

Некоммерческое акционерное общество
«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 ученой степени доктора философии (PhD)

Научные консультанты:

Кандидат технических наук,
Ассоциированный профессор Әмитов Е.Т.

Доктор технических наук,
профессор Долгополов А.Г.

Республика Казахстан
Алматы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ШУНТИРУЮЩИЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	11
1.1 Состояние вопроса по разработке УШР.....	12
1.2 Принцип действия и особенности конструкции управляемых реакторов трансформаторного типа с подмагничиванием постоянным током.	14
1.3 Описание режима полупериодного насыщения и его использование в трехстержневой конструкции.....	18
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ.....	23
2.1 Описание физических моделей УШР и специализированного стенда для комплексных электротехнических исследований	23
2.2 Электромагнитные параметры модели в режиме холостого хода	25
2.3 Электромагнитные параметры модели в режимах подмагничивания	29
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ.....	36
3.1 Описание математической модели в программном комплексе Matlab Simulink	36
3.2 Проверка полученных результатов моделирования работы трехфазного УШР в Matlab Simulink с экспериментальными исследованиями.	43
3.3 Выводы и анализ результатов моделирования	50
4 УПРАВЛЯЕМЫЙ РЕАКТОР ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ (УШР) НА ТРЕХСТЕРЖНЕВЫХ МАГНИТОПРОВОДАХ	52
4.1 Расчет основных параметров реактора.....	52
4.2 Расчет оптимального соотношения сечения ярем и стержней.....	56
4.3 Моделирование УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр..	60
4.4 Изменение индукции переменного магнитного потока B_1 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.	64
4.5 Изменение индукции постоянного магнитного потока B_2 при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.	68

4.6	Изменение сечений стержней и ярем при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.....	71
4.7	Изменение высоты стержней при моделировании УШР напряжением 110 кВ мощностью 25 МВАр.....	82
4.8	Улучшение характеристик быстродействия УШР	86
5	РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ	90
5.1	Расчет основных параметров реактора.....	91
5.2	Количество витков обмоток и сечение проводников.....	92
5.3	Расчет изоляции.....	94
5.4	Геометрические размеры обмоток.....	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	112
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	117
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д	119
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е	189
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ё.....	194

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% [67].

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 [69].

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 [68]. 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 [66].

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 кратно выше, чем у тех же голых проводов. 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.

Потребность средств регулирования напряжения и реактивной мощности в электрических сетях РК напряжением от 35 кВ до 500 кВ мощностью от 25 МВАр до 180 МВАр остается достаточно высокой. Несмотря на это, производство управляемых шунтирующих реакторов не реализовано в РК, и их поставка производится с зарубежных стран таких как - Российская Федерация, Украина, Турция, Испания и другие. Цена импортных реакторов вследствие транспортных расходов и добавленной стоимости завышена.

В соответствии с «Программой развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств», можно и необходимо наладить производство управляемых шунтирующих реакторов [70]. 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.

Практическая значимость работы заключается в обеспечении управляемыми реакторами электрических сетей и систем Республики Казахстан, расширении линейки продуктов АО «Asia Trafo» и АО «Кентауский трансформаторный завод», увеличении количества рабочих мест, а также возможности поставок управляемых шунтирующих реакторов зарубеж.

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:

Целью работы является создание высокоэффективных управляемых ферромагнитных устройств с подмагничиванием постоянным током. В соответствии с целью формулируется и общая научная задача – разработка УШР на основе экспериментальных исследований, имитационного моделирования и исследования электромагнитных характеристик, режимов работы, конструкторских и технологических проработок под технологию производства трансформаторов.

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

- Провести анализ научной литературы, патентные исследования с целью обоснования нового технического решения управляемых шунтирующих реакторов, включая конструктивно-технологическую схему.

- Разработать физические модели УШР с трехстержневым магнитопроводом и экспериментально исследовать электромагнитные характеристики.

- Разработать имитационную модель УШР в программном комплексе Matlab, при различных режимах подмагничивания постоянным током.

- Оценить влияние степени подмагничивания постоянным током на

состав гармоник тока сетевой обмотки УШР.

- Исследовать влияние высоты и сечения рабочих стержней на потребляемый ток УШР, при обеспечении режима полупериодного насыщения.

- Определить соотношение сечения рабочих стержней к сечению ярем с целью обеспечения режима полупериодного насыщения.

- Разработать рекомендации и оценить возможность изготовления УШР на базе типовых трансформаторов.

