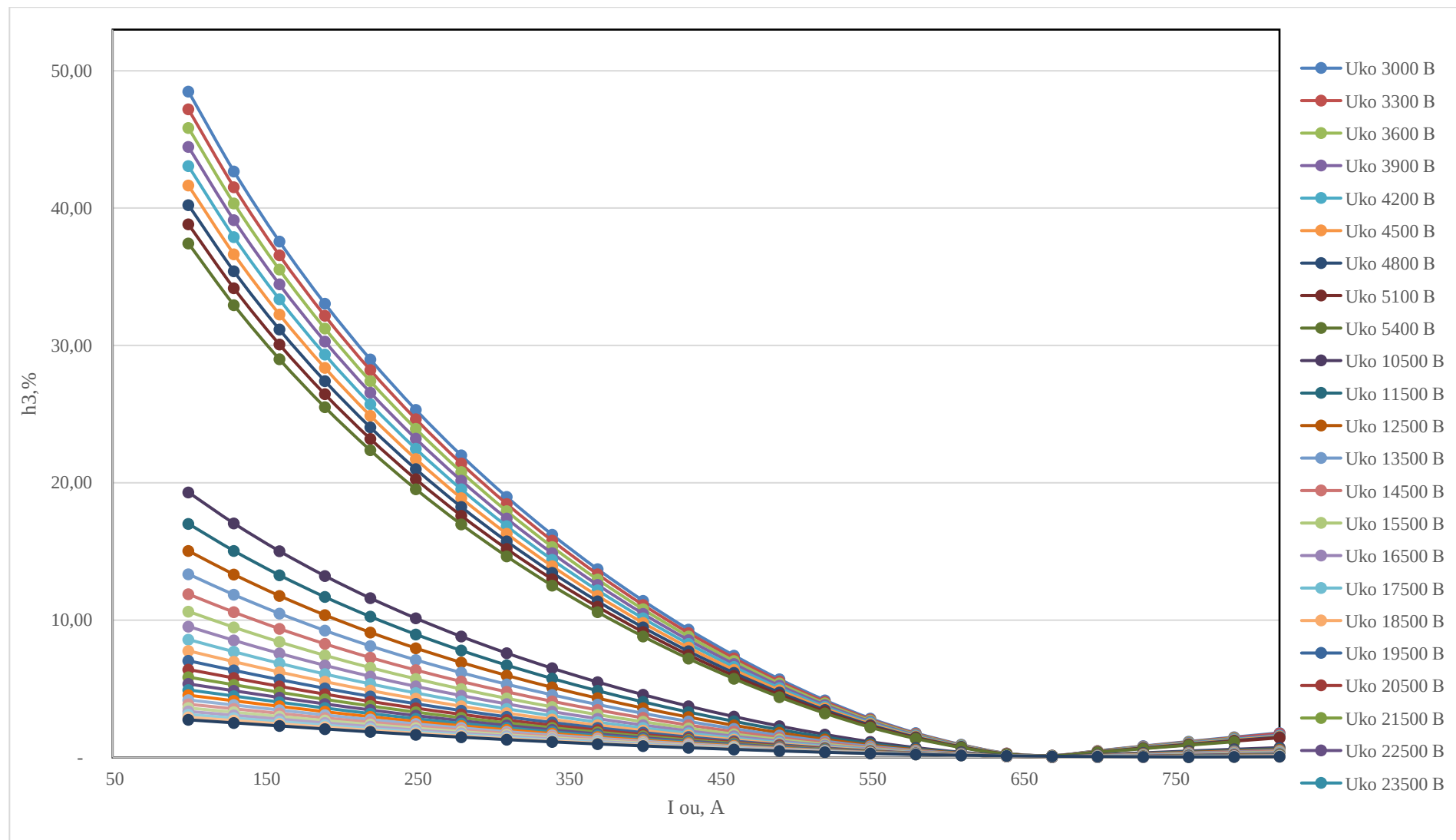


Рисунок Д.27 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

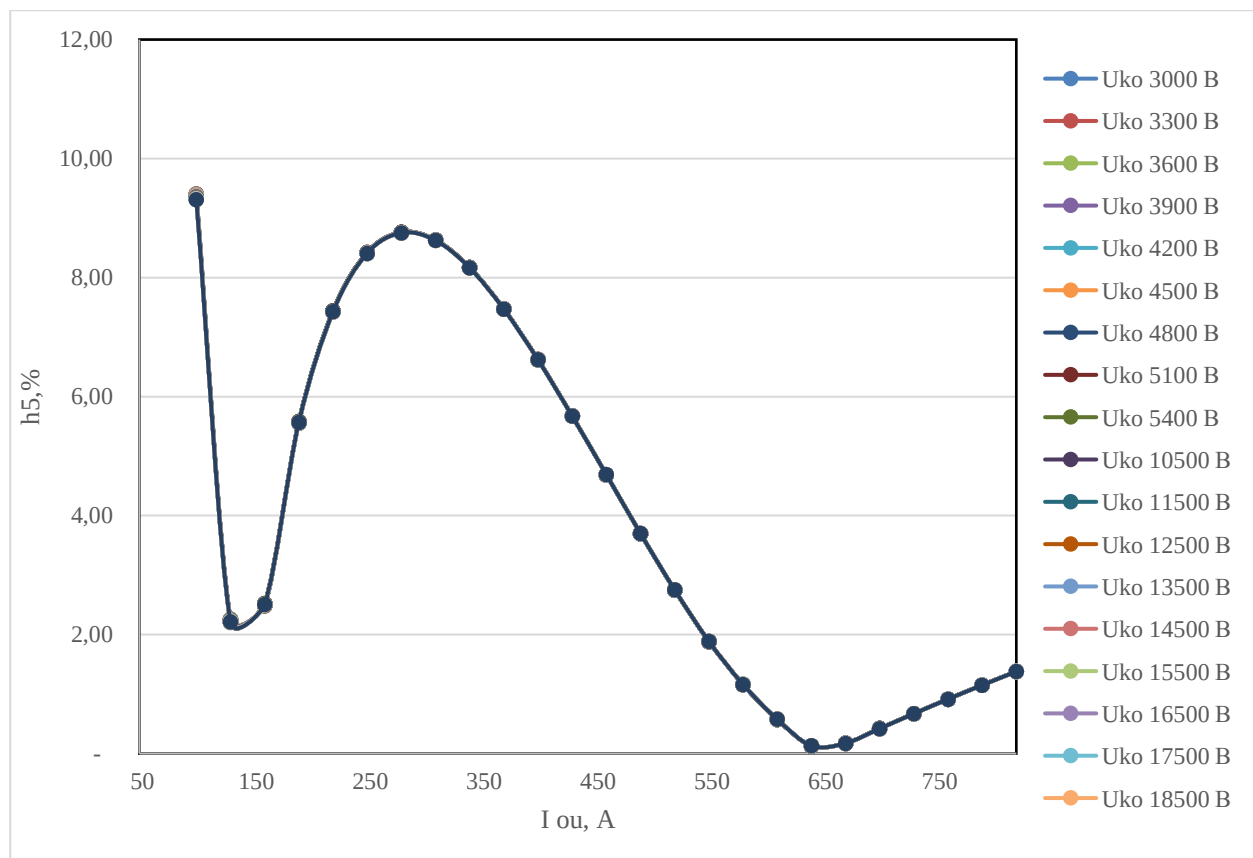


Рисунок Д.28 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

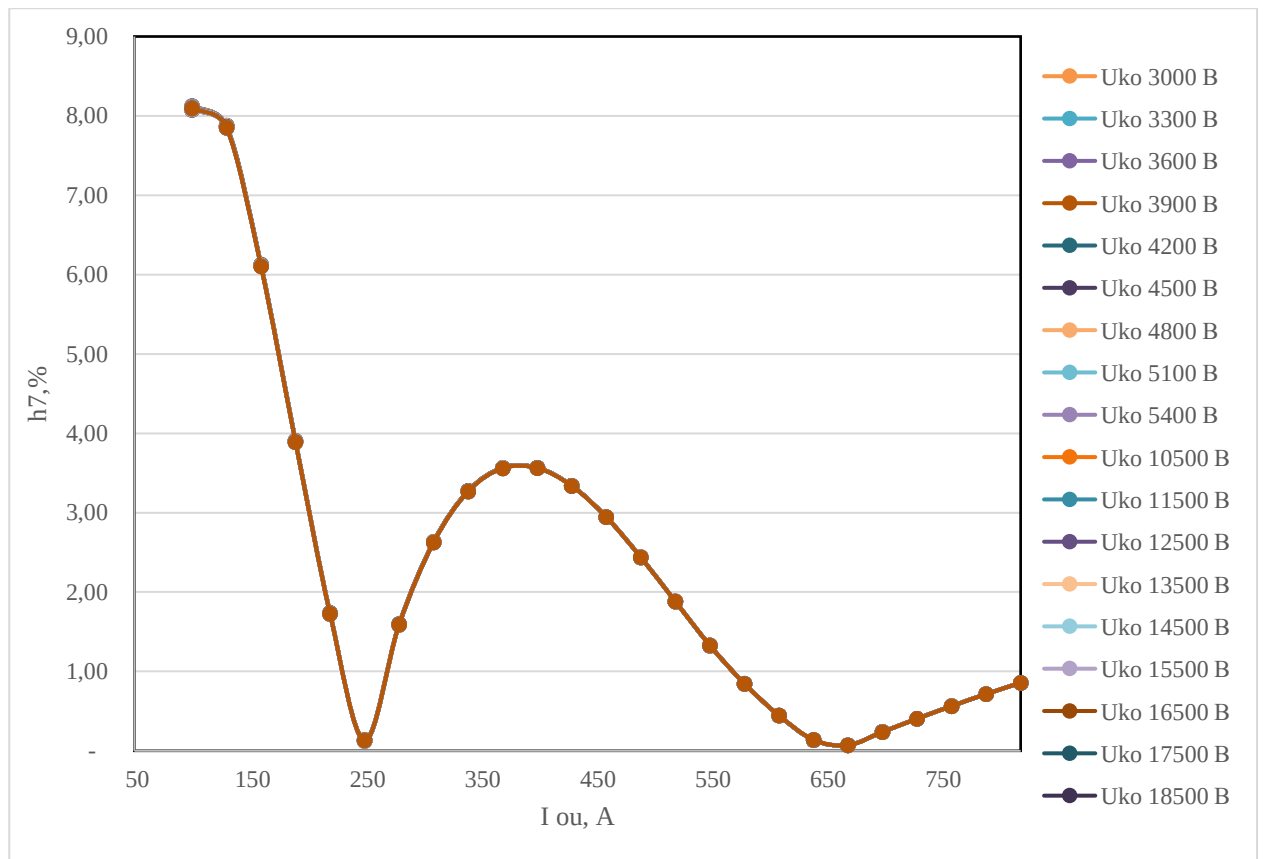


Рисунок Д.29 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$,
 $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

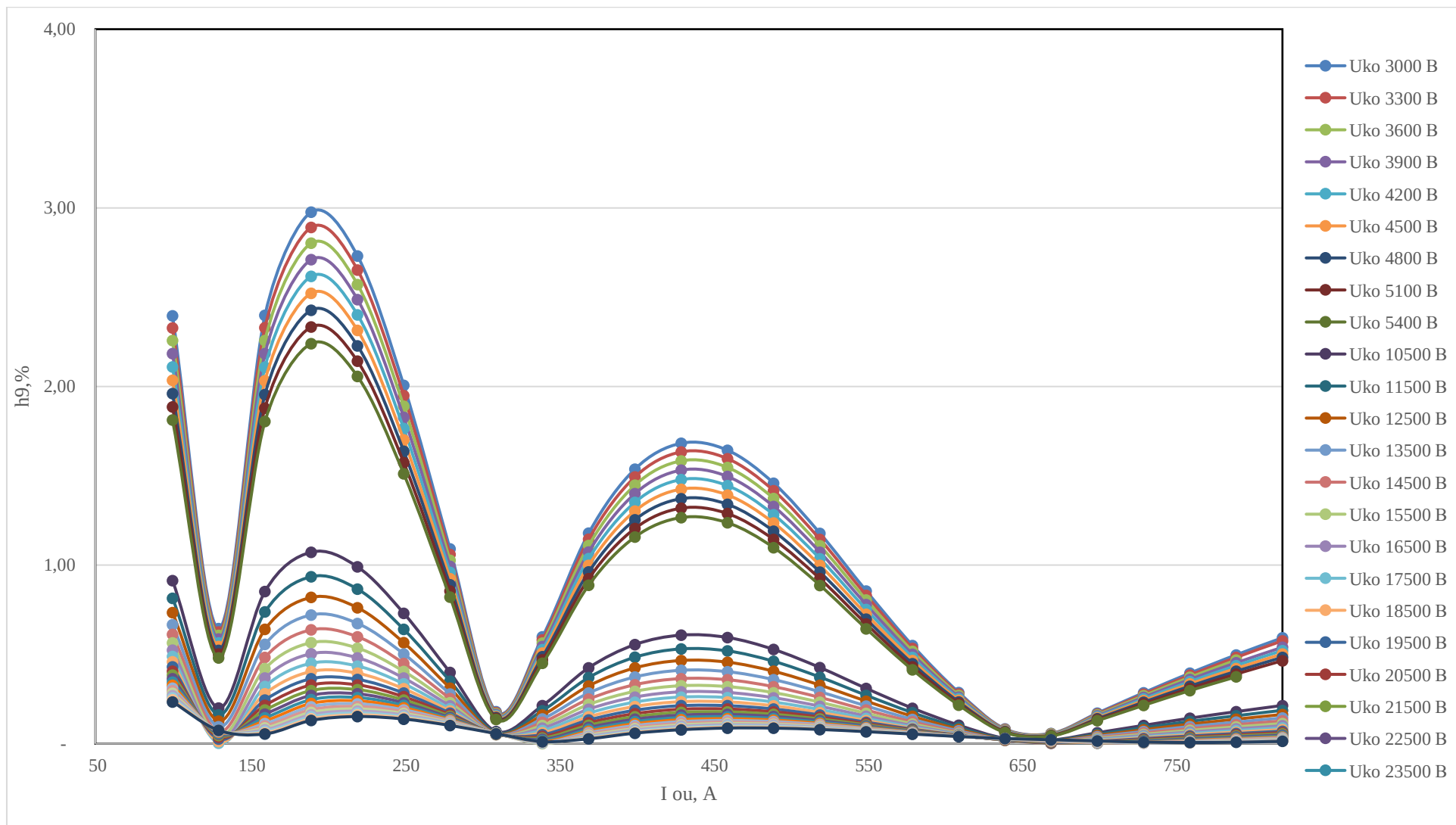


Рисунок Д.30 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

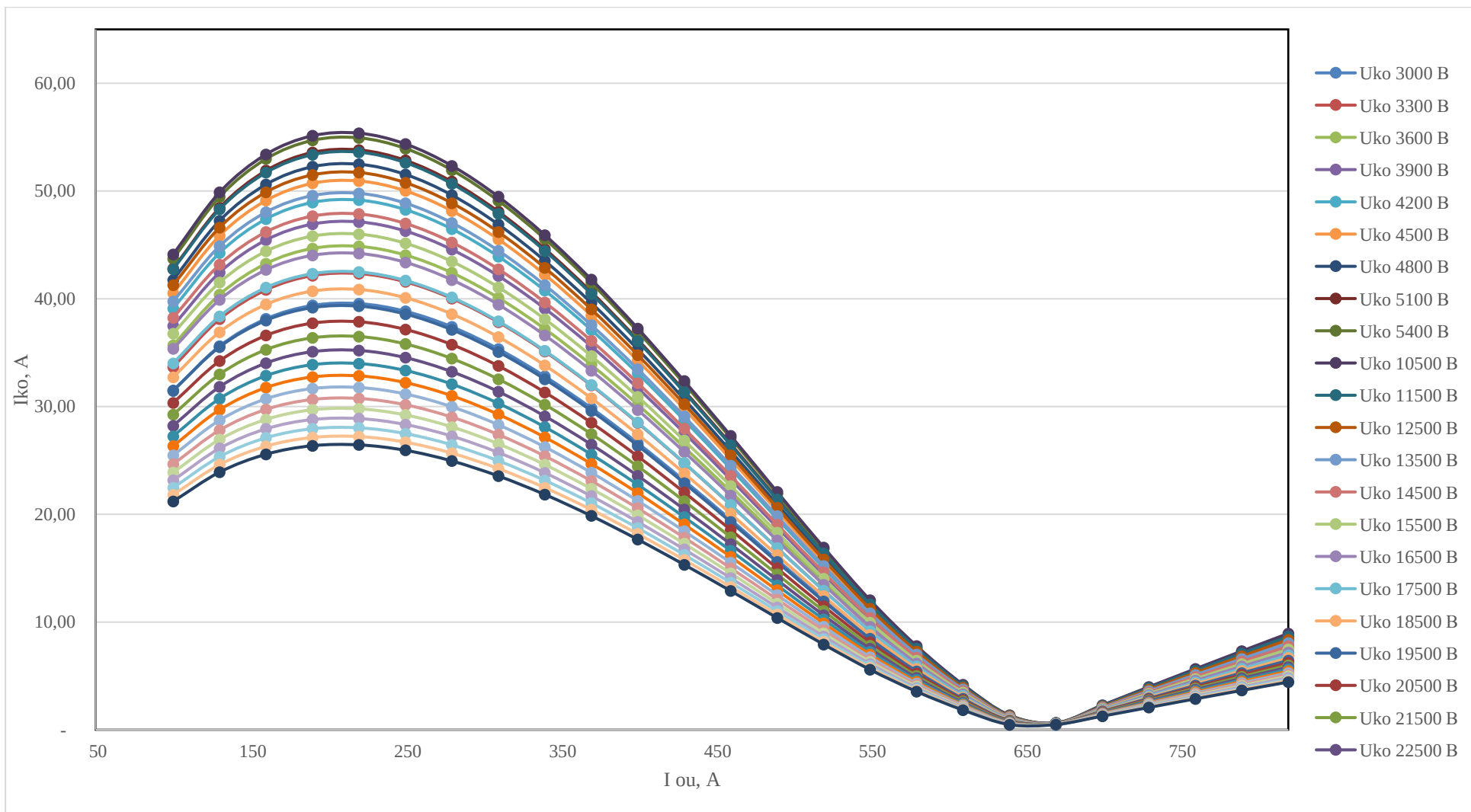


Рисунок Д.31 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

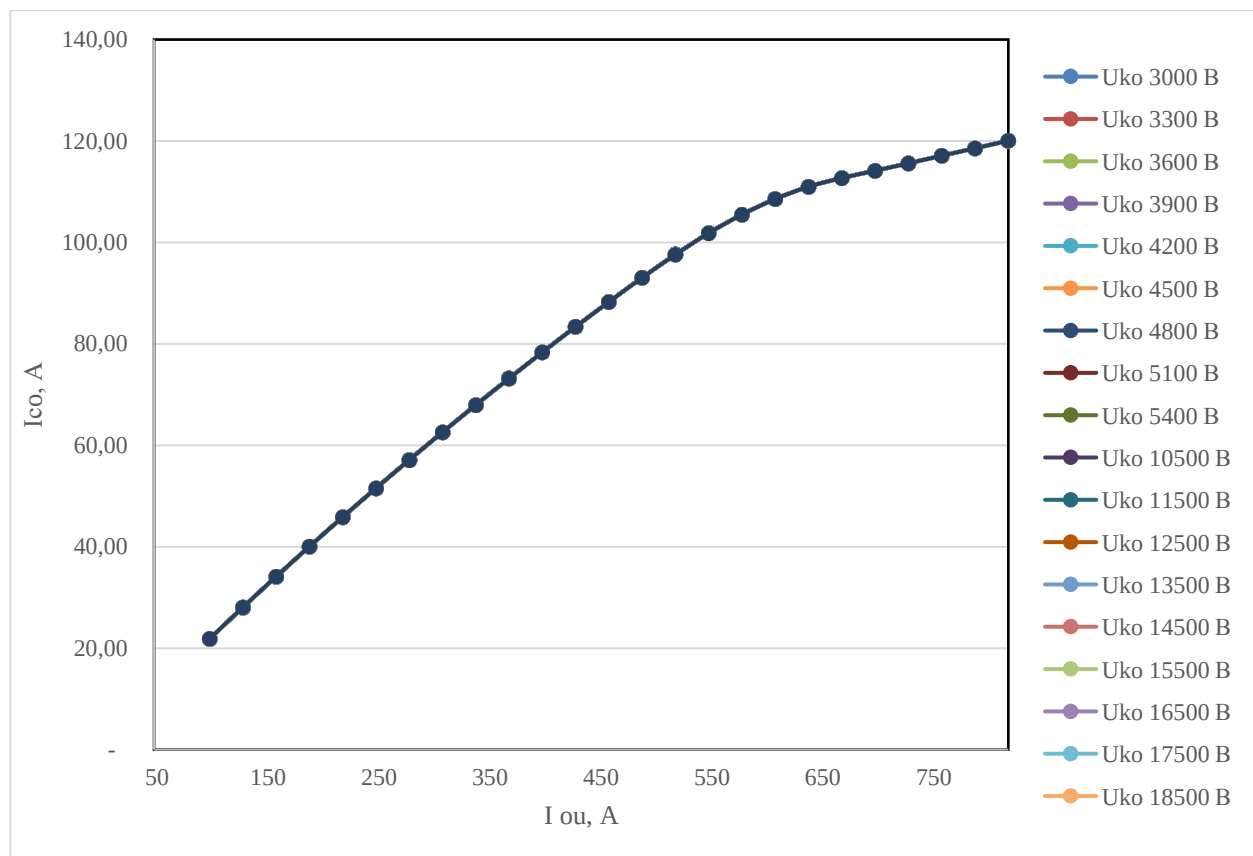


Рисунок Д.32 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,138631 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27172 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ.