Методы исследования.

При выполнении диссертационной работы были использованы методы теоретической электротехники. Методы теоретического и экспериментального исследования электромагнитных характеристик ферромагнитных устройств. Методы гармонического анализа, физического и имитационного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1 Обоснованы параметры физических моделей шунтирующих реакторов.

2 Разработана имитационная модель реактора в программном комплексе Matlab Simulink. Предложена методика моделирования УШР.

3 Получен режим полупериодного насыщения УШР, который характеризуется минимальным коэффициентом гармоник тока сетевой обмотки и номинальными параметрами режима работы УШР. Применены аналитические формулы при расчете соотношения сечения ярем и стержней.

4 Проведен анализ электромагнитных процессов в имитационной модели УШР 110 кВ и выявлена возможность улучшения характеристик быстродействия реактора без изменения его конструкции.

Достоверность полученных результатов подтверждается следующим:

1 Исследования проведены на физических моделях шунтирующего реактора с использованием поверенных измерительных средств, внесенных в реестр ГСИ РК.

2 Экспериментальные работы выполнялись комплексно, и дублировались расчетами по имитационной модели в программном комплексе Matlab Simulink с высокой сходимостью результатов.

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

1. Экспериментальная физическая модель УШР с подмагничиванием постоянным током и обоснованные параметры. Результаты экспериментальных исследований физических моделей реакторов.

2. Математические модели управляемых подмагничиванием постоянным током шунтирующих реакторов в программном комплексе Matlab. Методика моделирования УШР.

3. Результаты обоснования оптимального соотношения длин и сечений стержней и ярем реактора, количество обмоток и их напряжения для получения режима полупериодного насыщения при номинальных параметрах работы УШР.

4. Влияние третьей гармоники индукции на пятую и седьмую гармоники тока сетевой обмотки.

5. Результаты исследований динамических режимов, возможных мероприятий по повышению быстродействия, а также способ, позволяющий значительно повысить быстродействие УШР 110 кВ типовой конструкции.

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: 4 научных статьях, в том числе: 1 научная статья в отечественном издании из списка рекомендованных КОКСОН; 2 научных докладов в сборниках в международных научно-технических конференциях, в том числе с очным выступлением в зарубежной научной конференции с публикацией докладов в базе Scopus; 1 научная статья, индексируемая 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.

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 математической 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 5 основных разделов, списка условных обозначений, введения, заключения, списка использованной литературы и приложений.

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

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

В третьем разделе 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.

Четвертый раздел 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.

Пятый раздел представляет расчеты и результаты исследований, техническую документацию на производство УШР на 110 кВ мощностью 25 МВАр.

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 [3]. 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 [2]. Основное функциональное назначение УШР – снижение уровня напряжения, при одностороннем включении линии электропередач на шину питающей сети, до допустимого. Такие реакторы устанавливаются на линии и называются линейными.

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

Шунтирующие реакторы, управляемые переключением отпаяк, 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 [4] 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 [5, 6].

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 [7, 8].

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 [9-24]. 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]. В таблице № 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
[7]- [12], [46] [27]- [32], [25]	[13] – [17], [20] [33] – [37], [40]	[18] – [21], [41] – [44], [38] – [41], [42]- [45]

Авторы статьи [34] 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 [35, 36] 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 [35, 36], 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 [37]. 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 [38, 39, 40, 41], 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 схожую 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 [40]. 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 питающих линий 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 э.д.с 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.

Принцип действия УШР, как и любого другого ферромагнитного устройства, основан на явлении электромагнитной индукции. Работа УШР заключается в контроле насыщения магнитопровода. Индуктивность сетевой обмотки, расположенная на стержнях магнитопровода, снижается по мере насыщения магнитопровода.

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.

Встречно параллельное соединение секций сетевой обмотки, расположенных на стержнях (полустержнях) одной фазы (рисунок 1.2), позволяет компенсировать четные гармоники тока. Данное схемное решение носит название - двойное симметричное намагничивание по четным гармоникам.