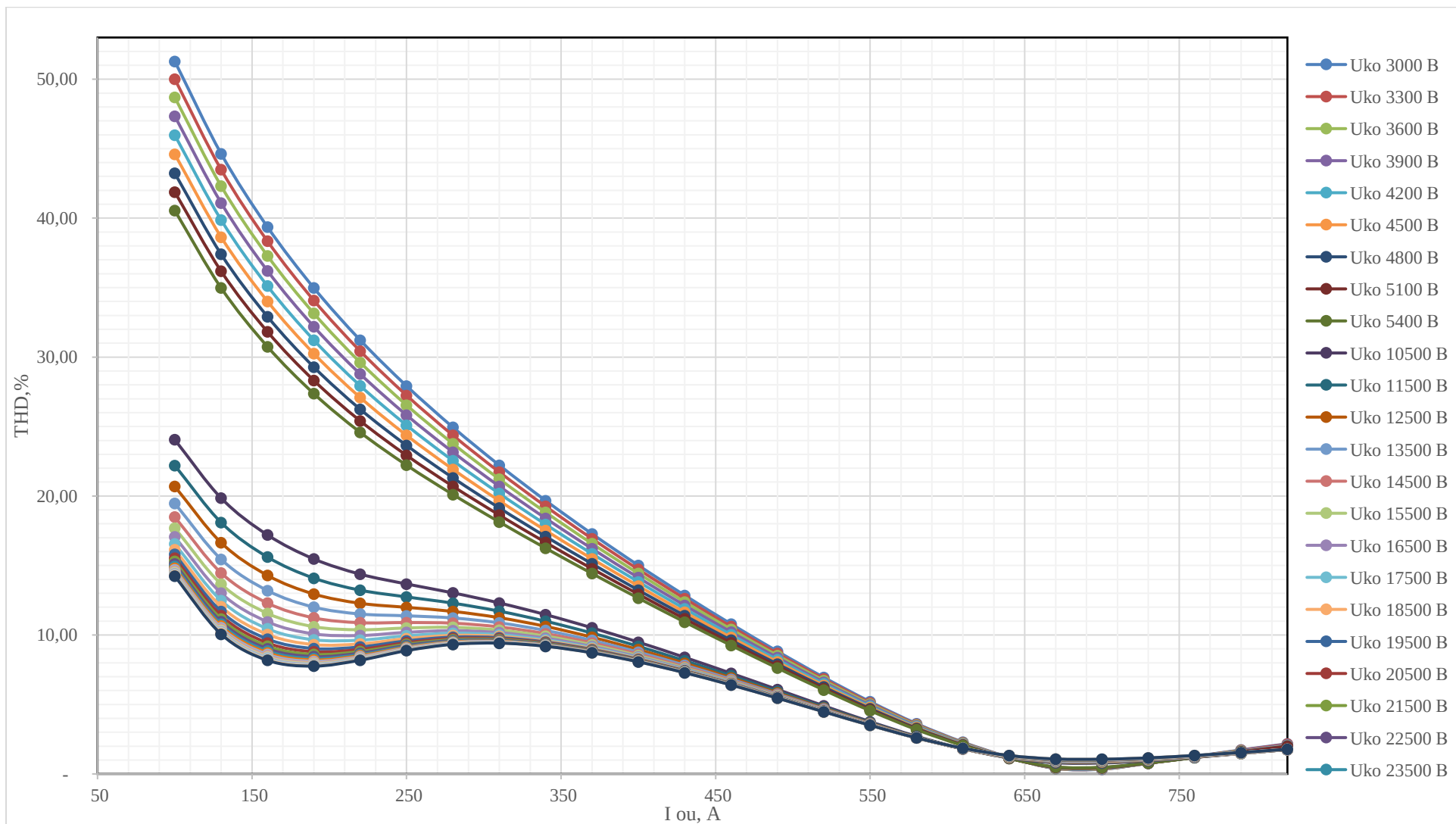


Рисунок Д.33 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$

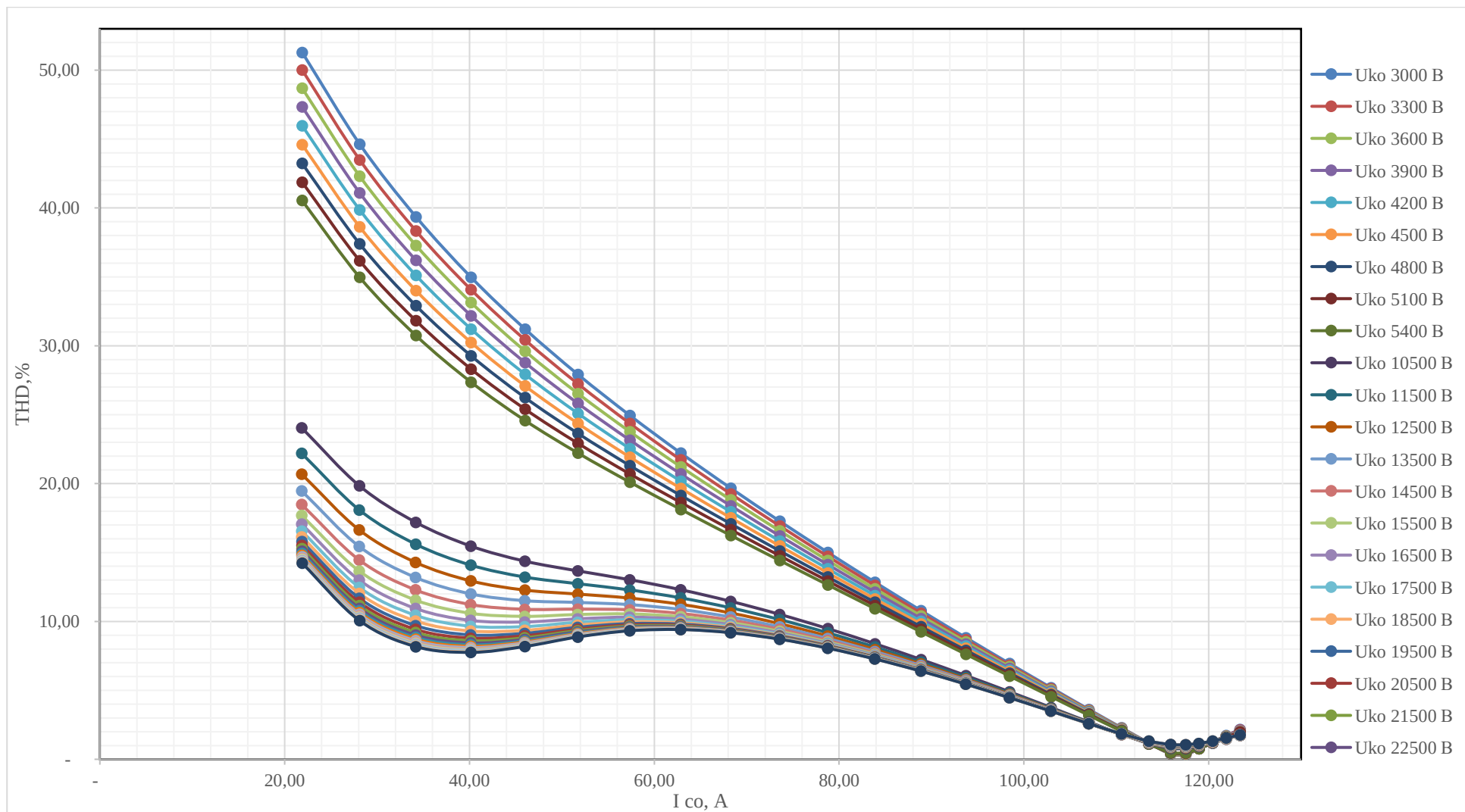


Рисунок Д.34 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$

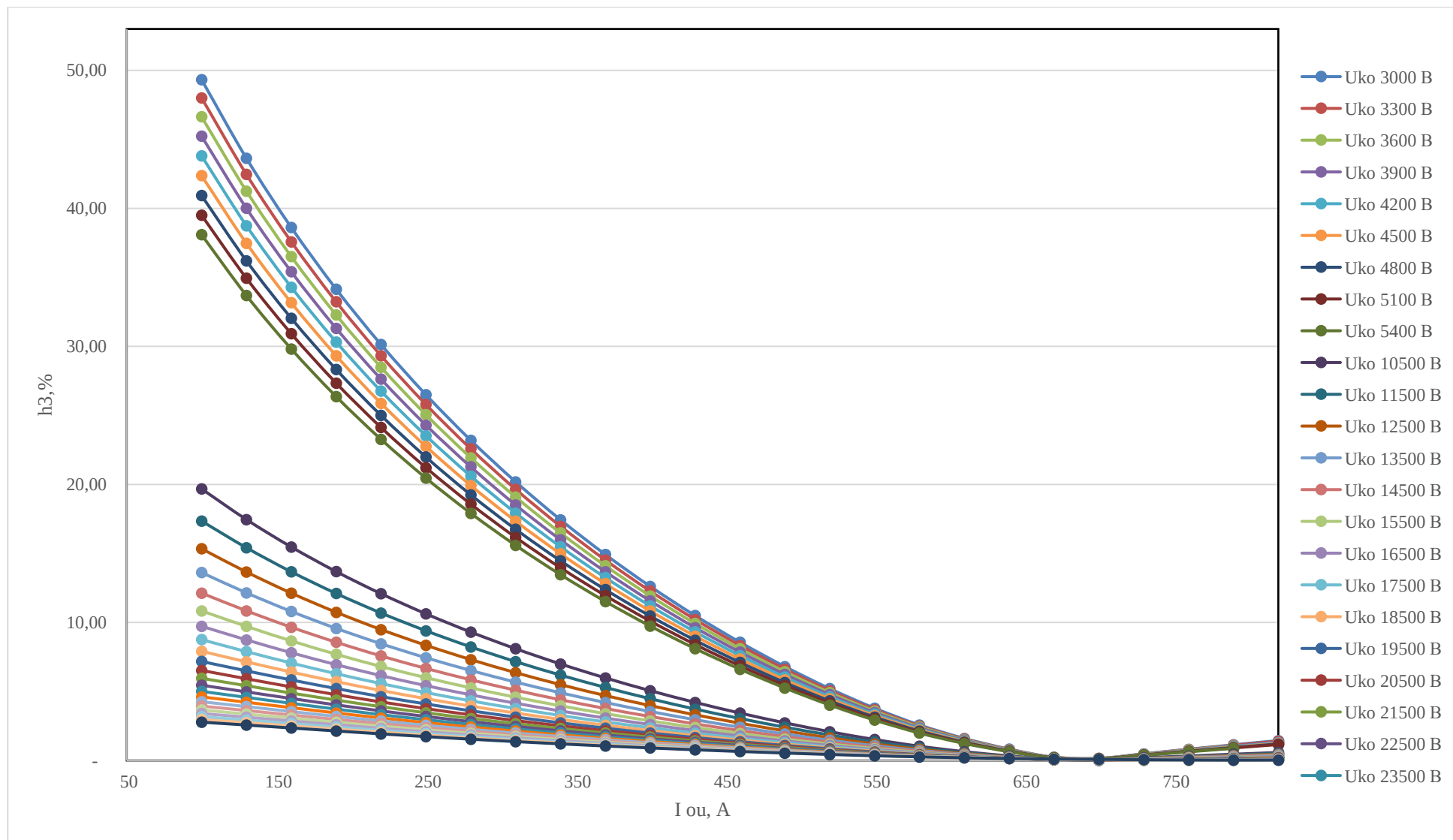


Рисунок Д.35 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$, $S_{стержня} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,28304 \text{ м}^2$

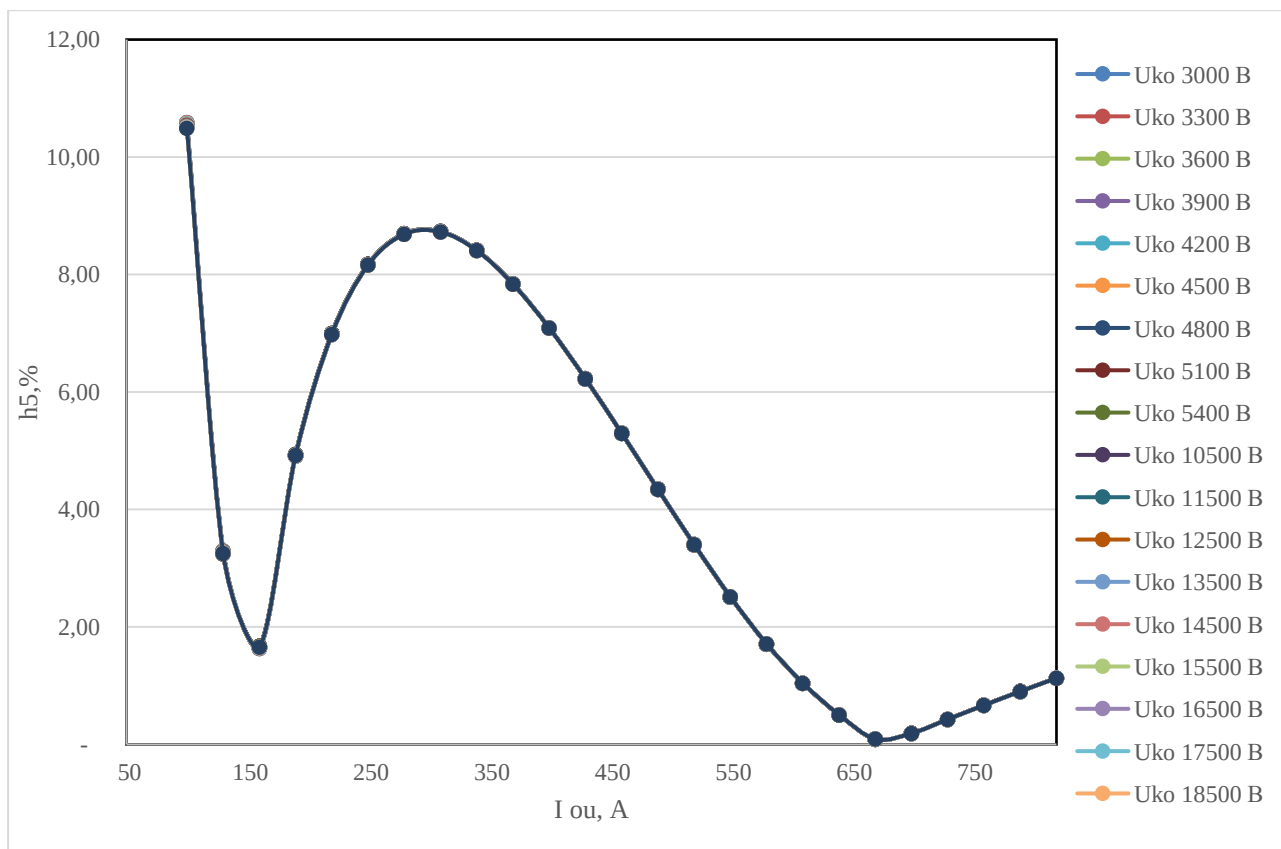


Рисунок Д.36 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$,
 $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$

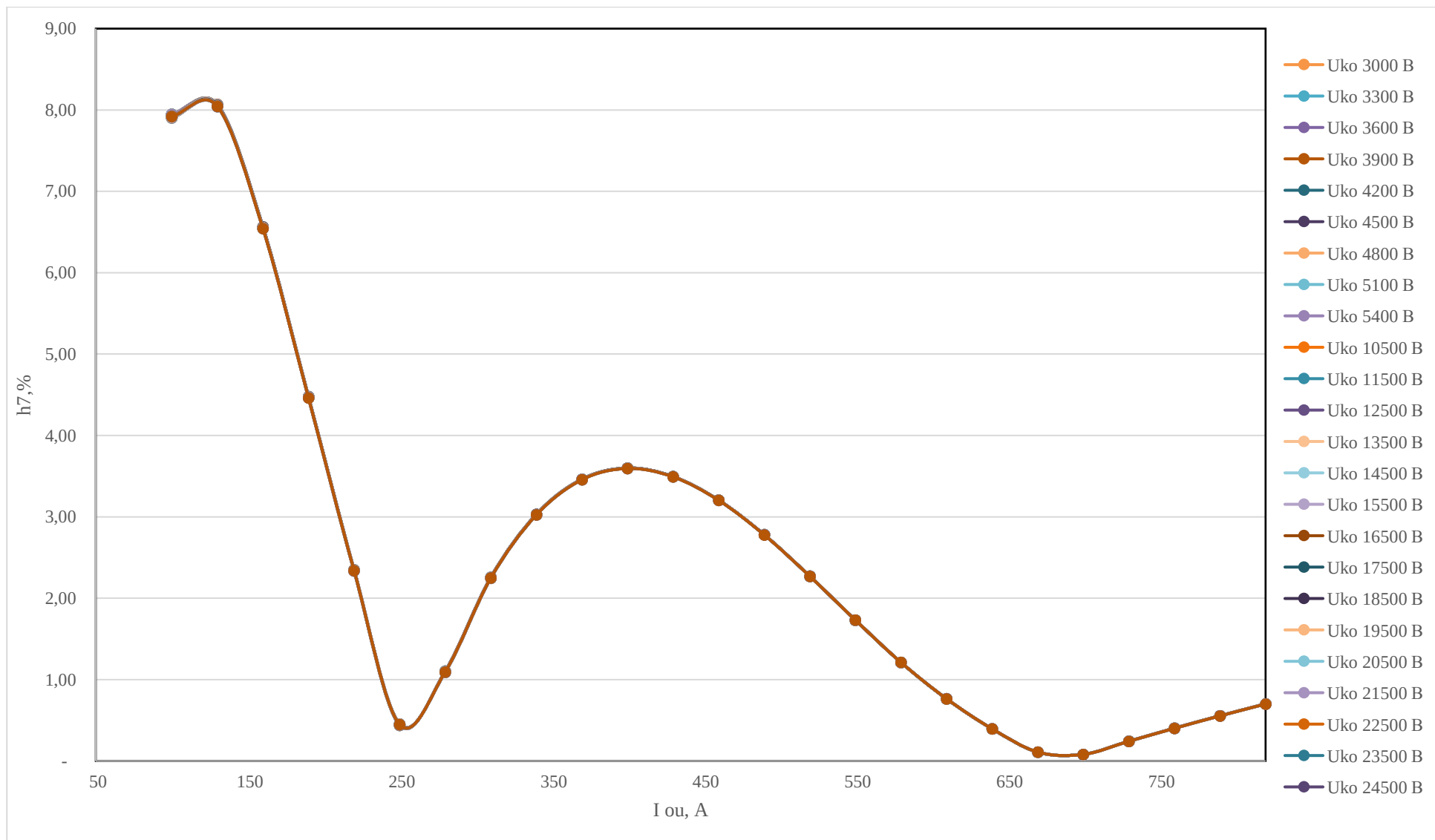


Рисунок Д.37 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{стержня} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,28304 \text{ м}^2$