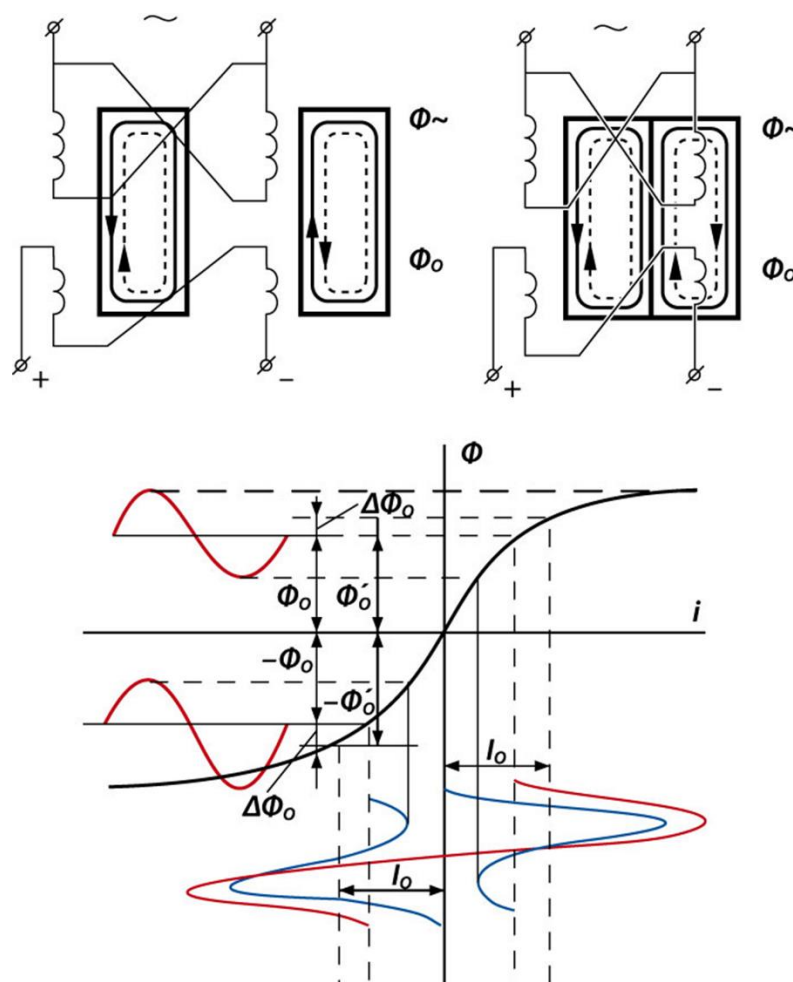


Рисунок 1.2 – Двойное симметричное намагничивание

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 1.3).