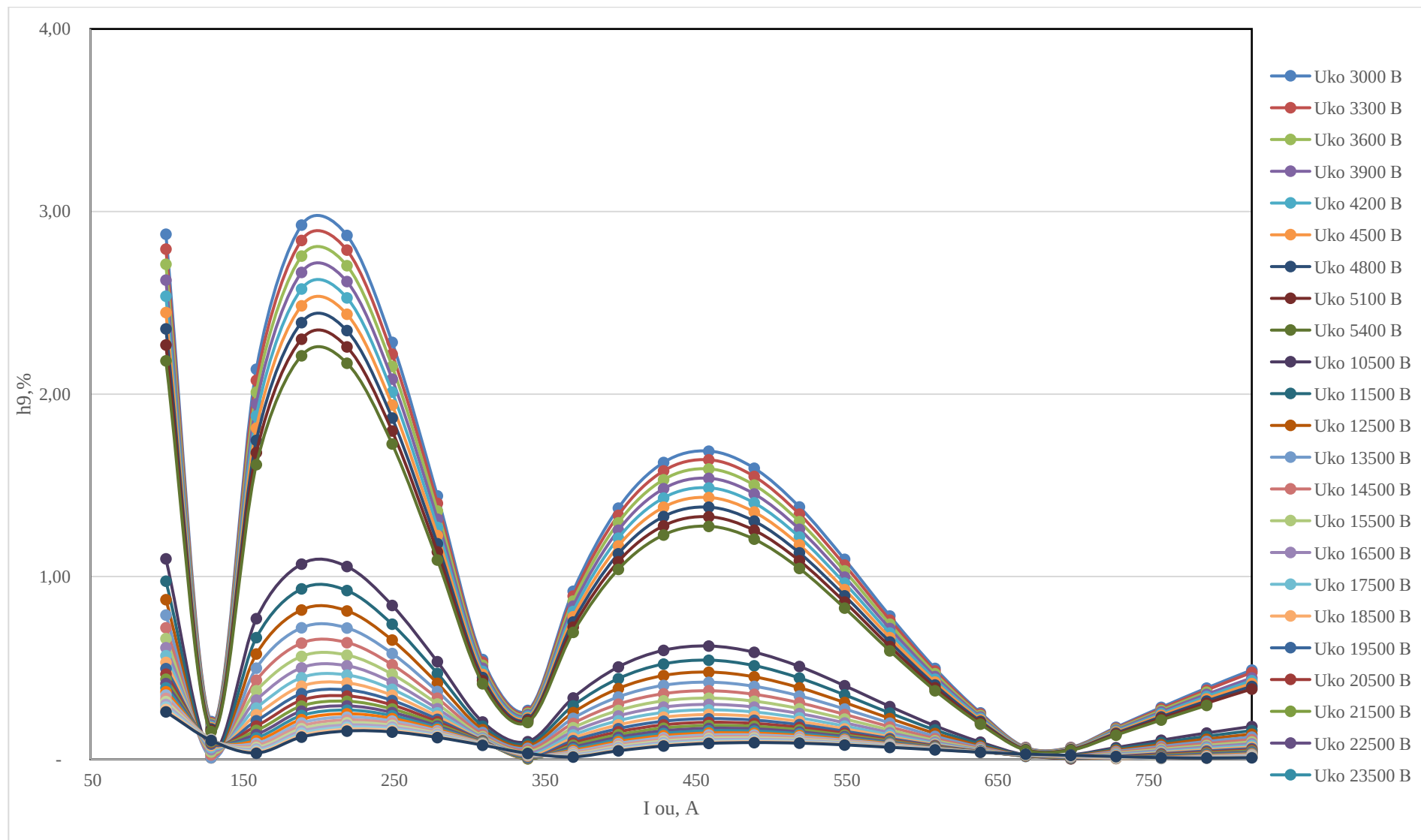


Рисунок Д.38 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$

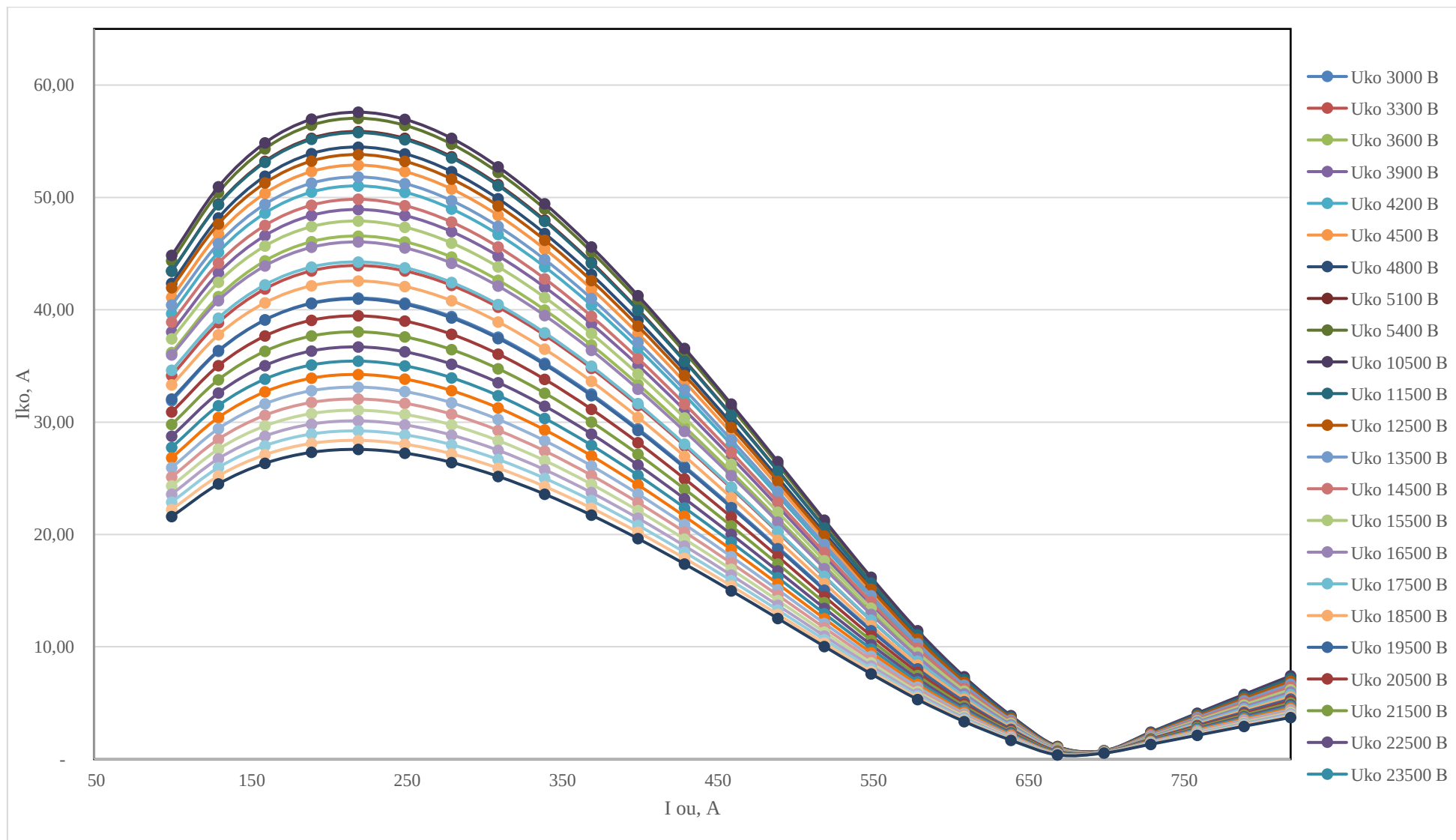


Рисунок Д.39 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$, $S_{стержня} = 0,144408 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,28304 \text{ м}^2$

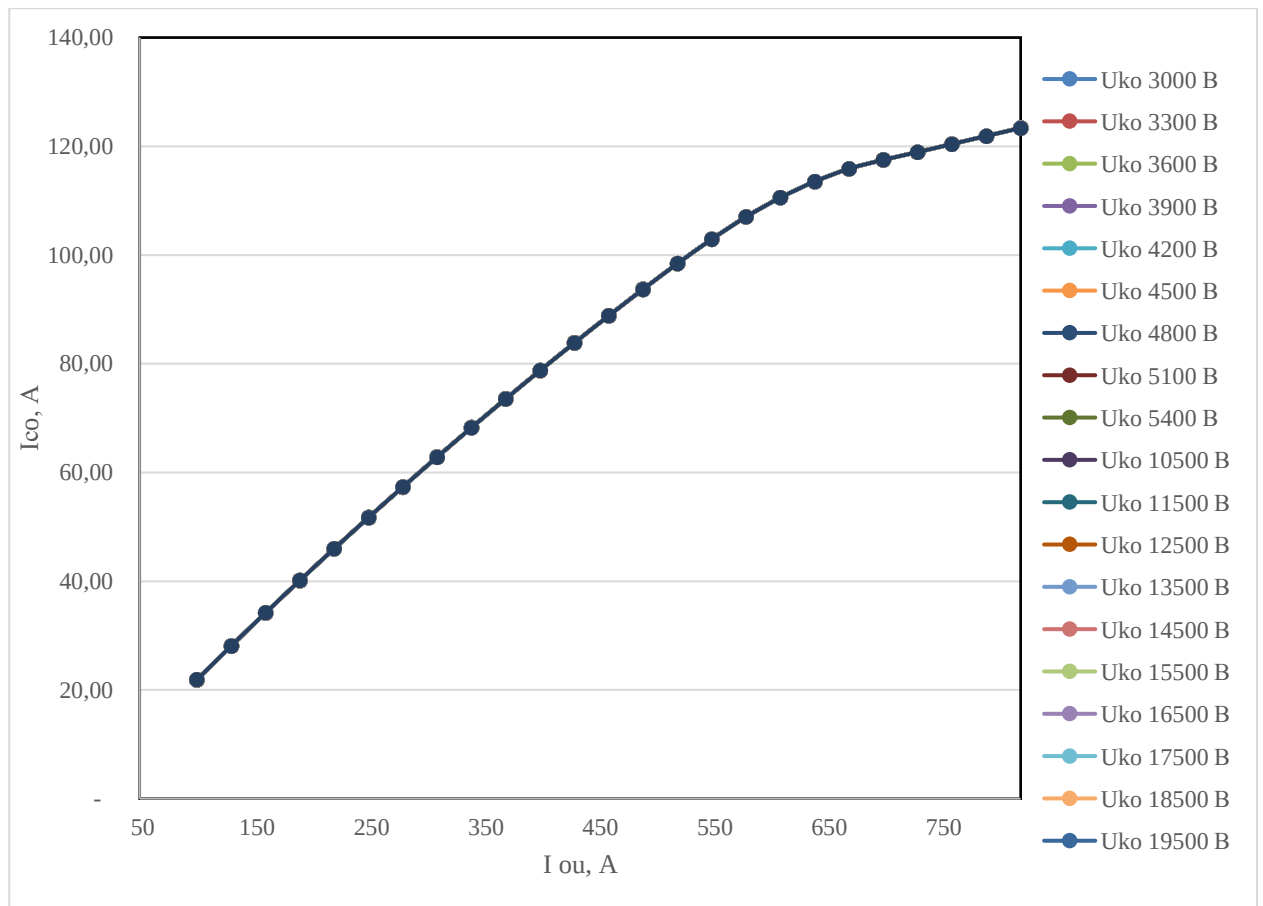


Рисунок Д.40 - График изменения тока сетевой обмотки $I_{ко}$ $S_{\text{стержня}} = 0,144408 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} = 0,28304 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3 кВ – 5,4 кВ, 10,5 кВ – 31,5 кВ.

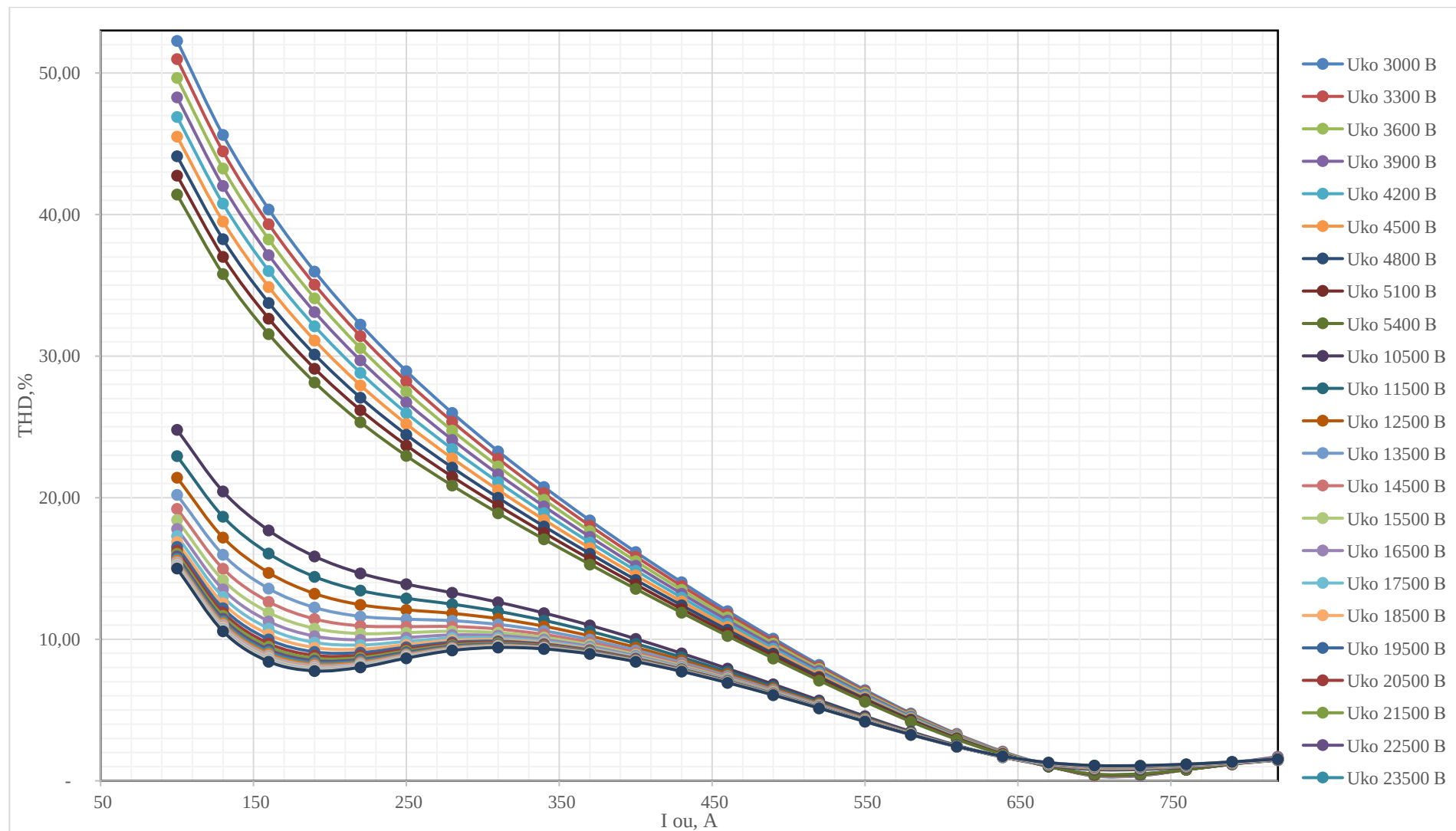


Рисунок Д.41 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

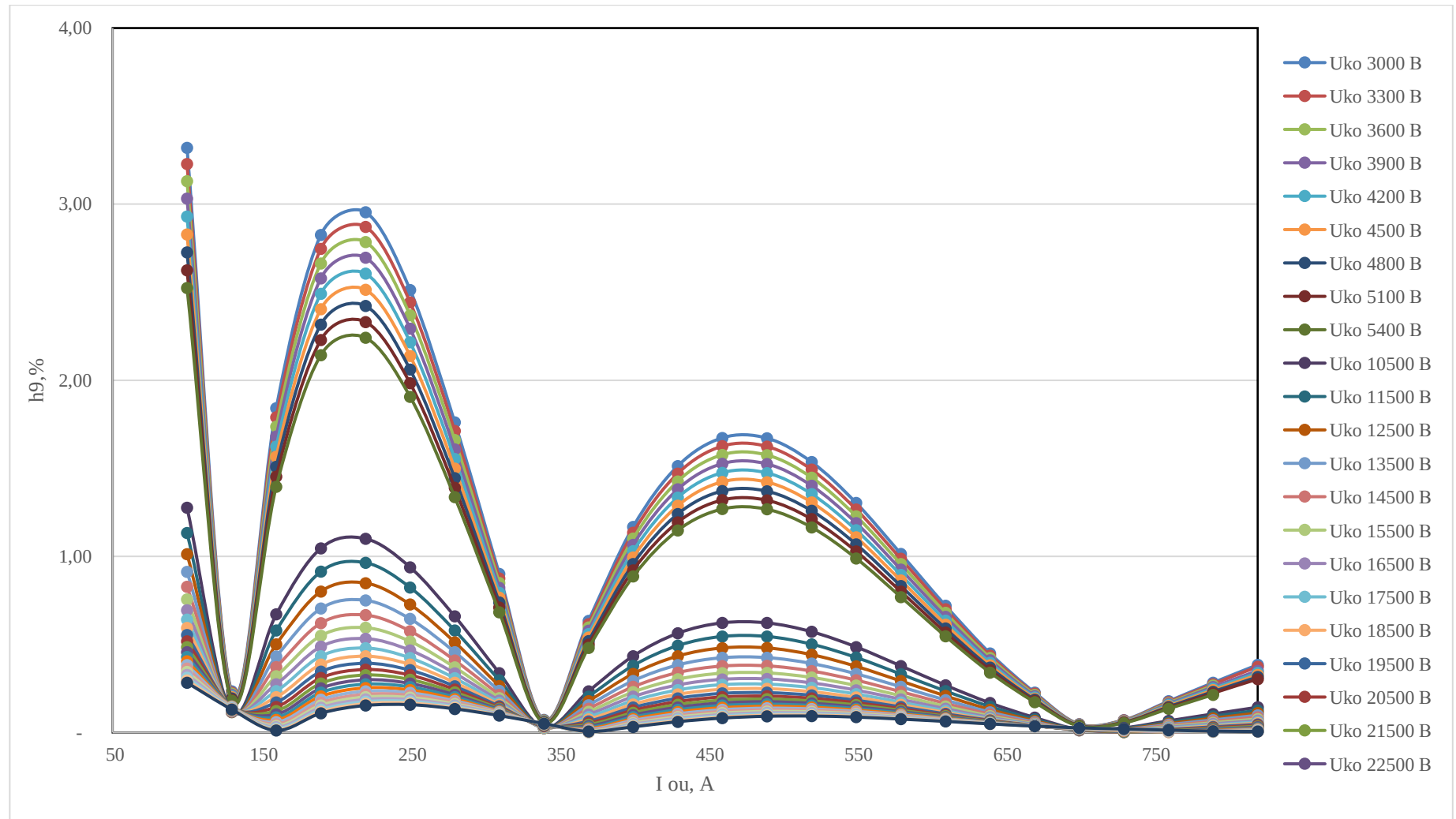


Рисунок Д.42 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

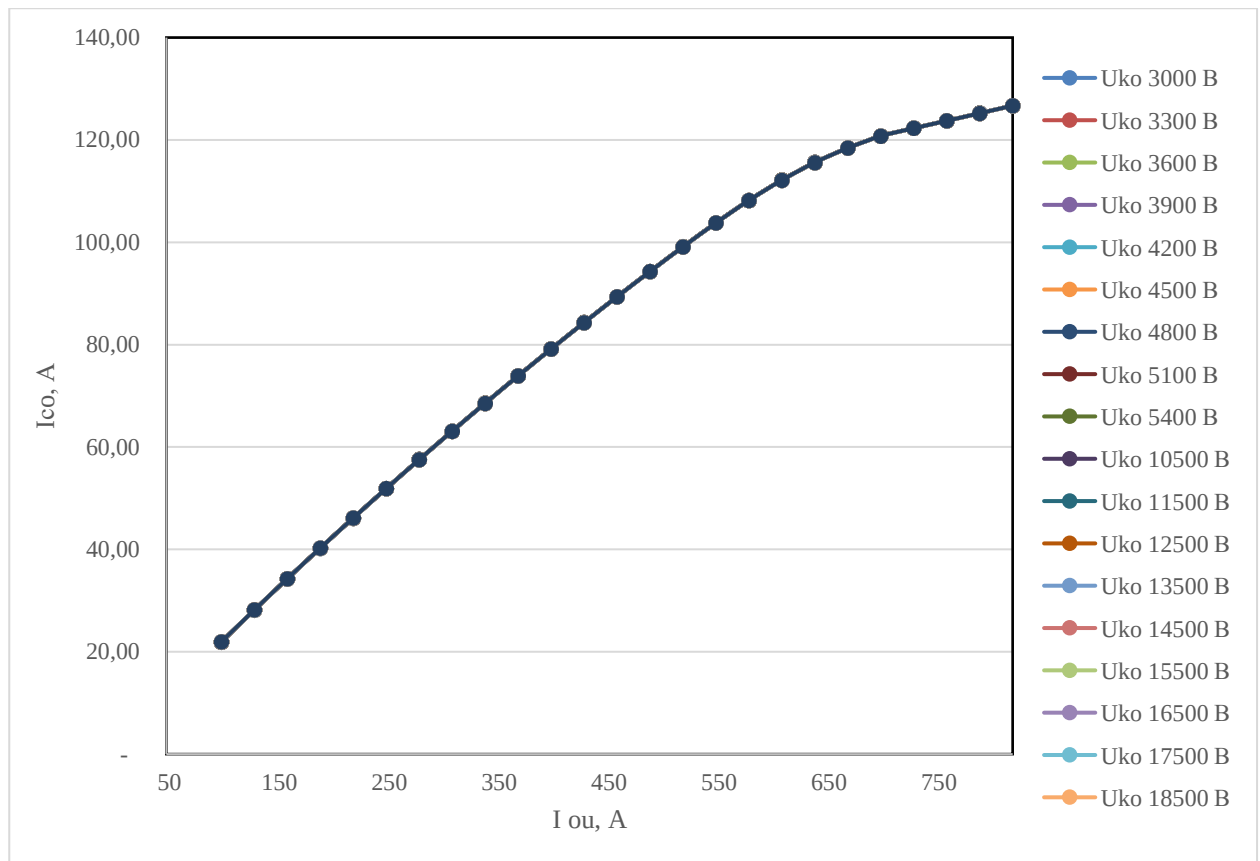


Рисунок Д.43 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,29436 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 10,5 кВ – 31,5 кВ.

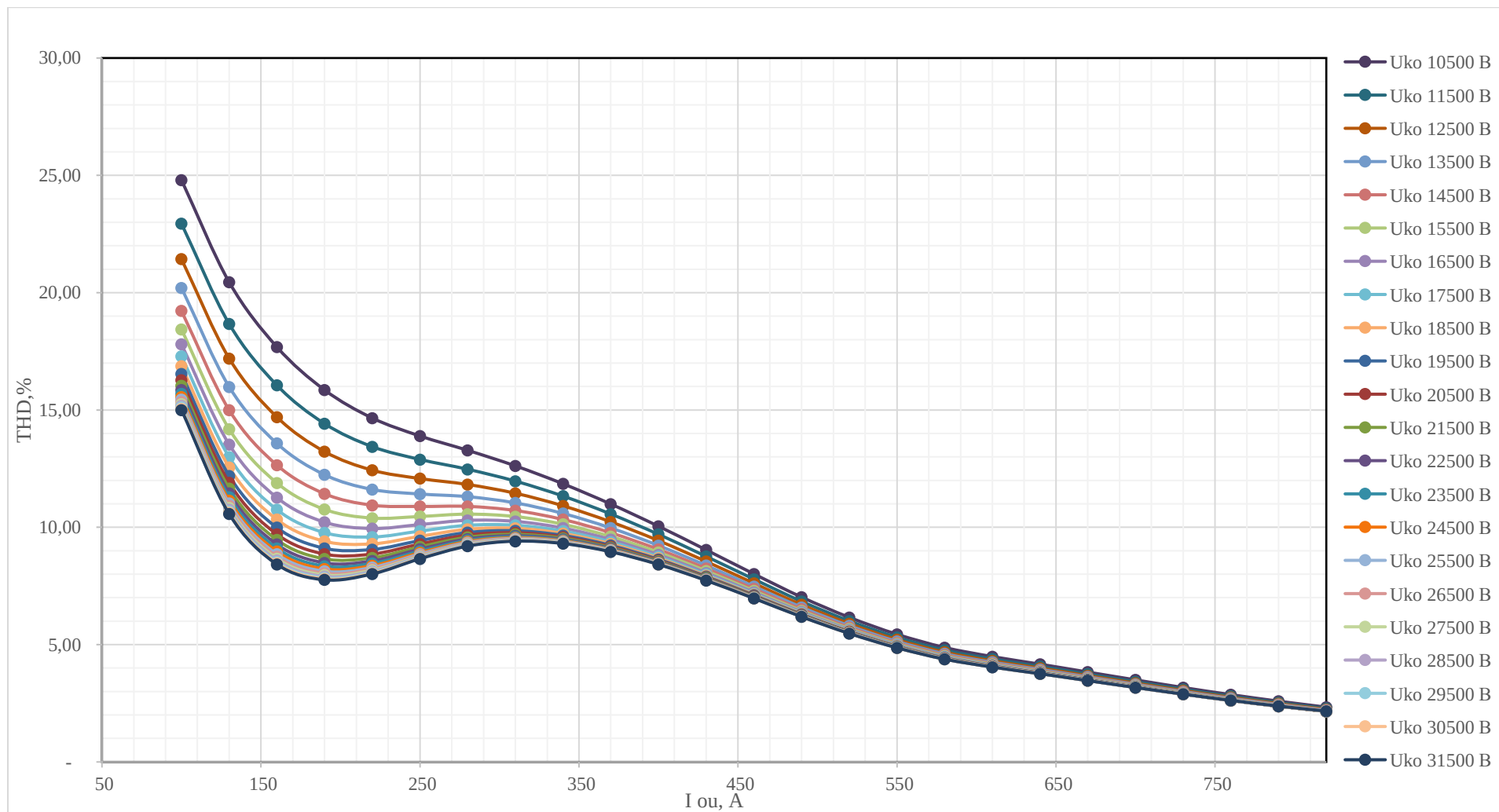


Рисунок Д.44 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

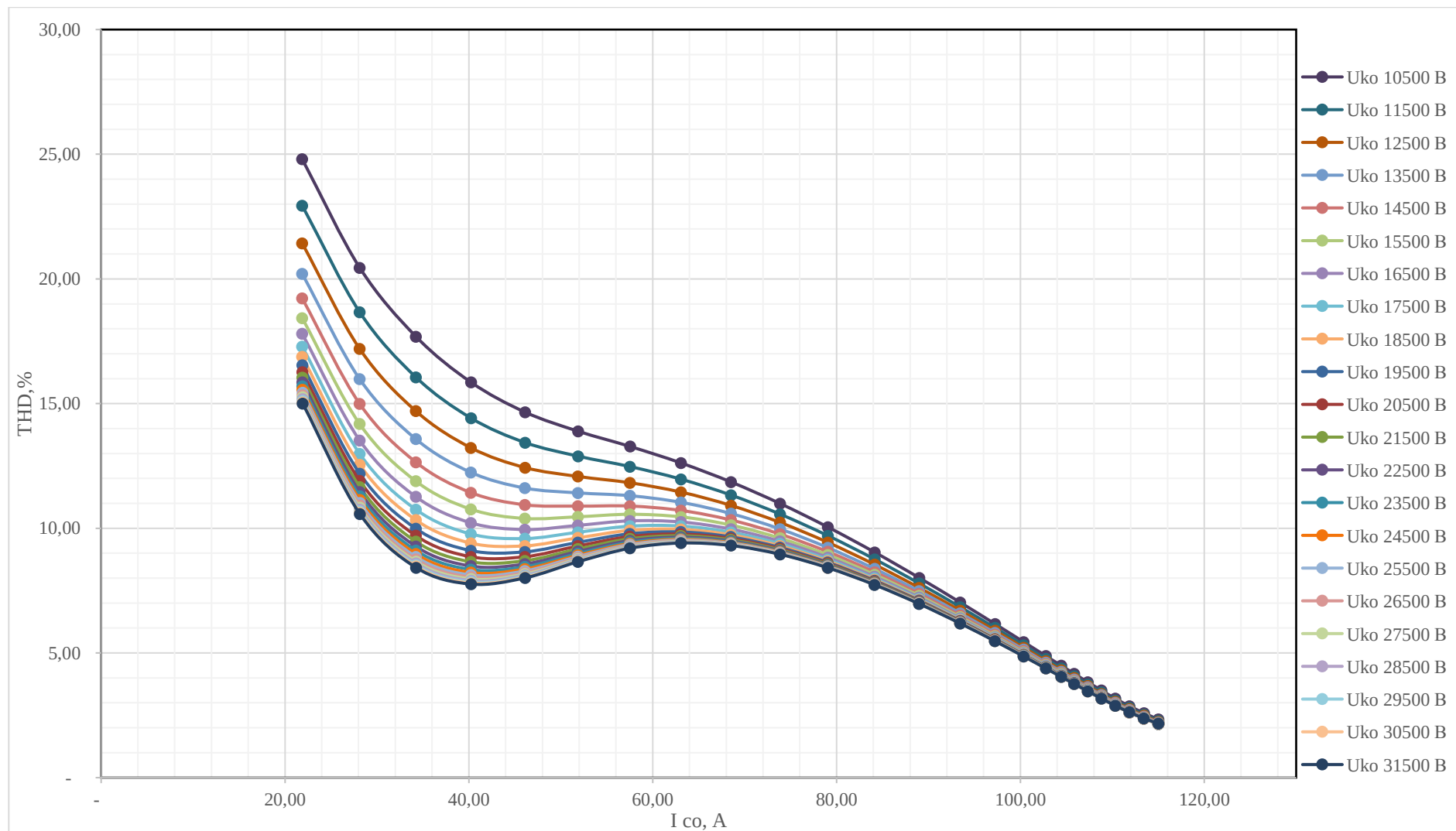


Рисунок Д.45 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

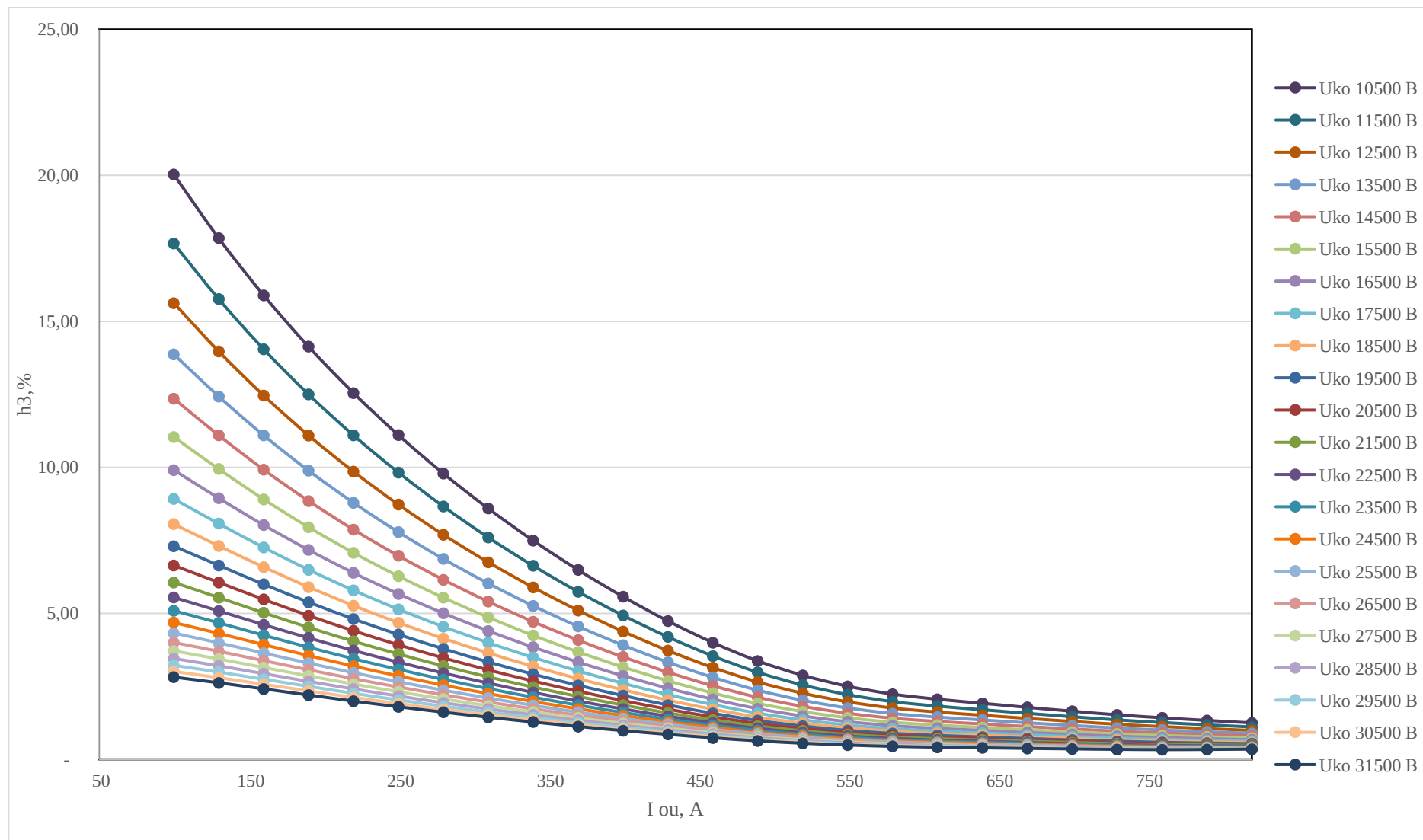


Рисунок Д.46 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

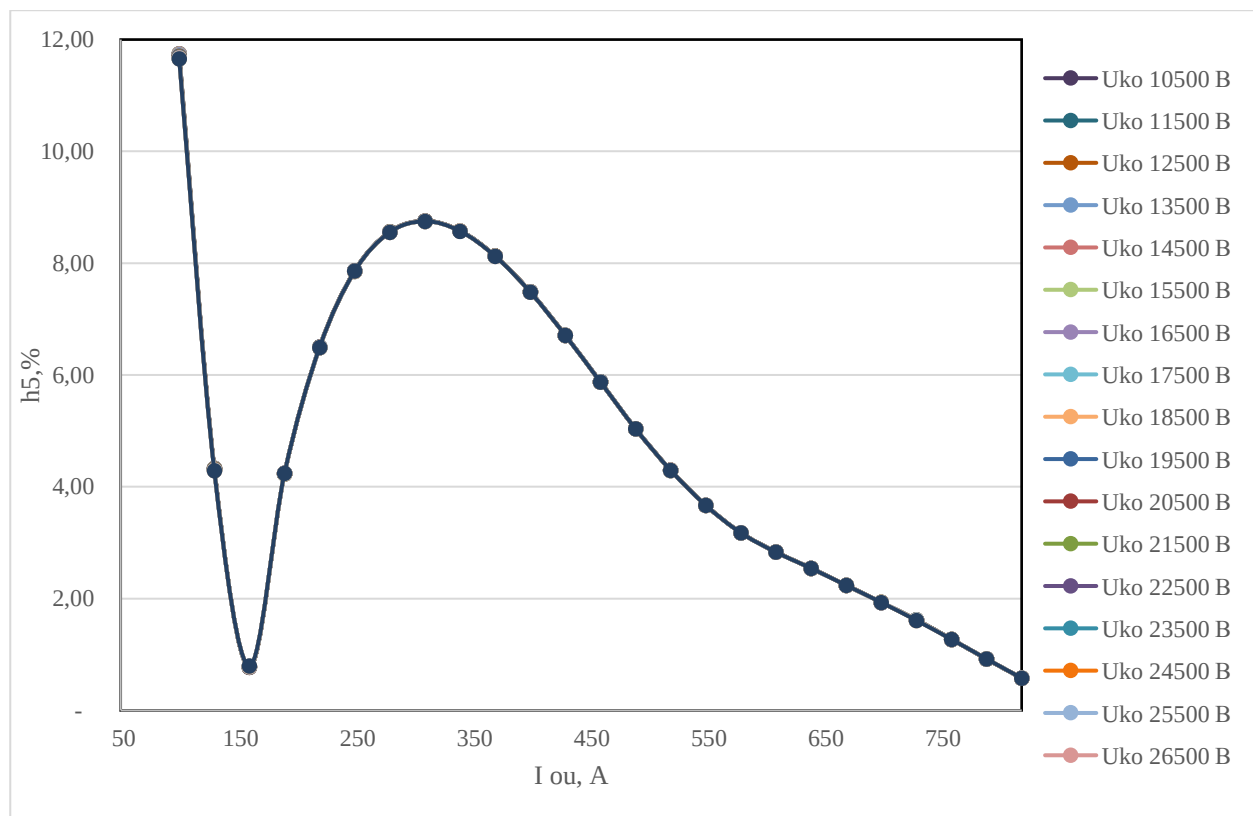


Рисунок Д.47 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{стержня} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,26432 \text{ м}^2$