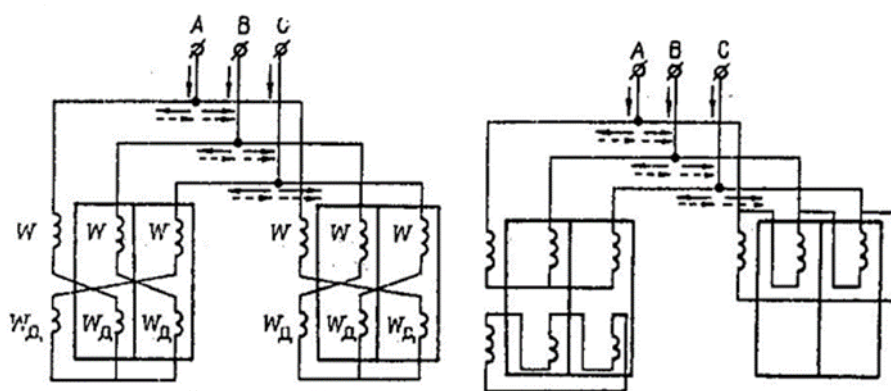


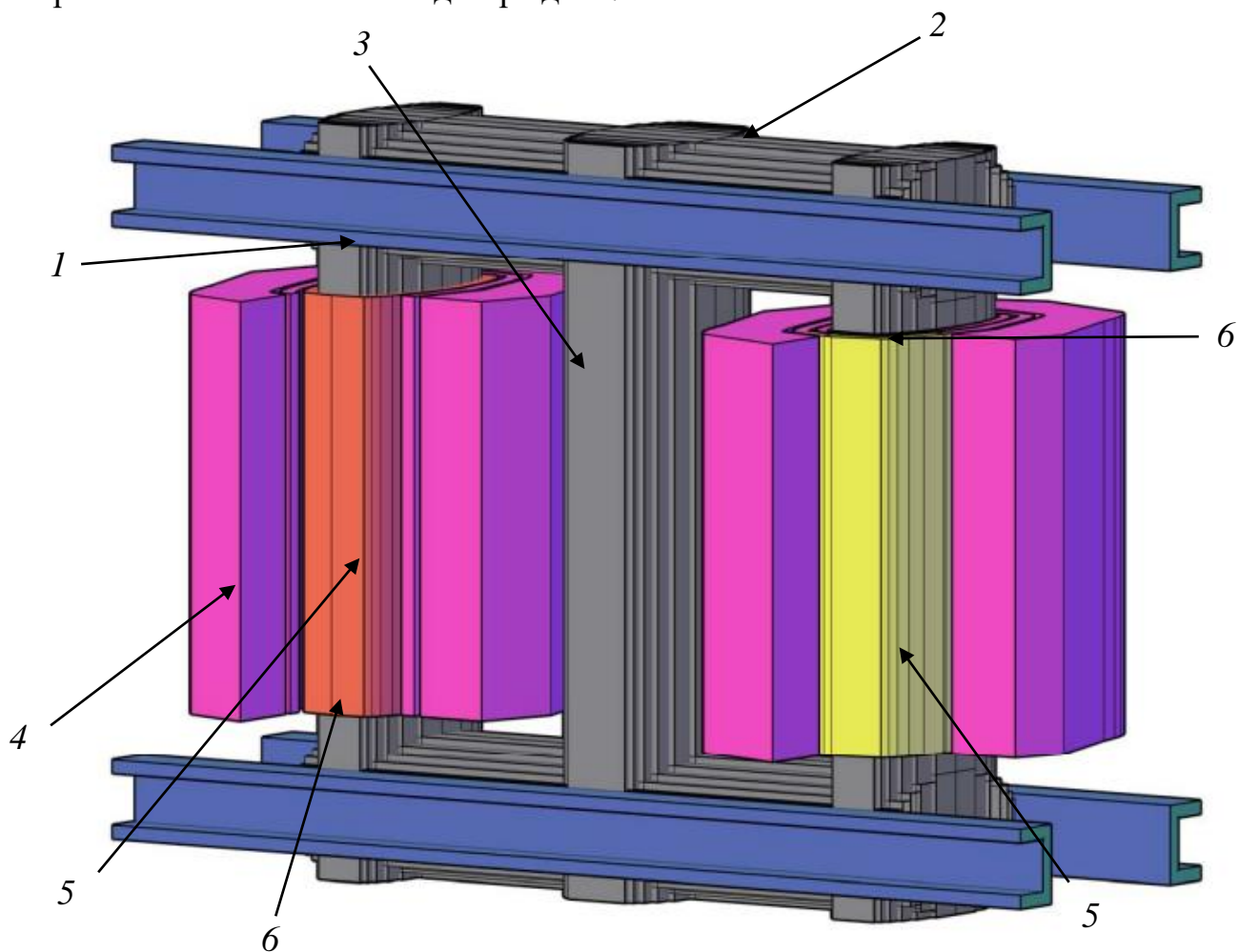
Рисунок 1.3 – Схемные способы компенсации нечетных гармоник

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 1.4. 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 магистраль - 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. 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.



a

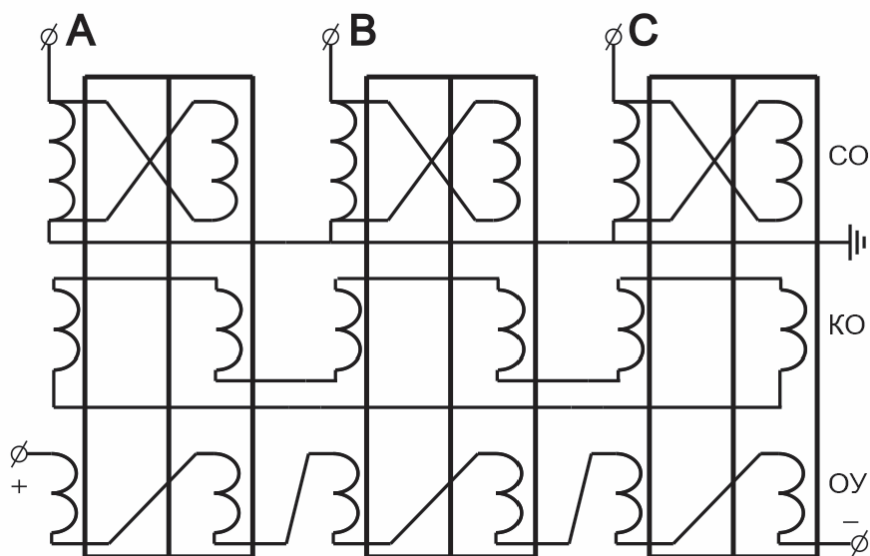


Рисунок 1.4 – Упрощенная конструкция однофазного УШР с трехстержневой конструкцией магнитопровода (а) и схема соединения обмоток (б). 1 – Рабочий стержень, 2 – ярма, 3 – средней стержень, 4 – сетевая обмотка, 5 – компенсационная обмотка, 6 – обмотка управления

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 [46, 47]. 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 1.3, 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

[48].