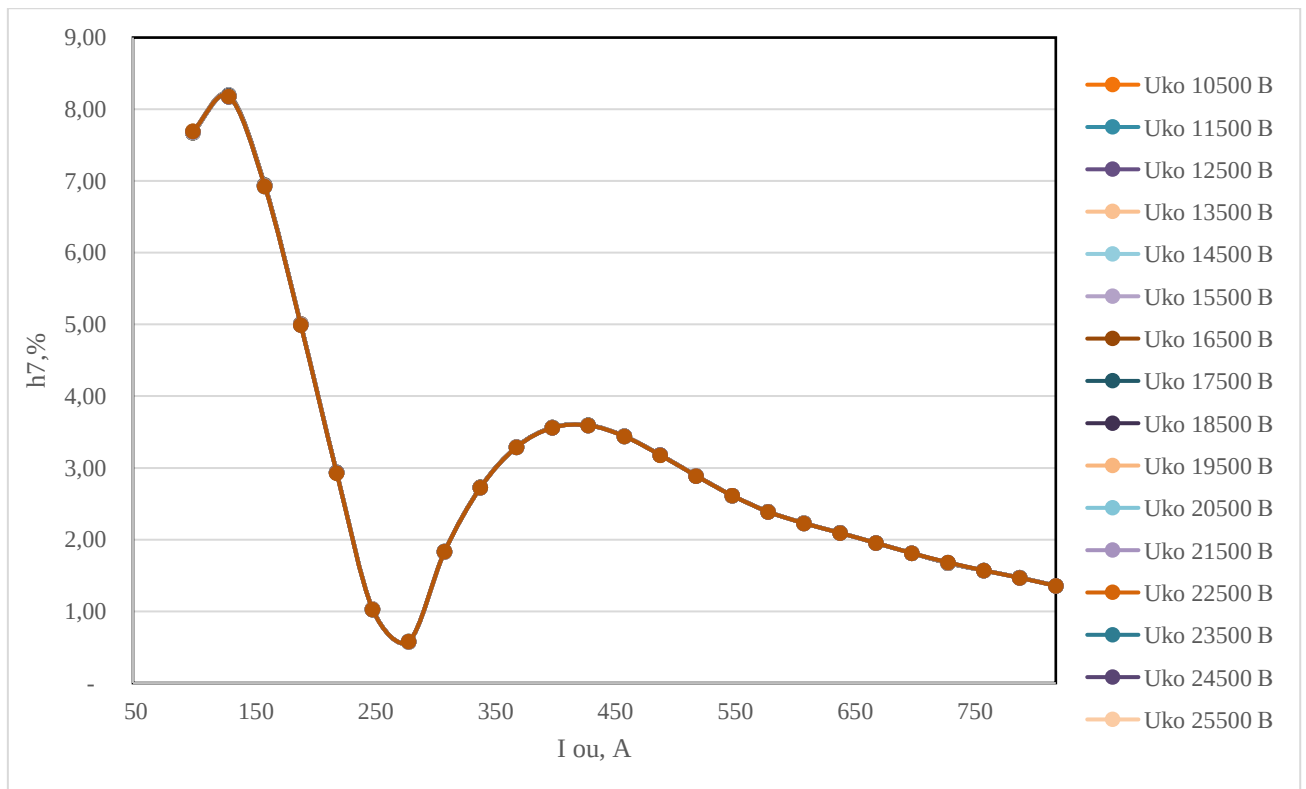


Рисунок Д.48 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

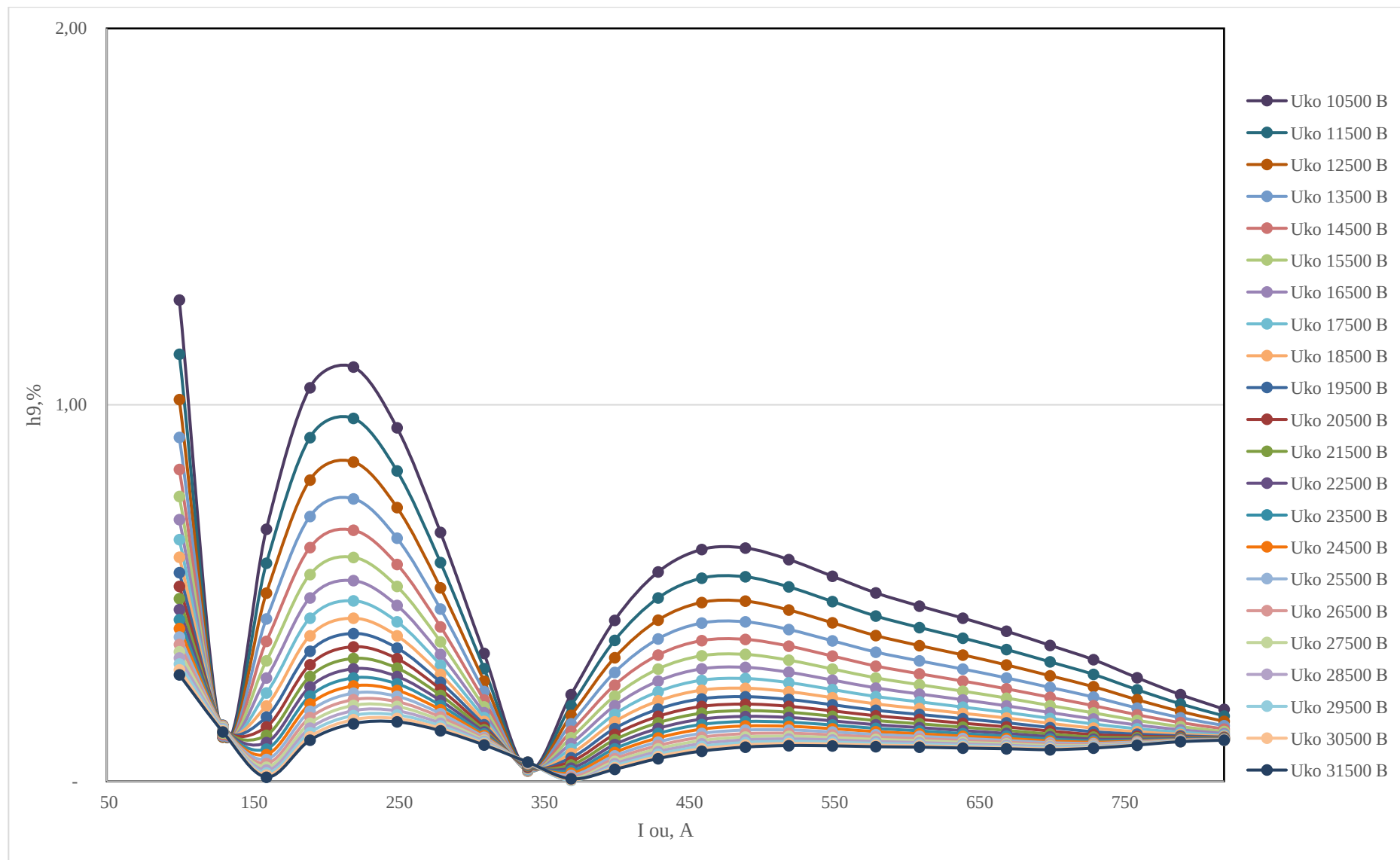


Рисунок Д.49 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

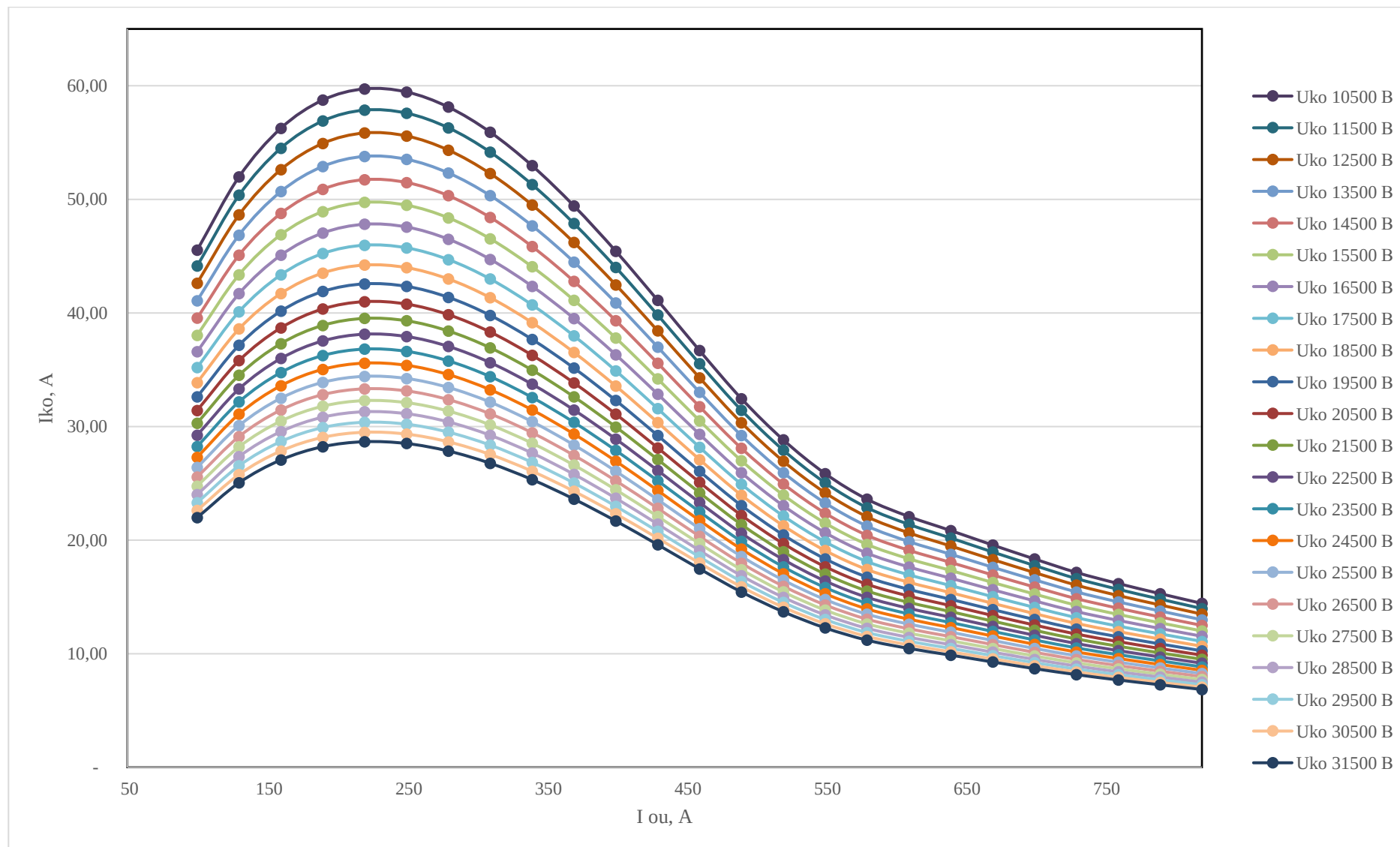


Рисунок Д.50 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

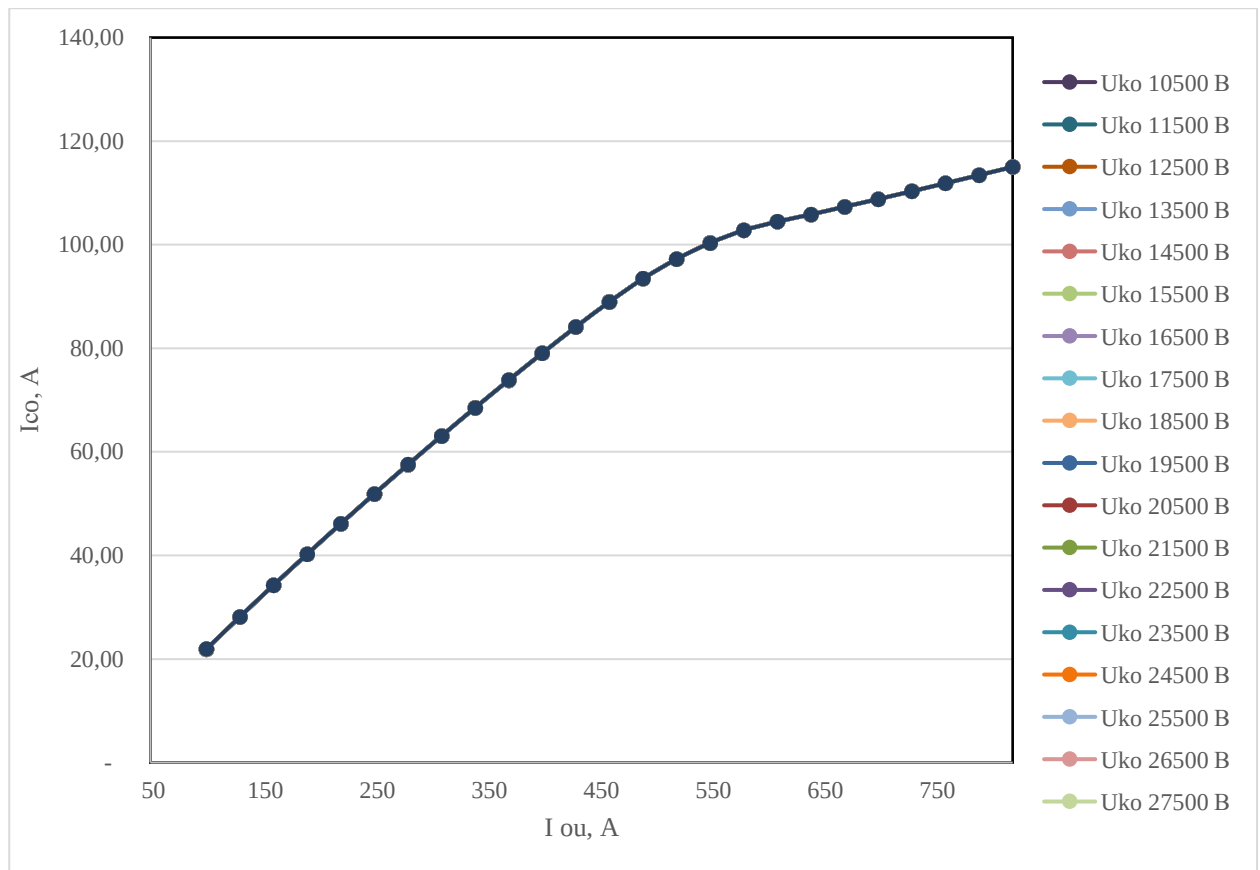


Рисунок Д.51 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,26432 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 10,5 кВ – 31,5 кВ.

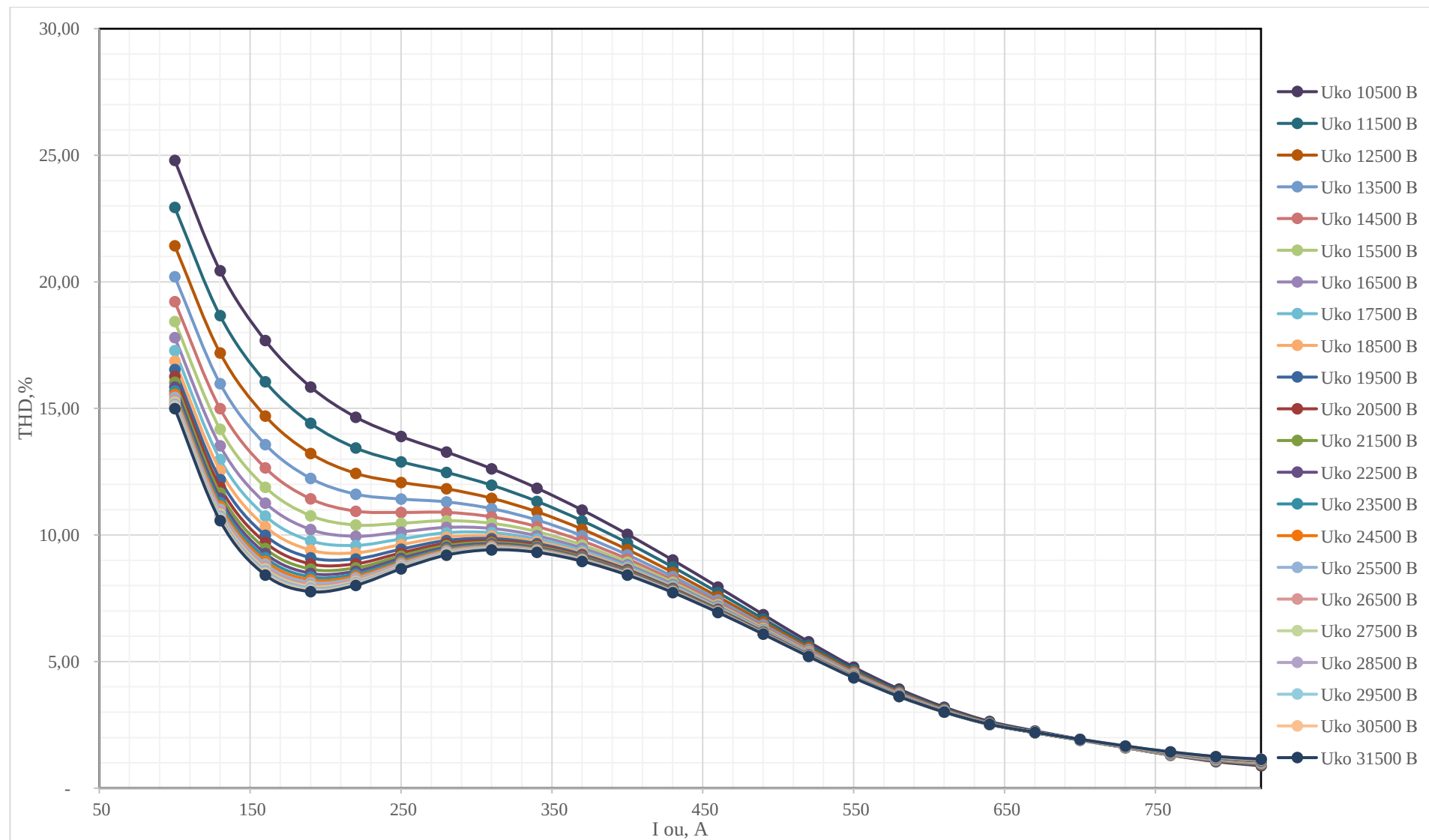


Рисунок Д.52 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

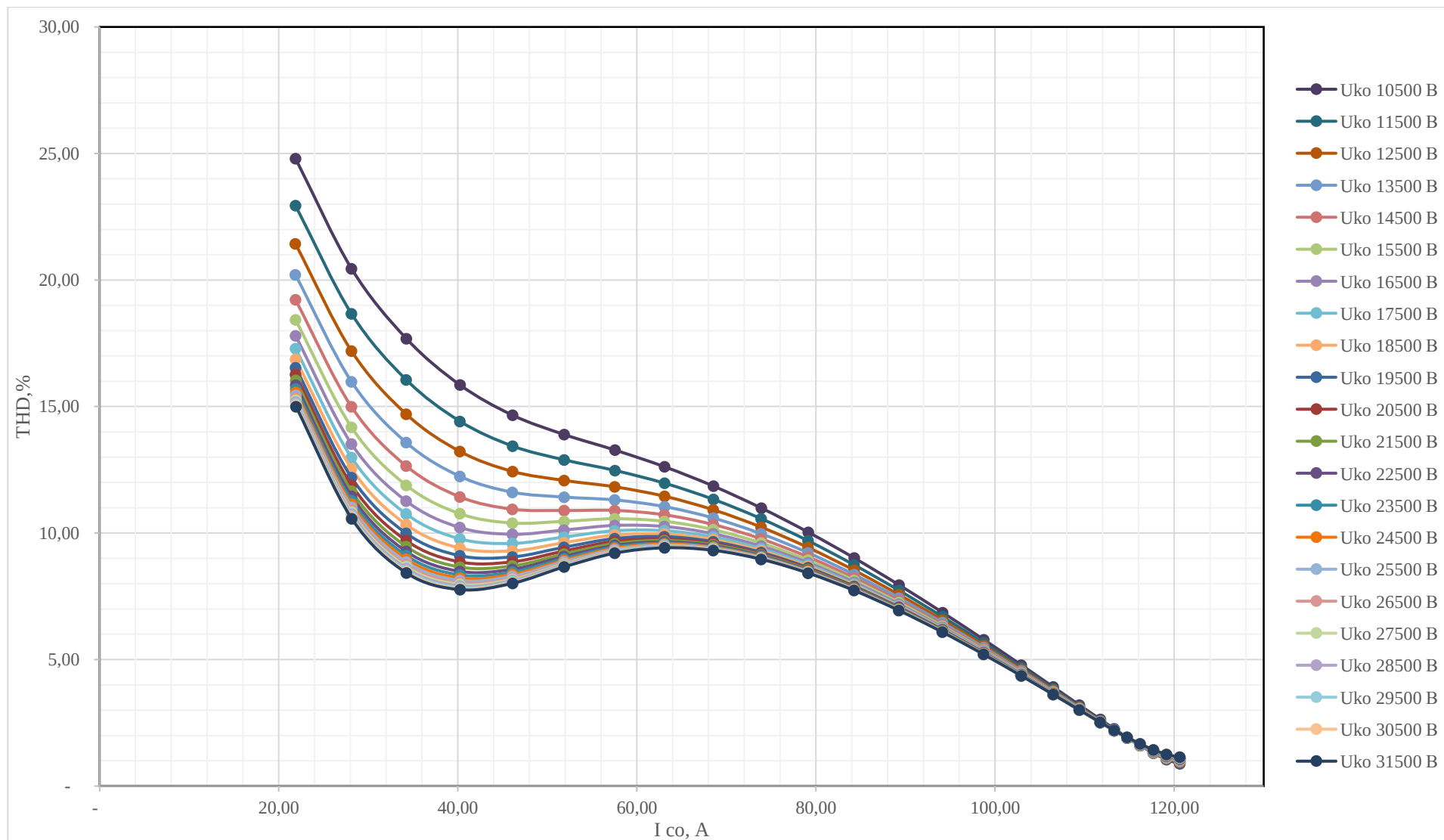


Рисунок Д.53 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

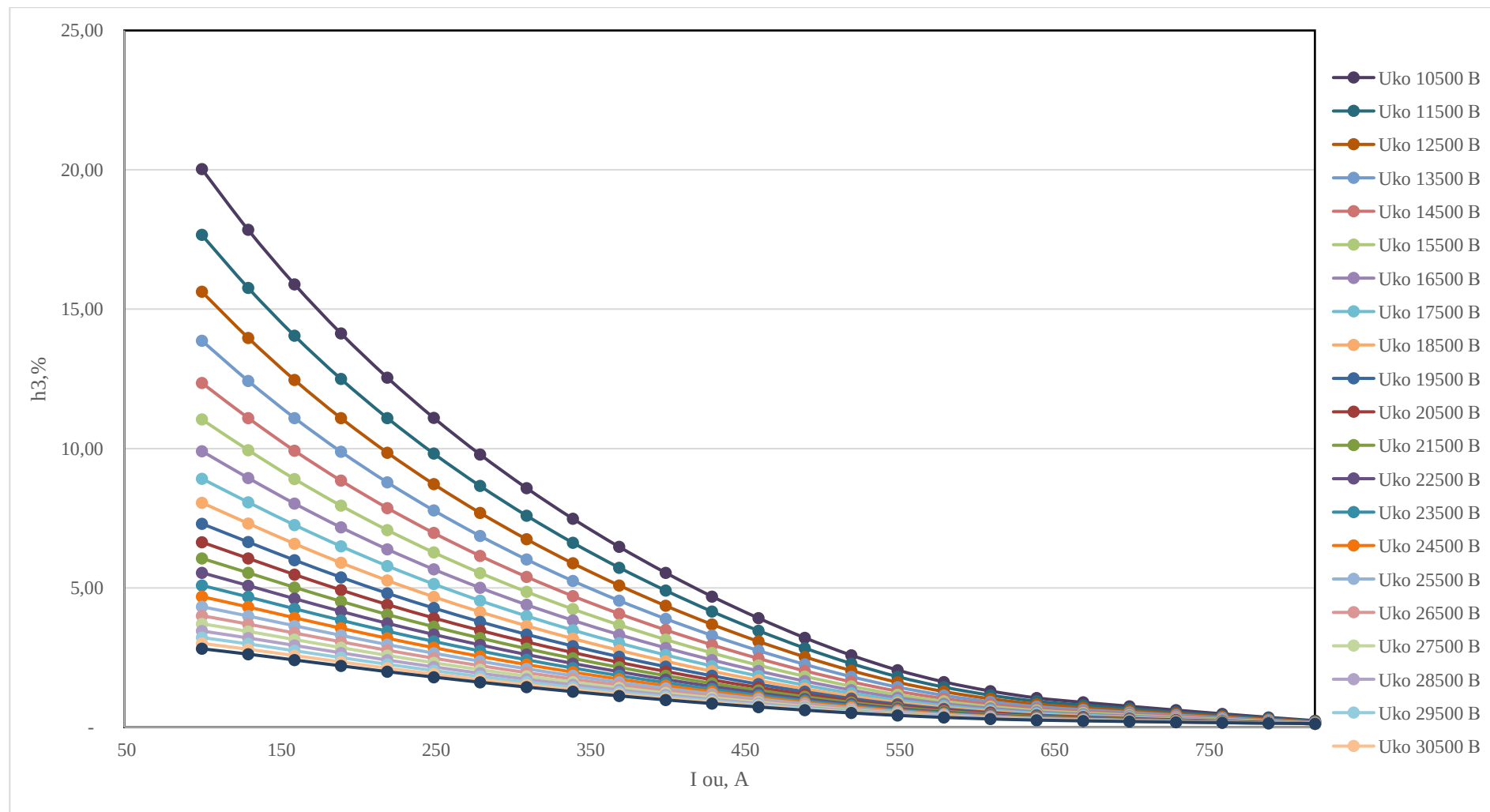


Рисунок Д.54 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$, $S_{стержня} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,27934 \text{ м}^2$