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 локализируются 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 1.4, 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 1.4 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.

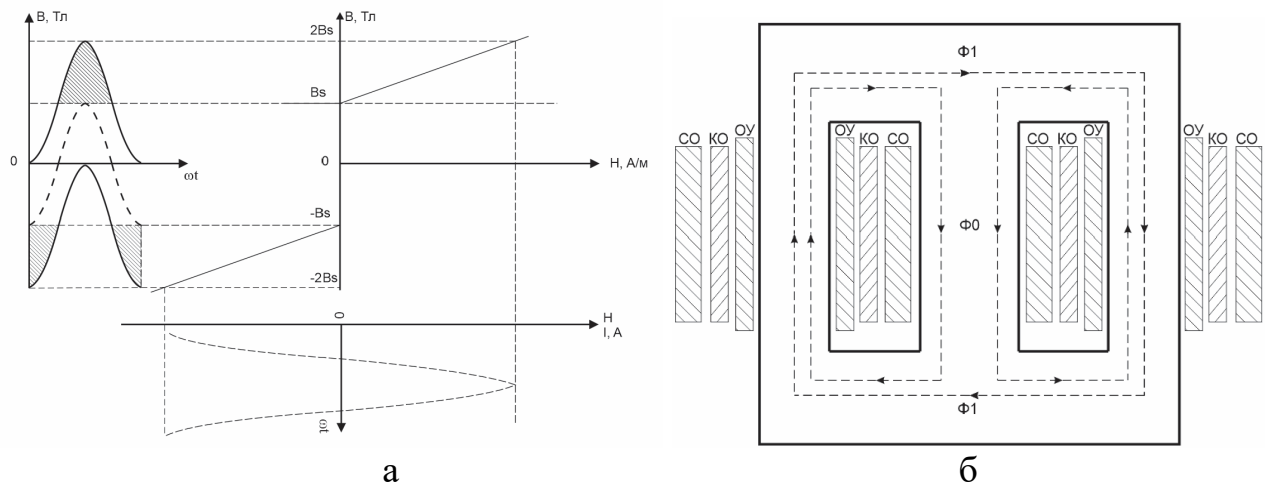


Рисунок 1.4- Принцип предельного насыщения магнитной цепи (а) и возможная конструкция фазы управляемого реактора (б)

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 [49]. 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.