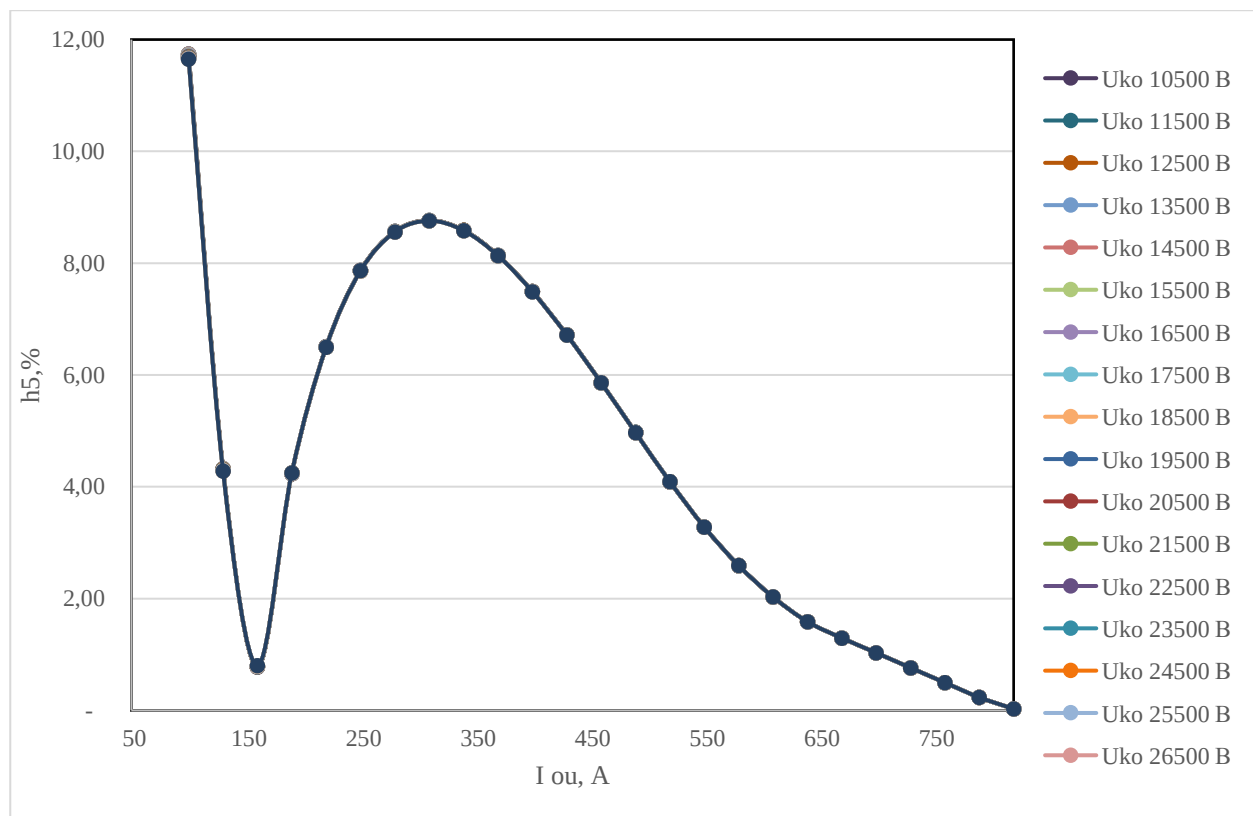


Рисунок Д.55 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

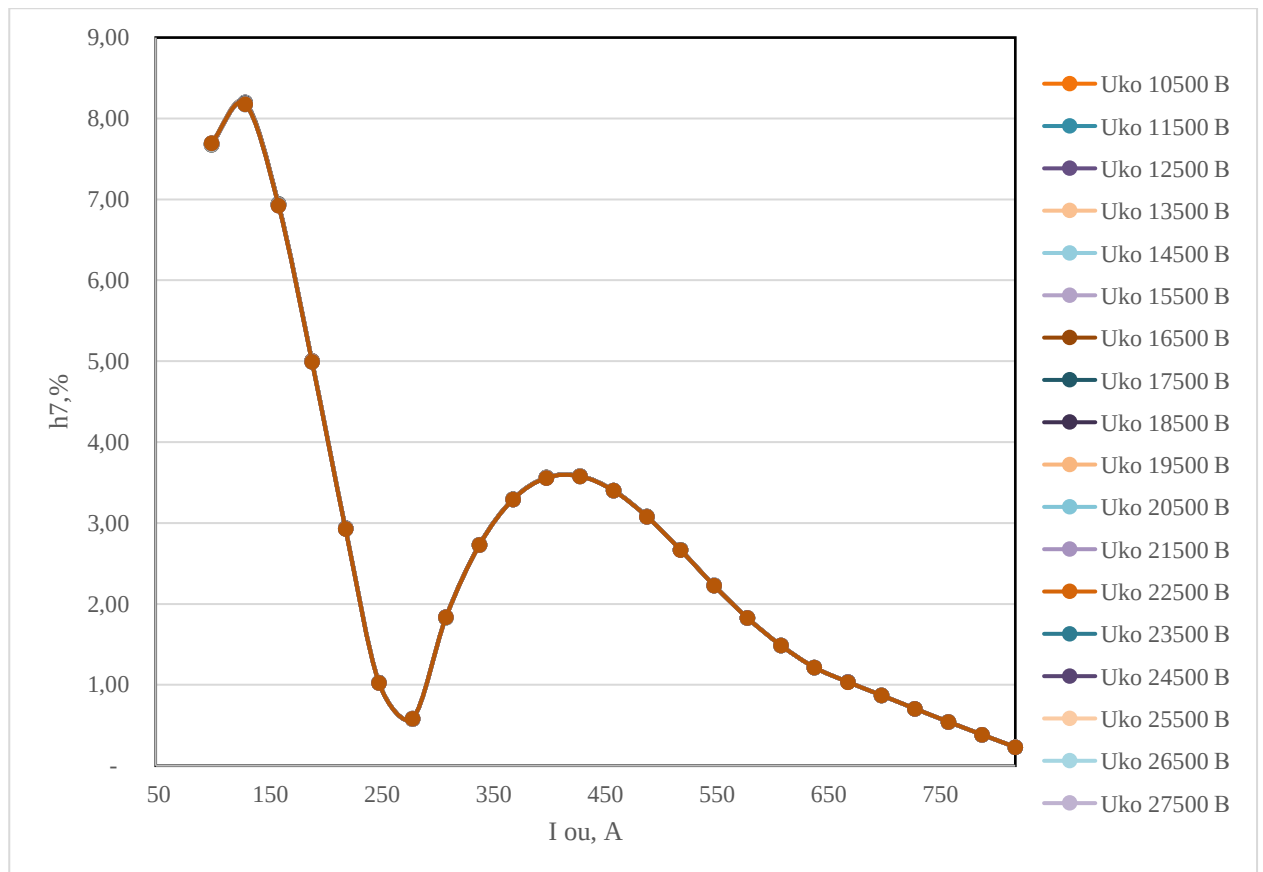


Рисунок Д.56 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} ,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

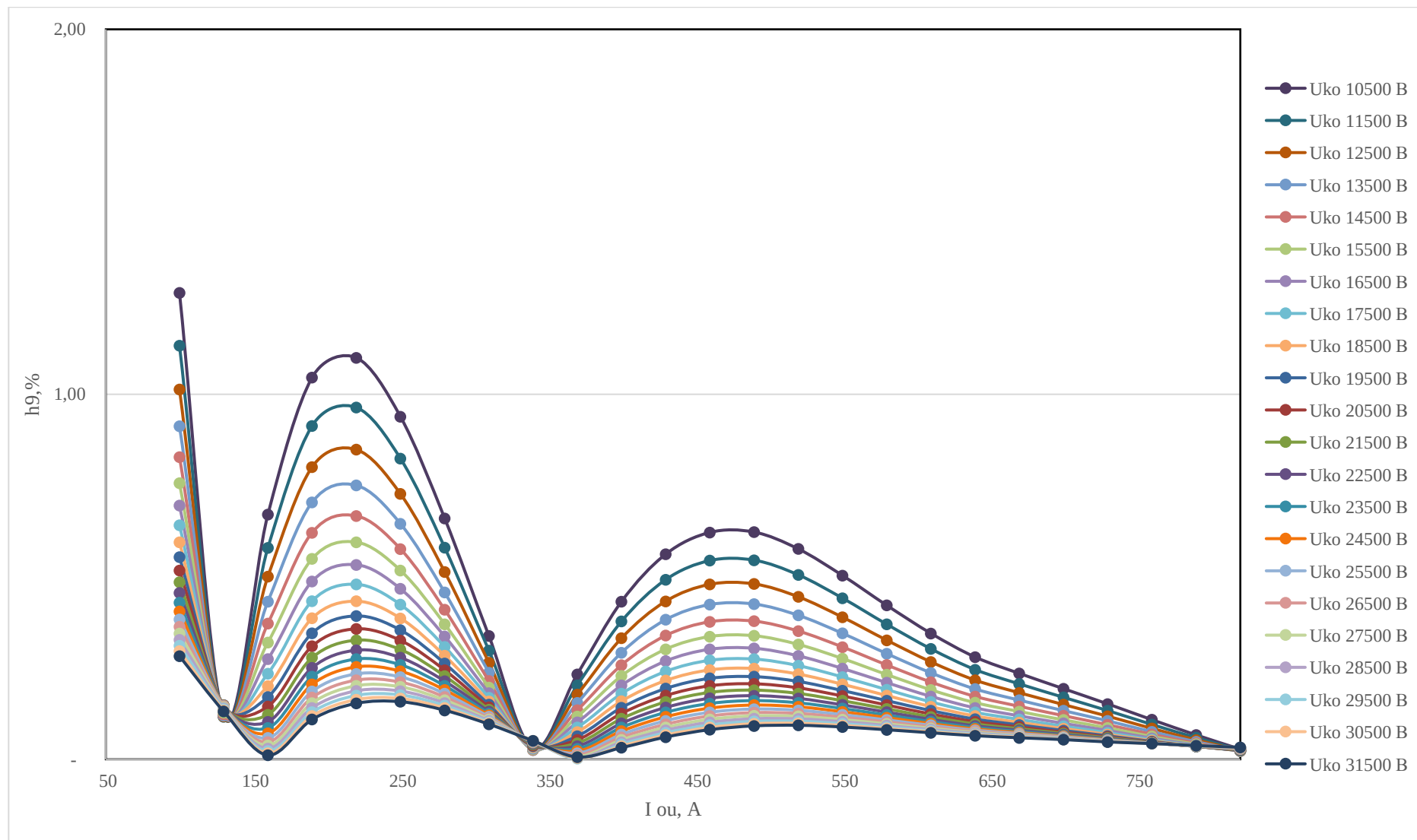


Рисунок Д.57 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

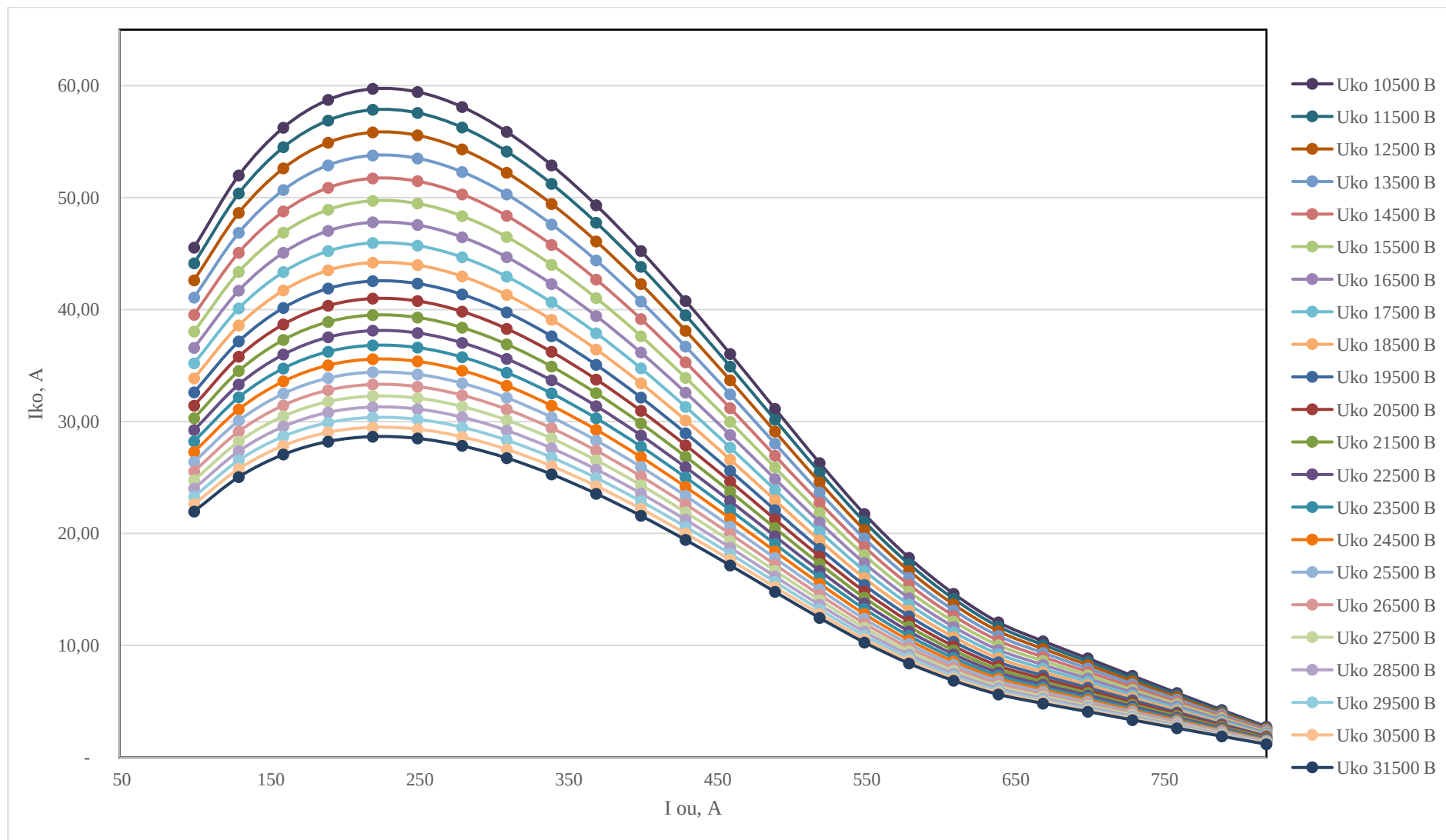


Рисунок Д.58 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

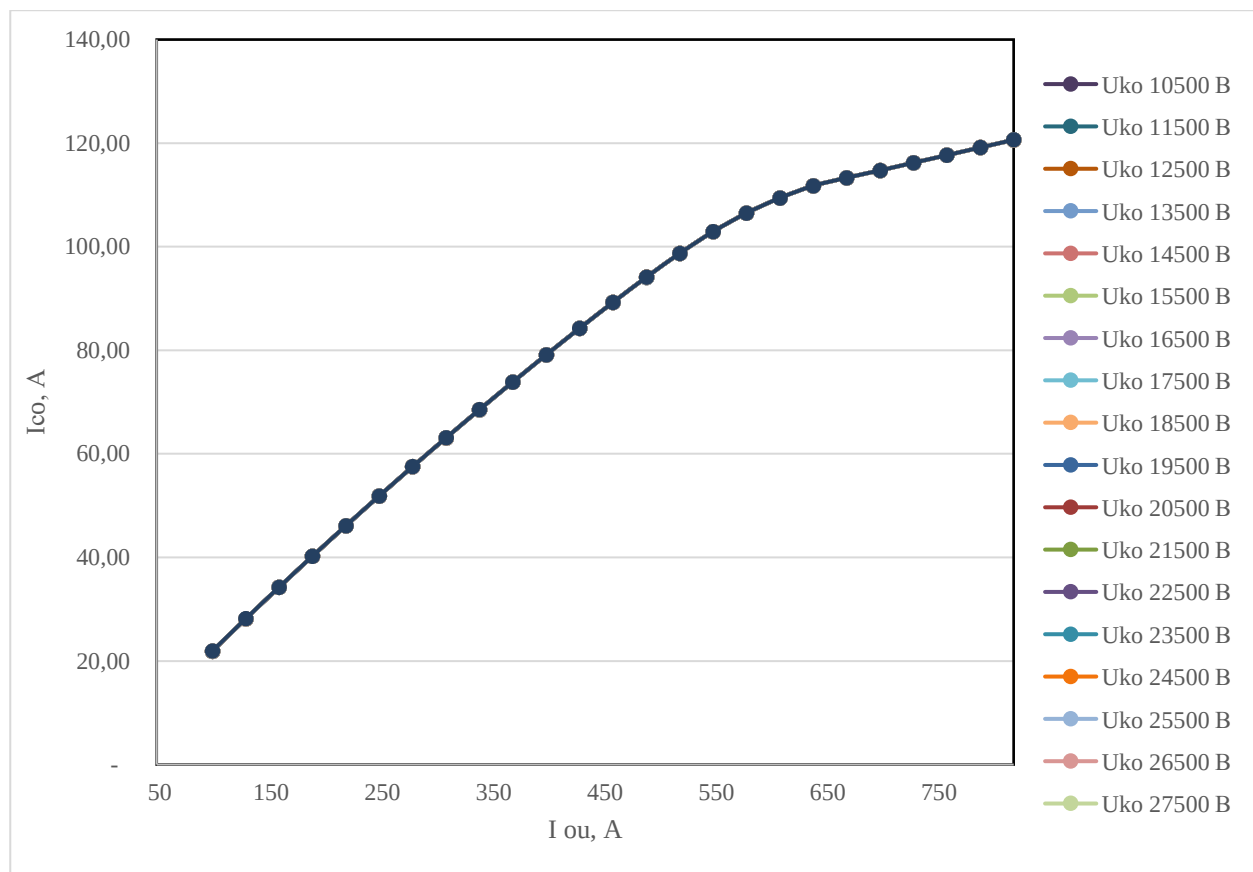


Рисунок Д.59 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,27934 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 10,5 кВ – 31,5 кВ.