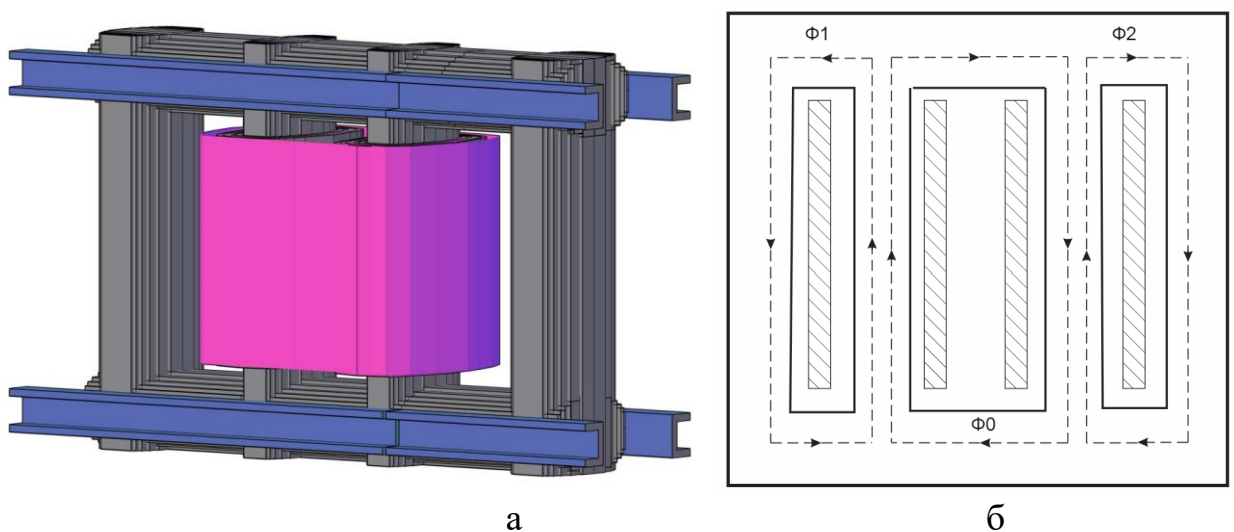
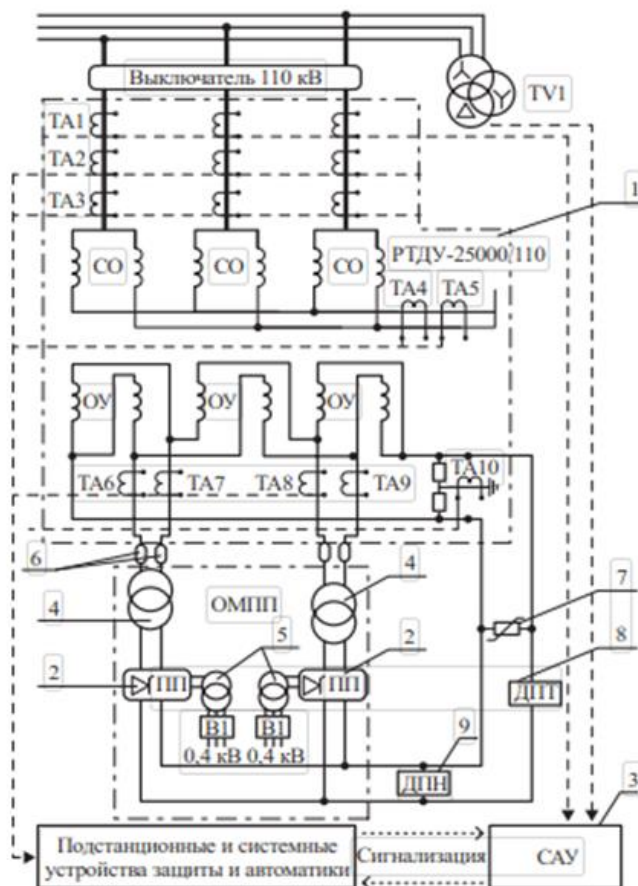


Рисунок 1.5 - Упрощенная конструкция (а) и электромагнитная схема (б) однофазного УШР с бронестержневым магнитопроводом

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)

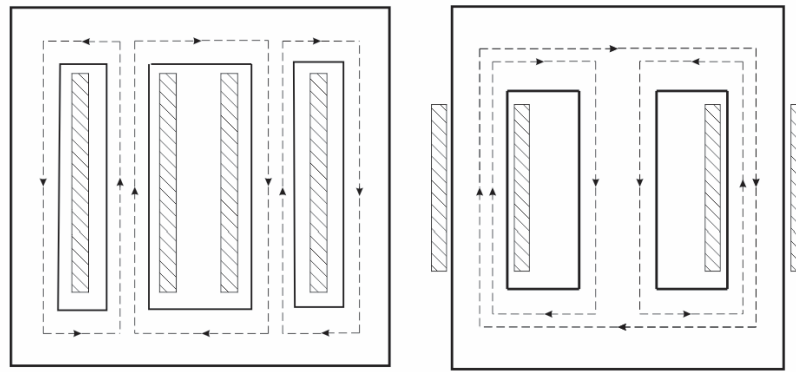


Рисунок 1.7 – Сравнительные размеры магнитопроводов бронестержневой и трехстержневой конструкций

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 $0,251 \text{ мм}^2$, а площадь поперечного сечения ярем и среднего стержня увеличено с $0,26 \text{ м}^2$ до $0,46 \text{ мм}^2$ 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.