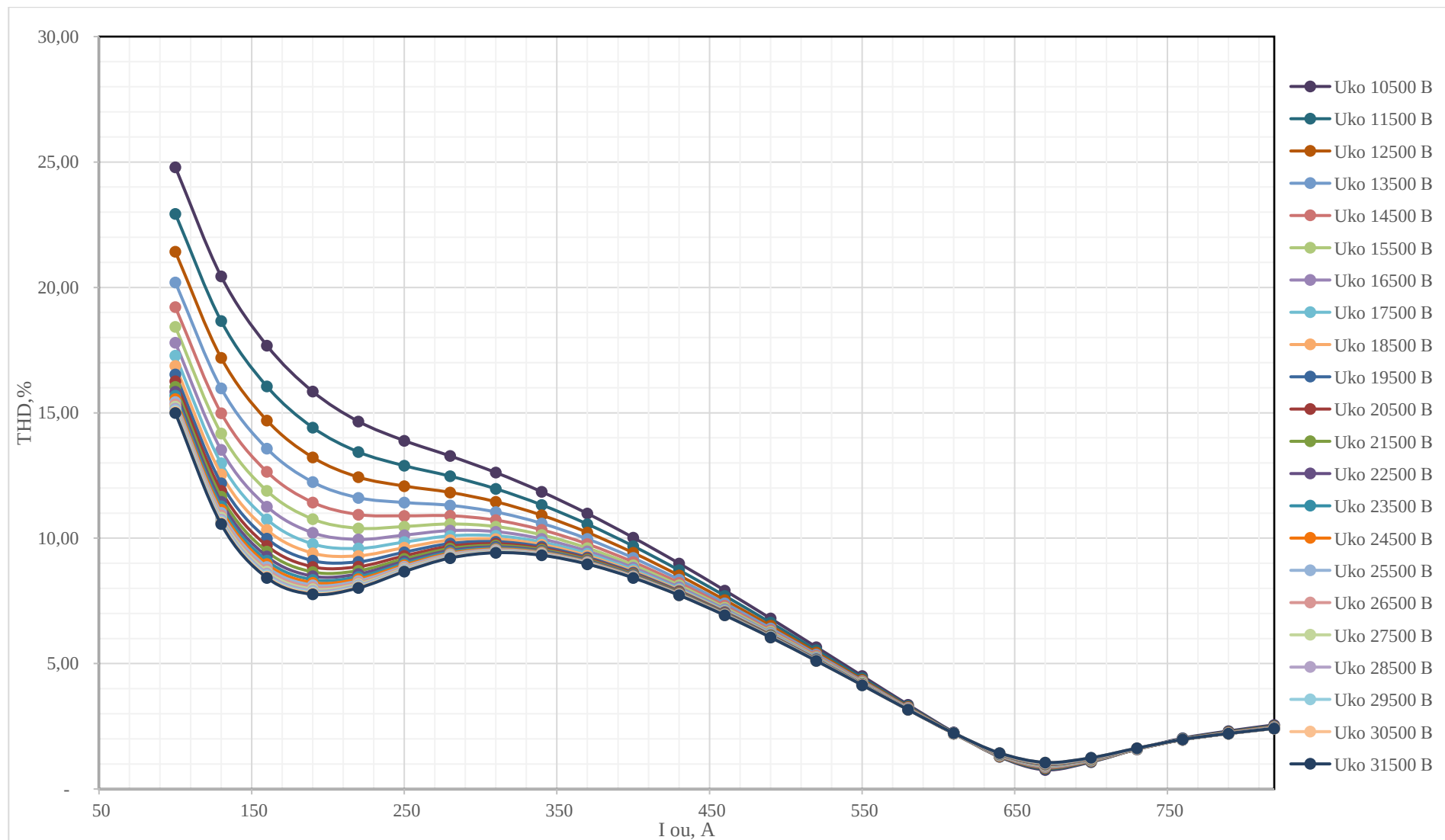


Рисунок Д.60 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

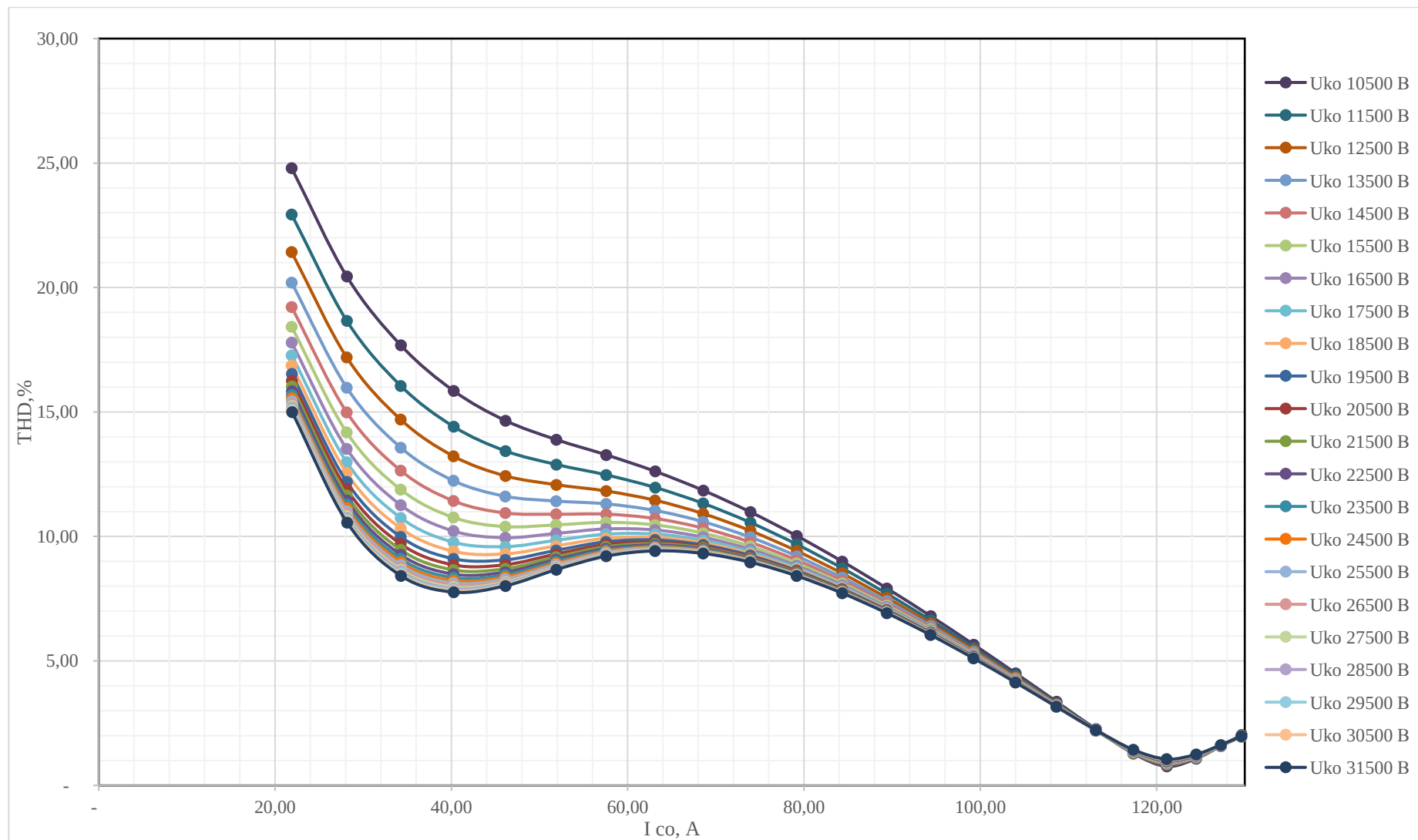


Рисунок Д.61 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

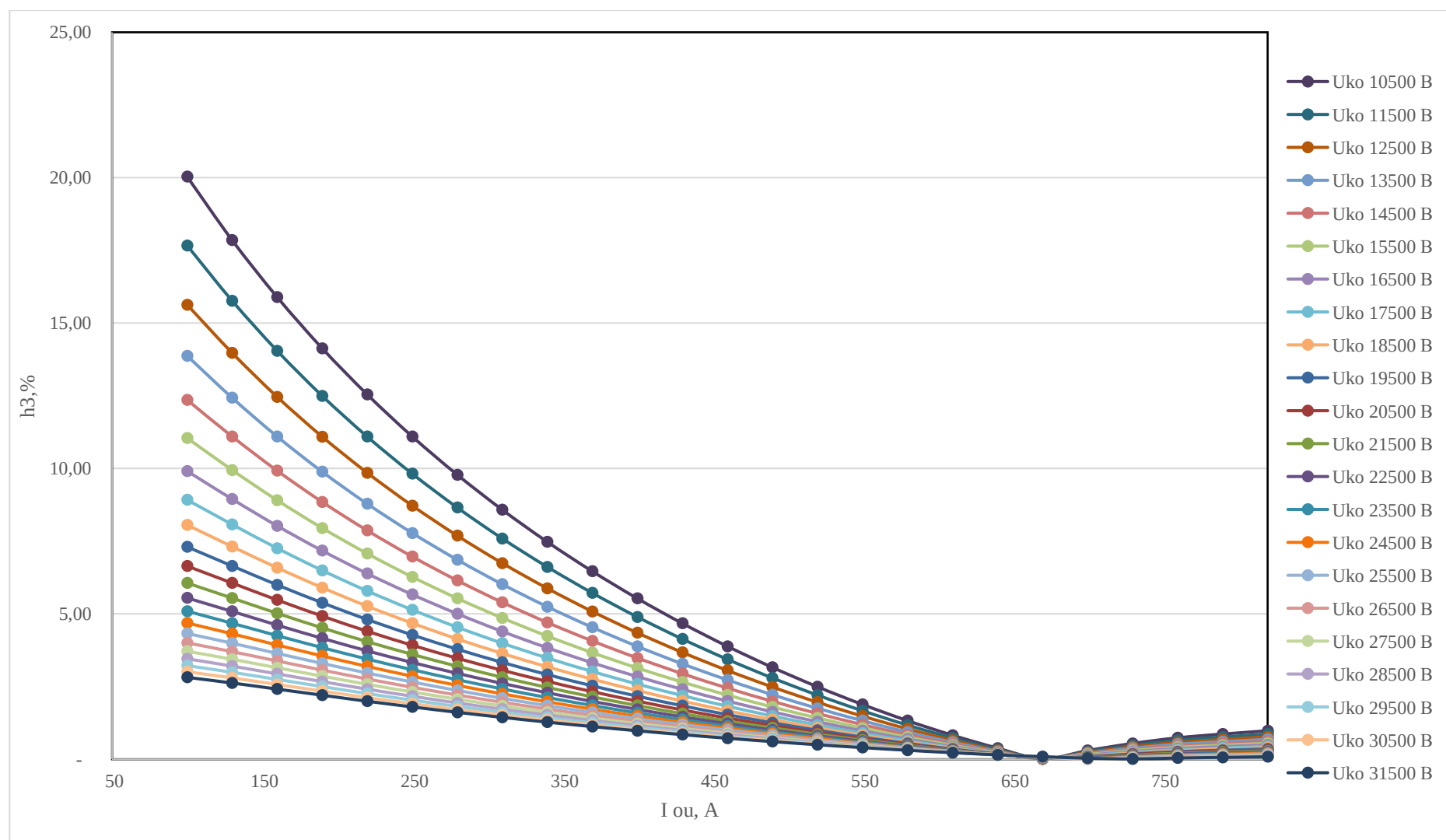


Рисунок Д.62 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{стержня} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,30938 \text{ м}^2$

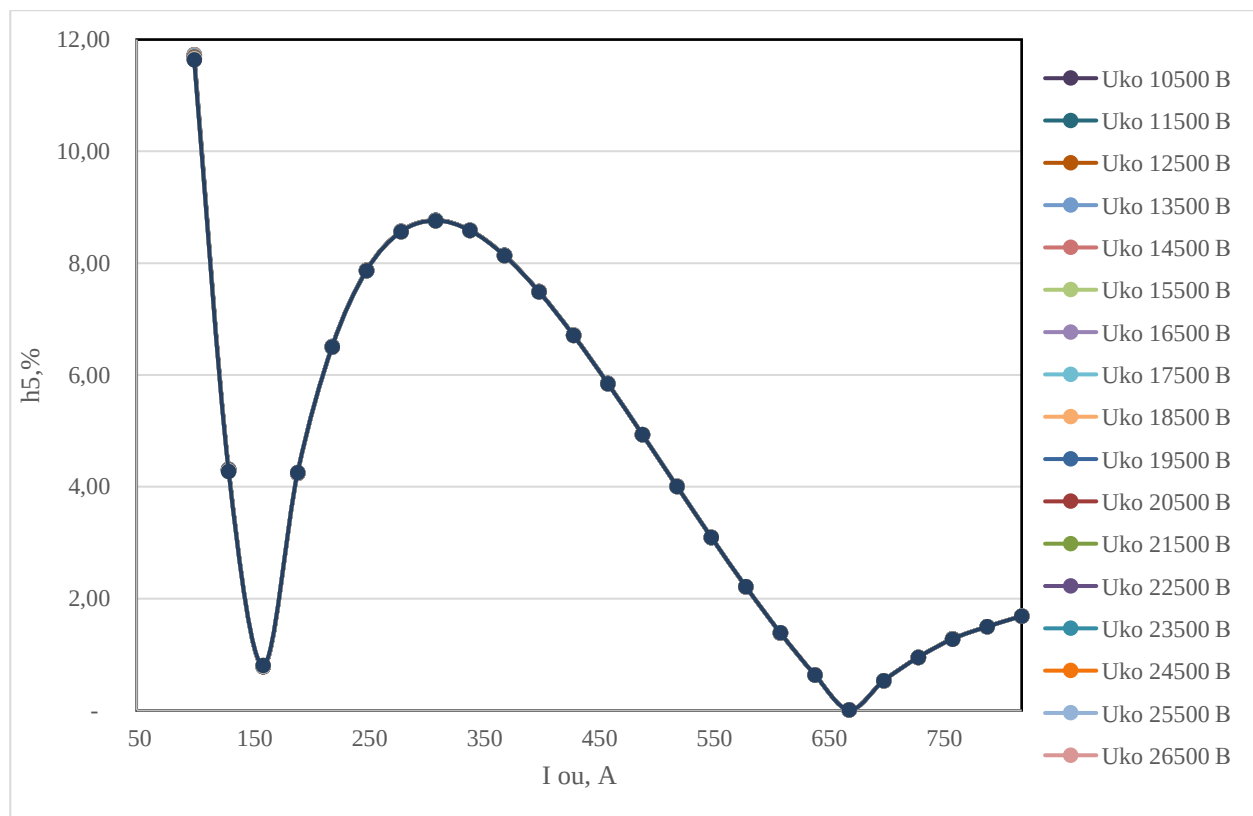


Рисунок Д.63 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$,
 $S_{стержня} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{ярем} = 0,30938 \text{ м}^2$

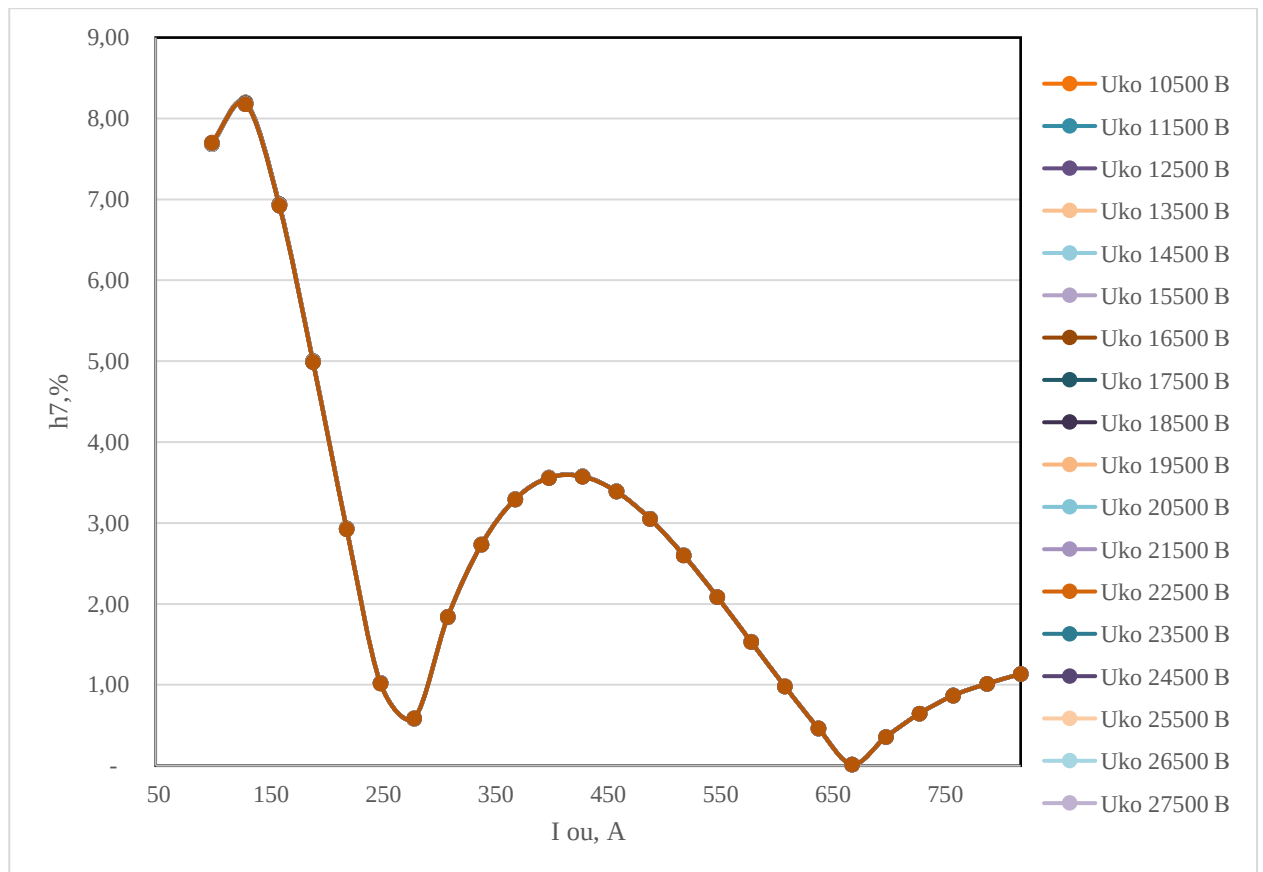


Рисунок Д.64 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{ср}$,
 $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

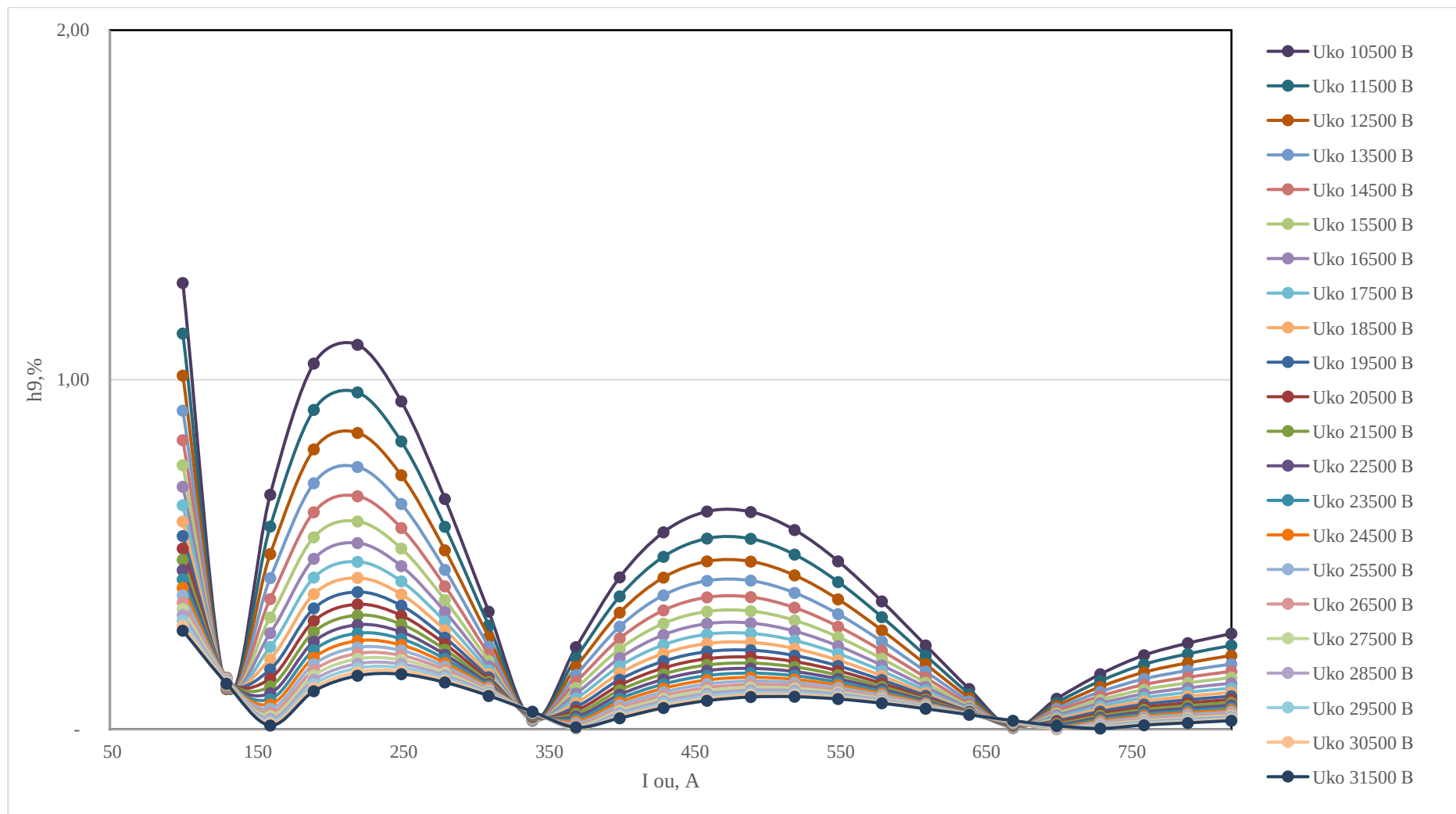


Рисунок Д.65 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

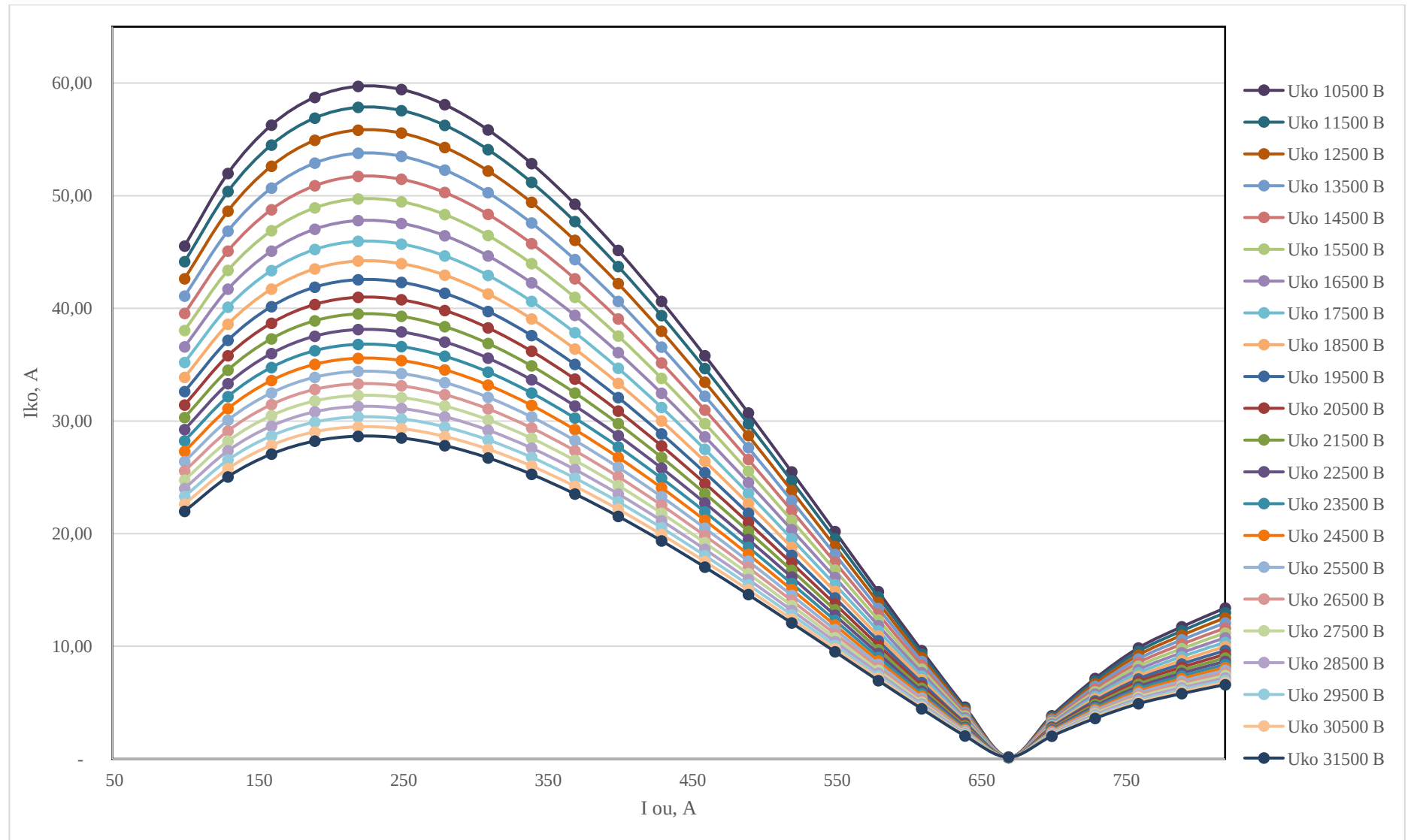


Рисунок Д.66 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

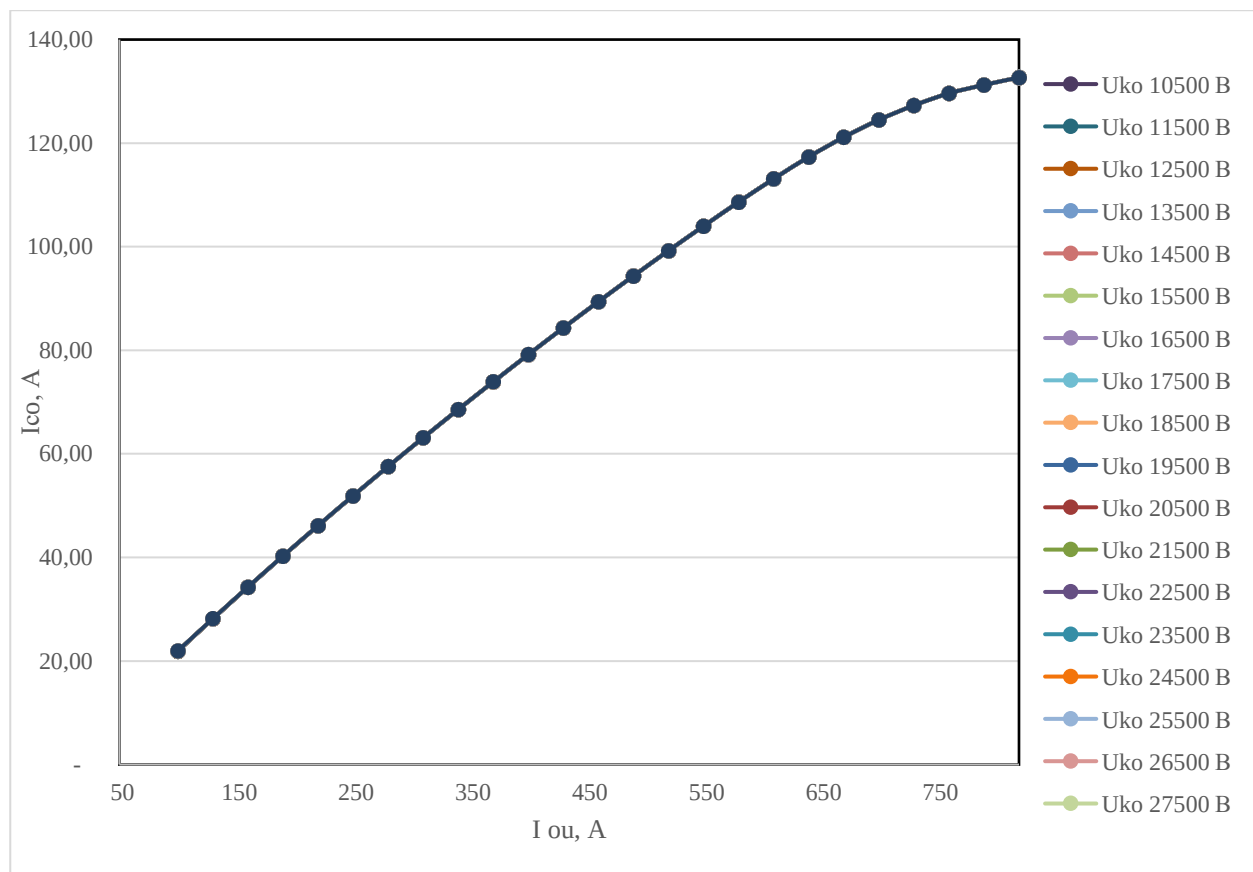


Рисунок Д.67 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} , $S_{\text{стержня}} = 0,150184 \text{ м}^2$, $S_{\text{ярем}} = 0,30938 \text{ м}^2$