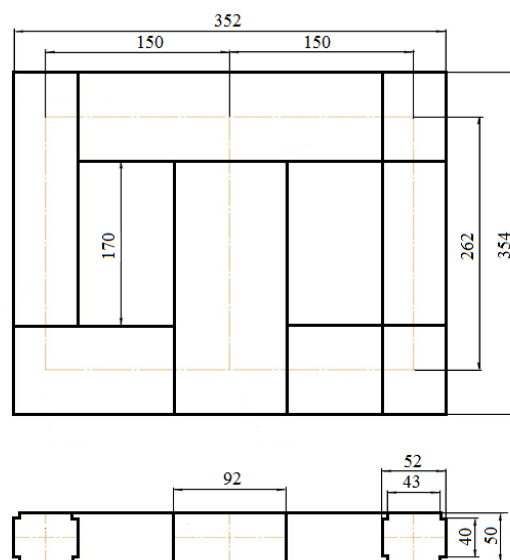
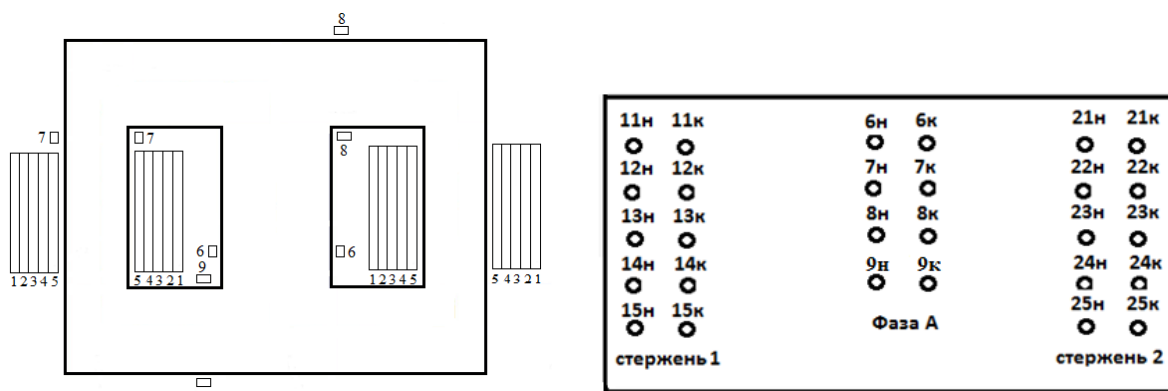


Рисунок 2.3 – Общий вид и размеры одной фазы физической модели реактора



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

В приложении Г (таблица Г.1 и рисунок Г.1) приведен график кривой намагничивания электротехнической стали марки 3409 толщиной 0,27 мм.

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.

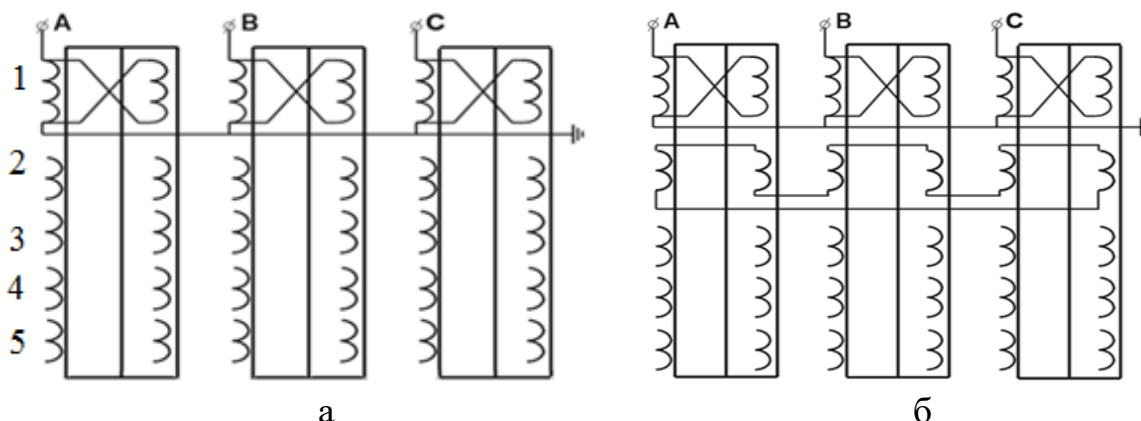


Рисунок 2.5 – Схемы соединения обмоток
а – сетевая обмотка, б – сетевая и компенсационная обмотки

Таблица 2.2 – Результаты опыта холостого хода

Фазы	Схема 2.6 а			Схема 2.6 б (число витков КО $W = 160$)		
	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 фазового напряжения и неидентичностью конструкций каждой фазы модели реактора, связанной с отклонением числа витков и сечений участков (стержней и ярем) магнитопровода.