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

График изменения тока сетевой обмотки, I_{co}

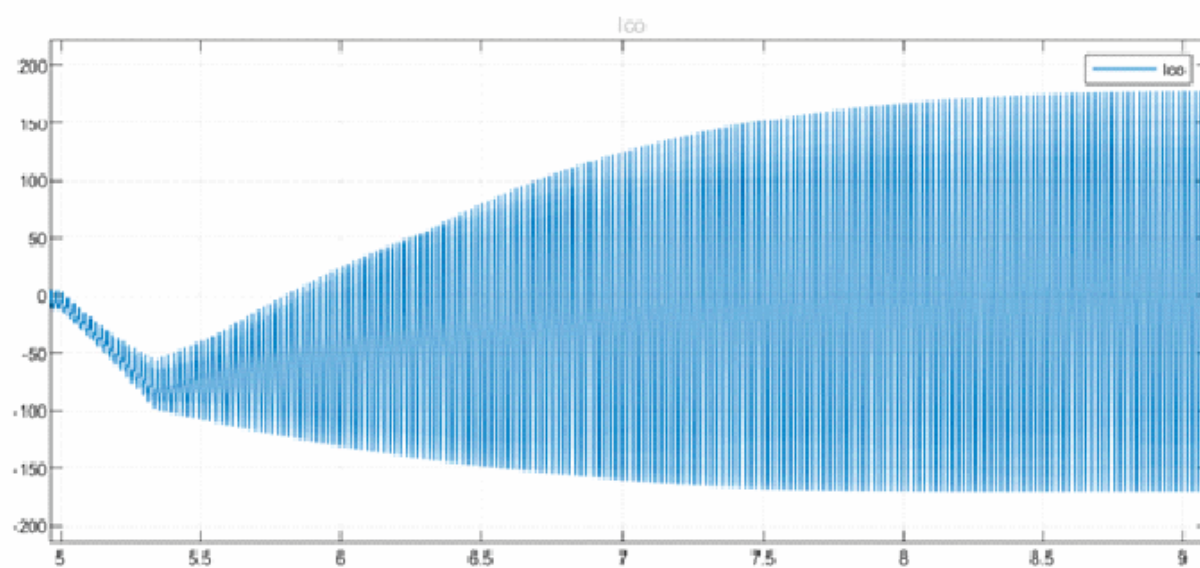


График изменения тока обмотки управления, I_{ou}

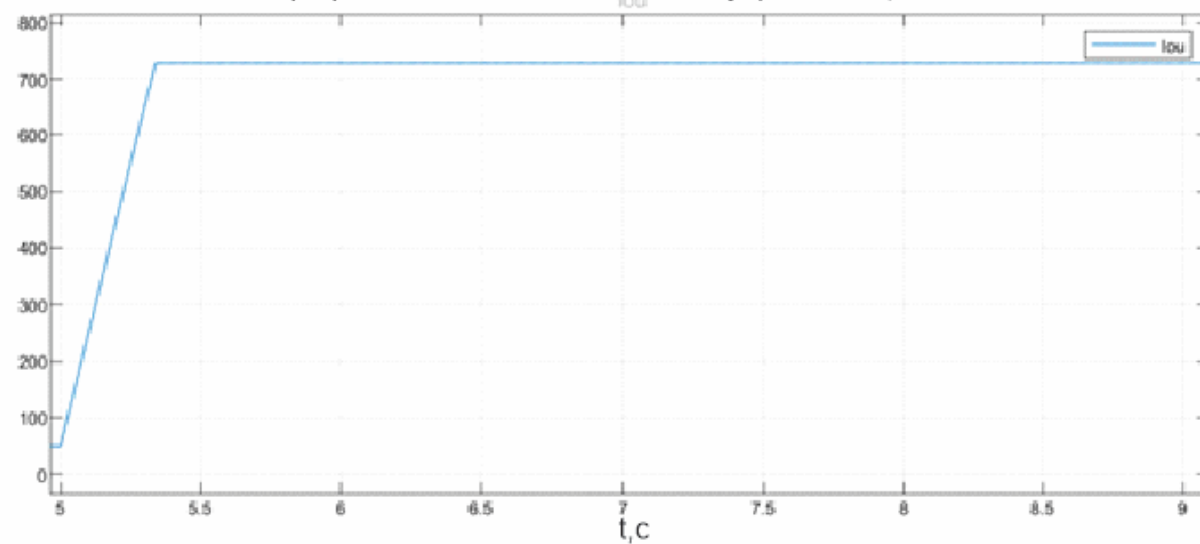


Рисунок Е.1 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1 = 0$, $R_2 = 10$ Ом

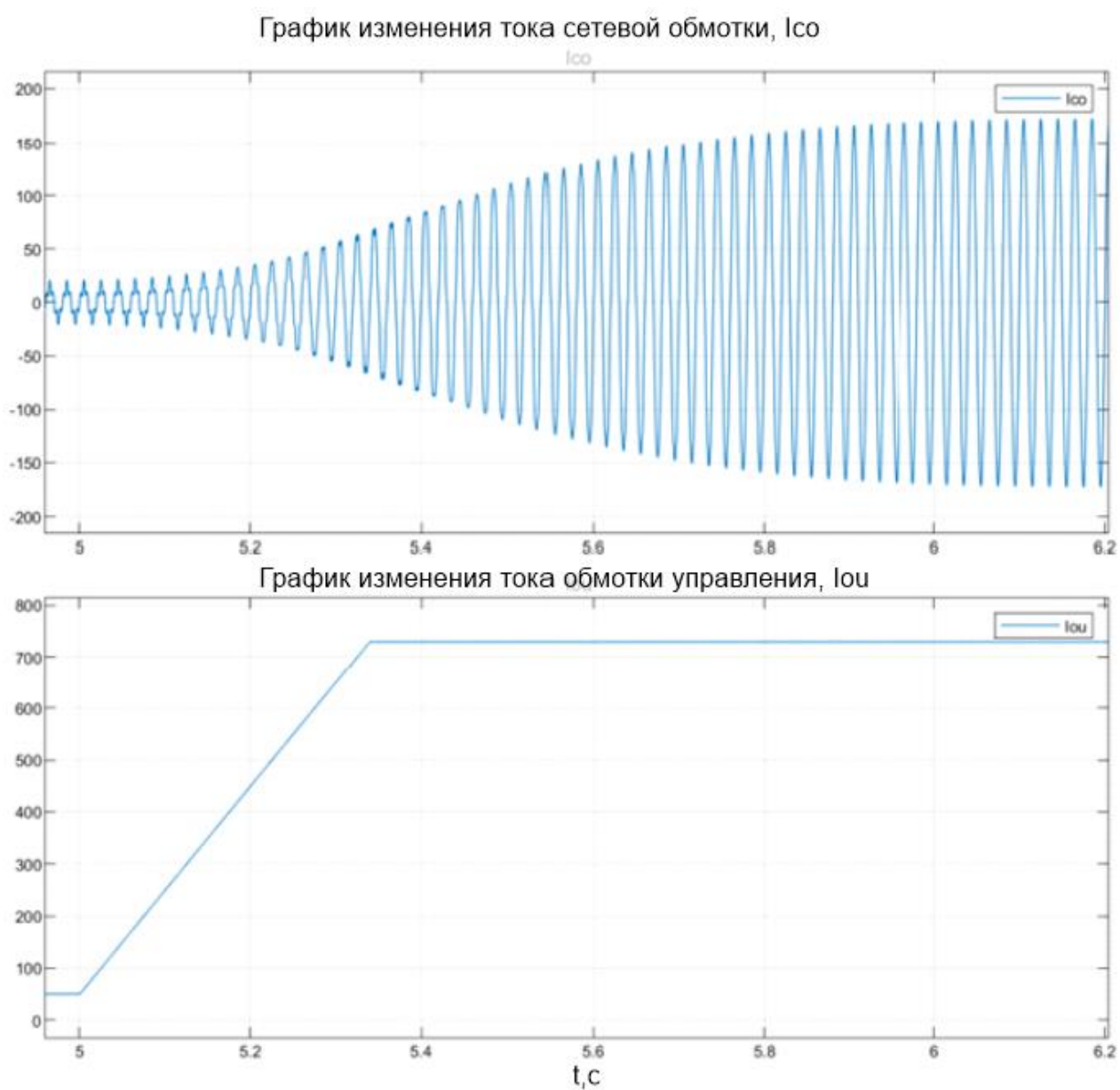


Рисунок Е.2 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=10$, $R_2=10$ Ом

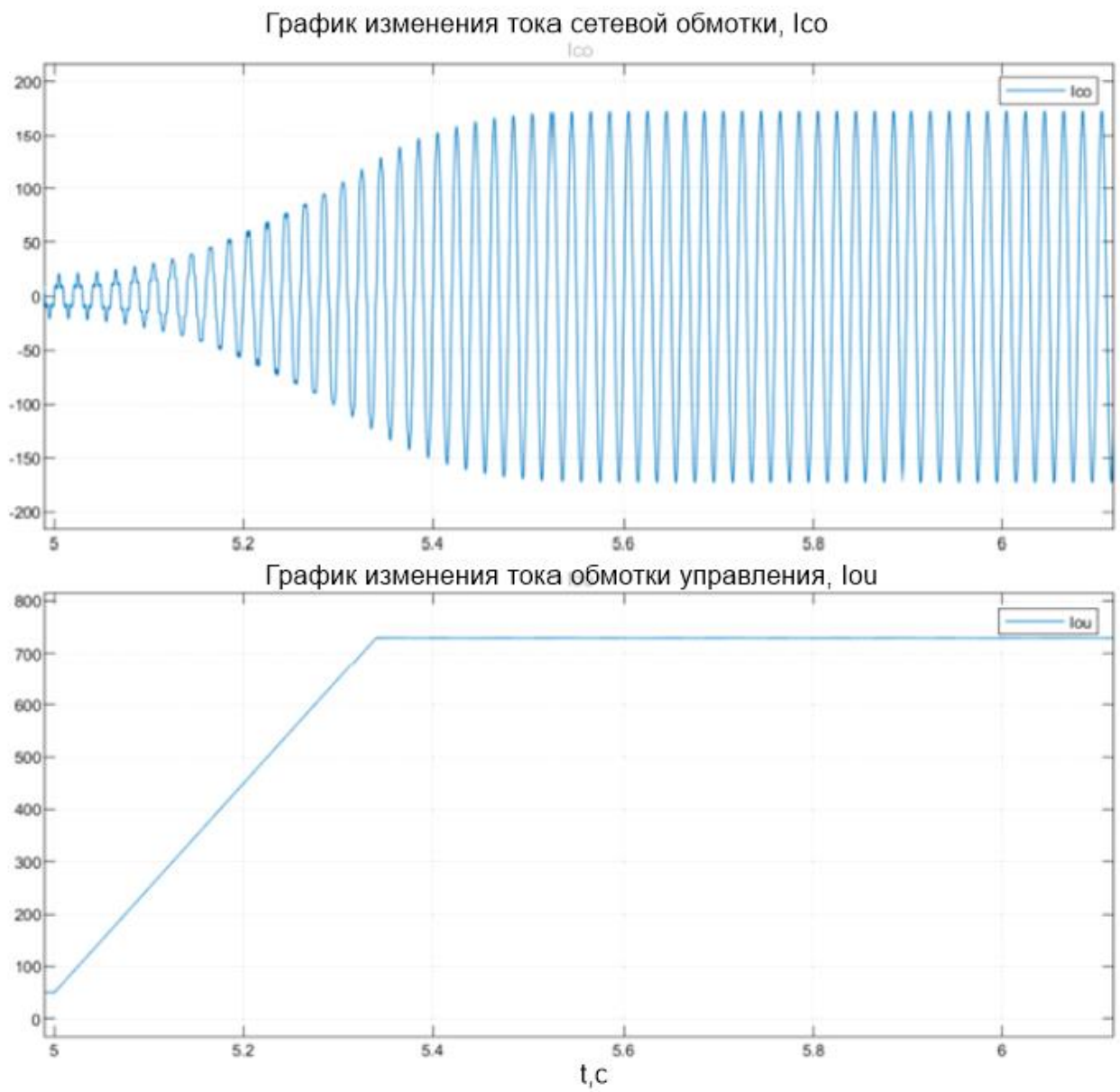


Рисунок Е.3 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=30$, $R_2=30$ Ом

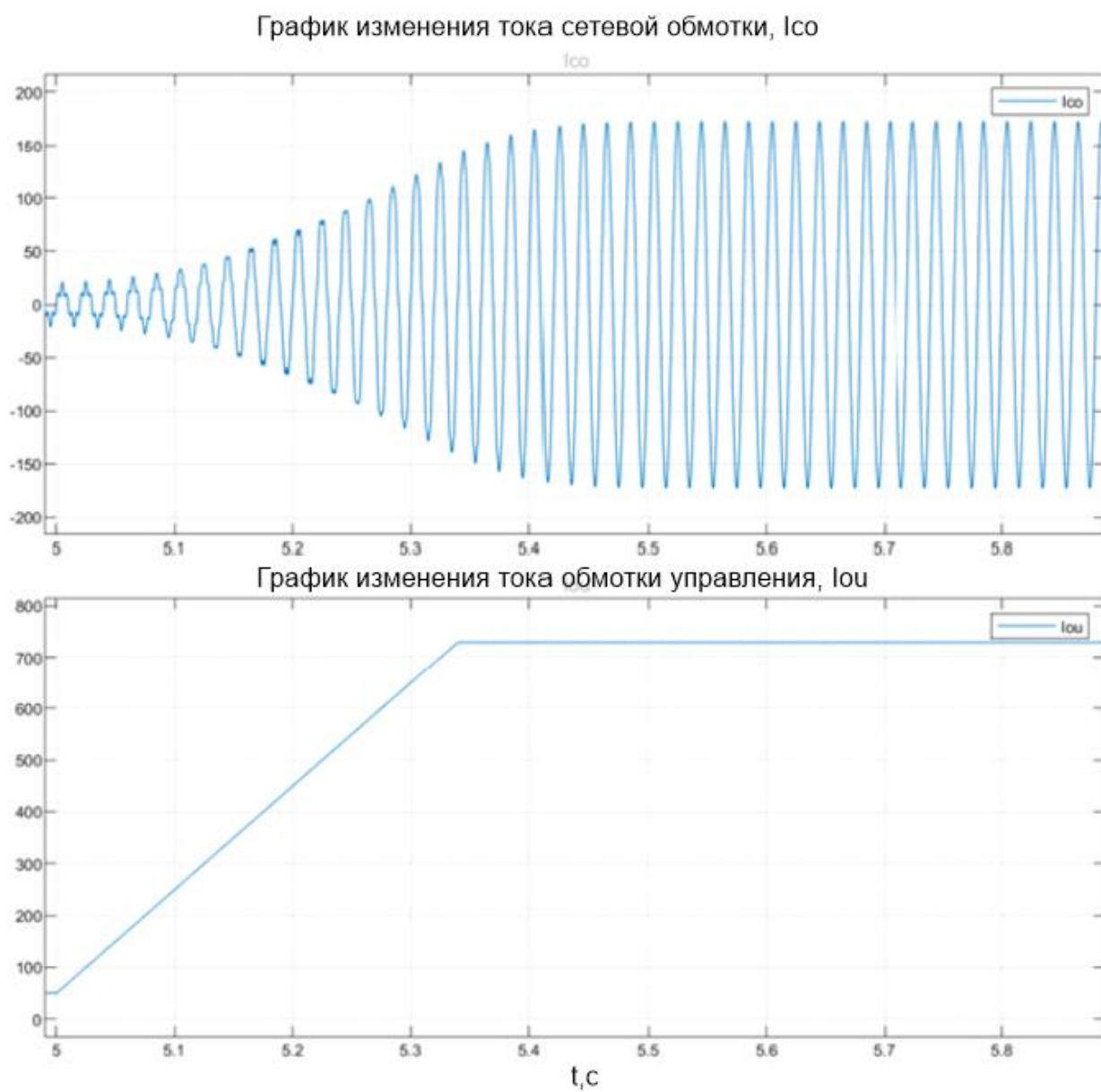


Рисунок Е.4 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1 = 50$, $R_2 = 50$ Ом

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



Asia Trafo

**Акт внедрения научных положений, научной новизны и идеи диссертационной работы
«Разработка и исследование управляемых реакторов трансформаторного типа с
подмагничиванием постоянным током»**

докторанта Мұрат Айбек Қайратұлы

В настоящем Акте внедрения подтверждаем, что результаты диссертационного исследования докторанта кафедры Электроэнергетики НАО «АУЭС им.Г.Дукеева» Мұрат А.Қ. на тему «Разработка и исследование управляемых реакторов трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током» являются актуальными, представляют практический и научный интерес в научных разделах современного трансформаторного и реакторного оборудования, энергосбережения, эффективности в электроэнергетике и технологиях Республики Казахстан.

В диссертационной работе докторанта Мұрат А.Қ. получены значимые результаты научного и экспериментального исследования:

1. По результатам выполненных работ разработан и исследован шунтирующий реактор с трехстержневым магнитопроводом оптимизированной конструкции.
2. Расчетным путем определено оптимальное соотношения сечения ярем и стержней, длин стержней.
3. Реализована математическая модель УШР в программном комплексе Matlab. Модель создана на основе реальной конструкции УШР, применяемых схмотехнических решениях и учитывает характеристику намагничивания стали, которая используется в магнитной системе реактора.
4. Результаты диссертационной работы доведены до разработки технической документации с применением современных программных продуктов 3D проектирования для возможности практического начала серийного производства новых УШР.
5. Техническая документация УШР на напряжение 110 кВ мощностью 25 МВАр прошла предварительную техническую и технологическую экспертизу завода изготовителя и получено положительное заключение по возможности изготовления промышленного образца. При положительном решении вопроса изготовления УШР с трехстержневой конструкцией, внедрение результатов настоящей диссертационной работы не вызывает сомнений. При определении объемов финансирования для производства промышленного образца УШР, наше предприятие окажет всяческую поддержку и помощь диссертанту.

Заместитель Председателя Правления
ТОО «Asia Trafo»

Генеральный директор ТОО «Asia R&D»



Атеев Д.Т.

Тажибаев А.А.



ТОО "Asia Trafo" («Азия Трафо») ЖШС
Республика Казахстан, 160024
г.Шымкент, Каратауский р/н,
жизлой массива Тассай, здание 1196
e-mail: asia.trafo@alageum.com

"Asia Trafo" («Азия Трафо») ЖШС
160024, Казахстан Республикасы,
Шымкент қаласы, Каратау ауданы, Тассай
тұрғын үй алабы, 1196 ғимарат
e-mail: asia.trafo@alageum.com