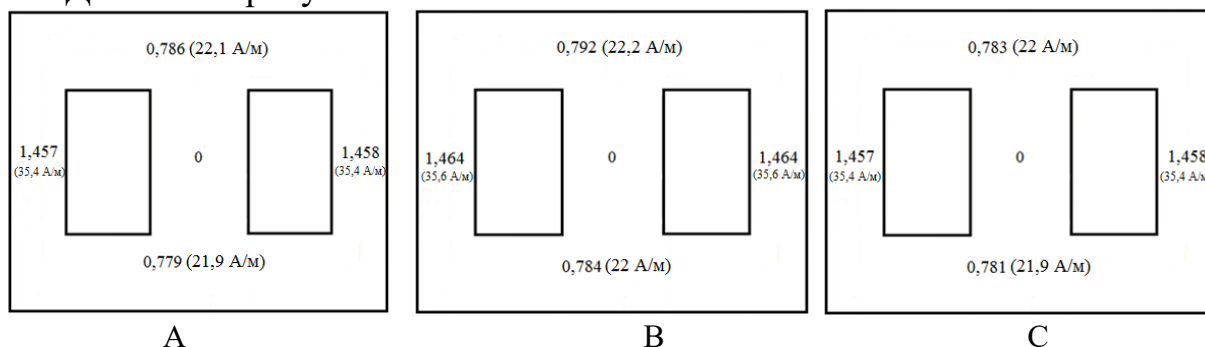
Значение магнитной индукции на участках магнитопровода реактора рассчитывалась согласно следующей формуле:

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

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



Для схемы рисунка 2.5 б

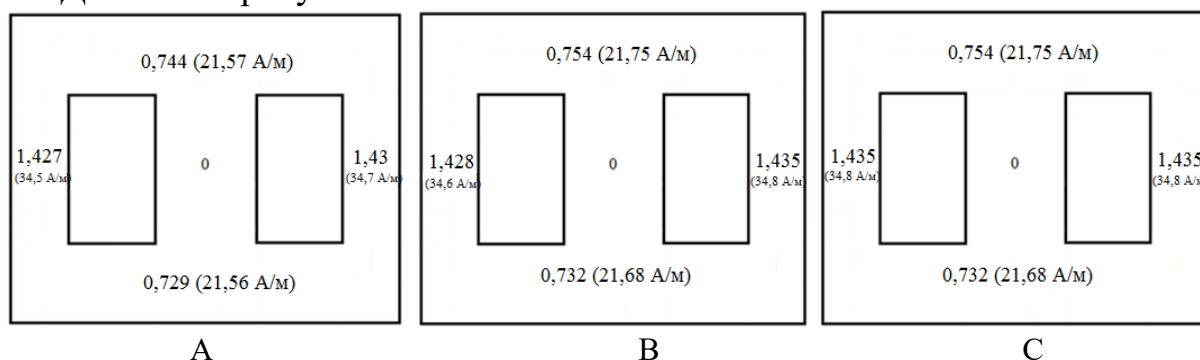


Рисунок 2.6 – Значение магнитной индукции по участкам магнитопровода

На рисунках 2.7, 2.8 представлены скриншоты кривых и график гармонического состава тока холостого хода сетевой обмотки при отсутствии компенсационной обмотки (схема 2.5 а).

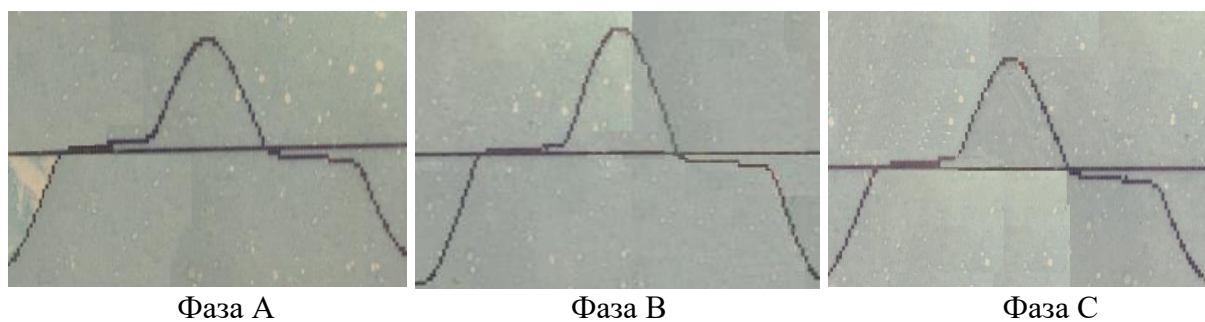


Рисунок 2.7 – Формы кривых тока холостого хода сетевой обмотки

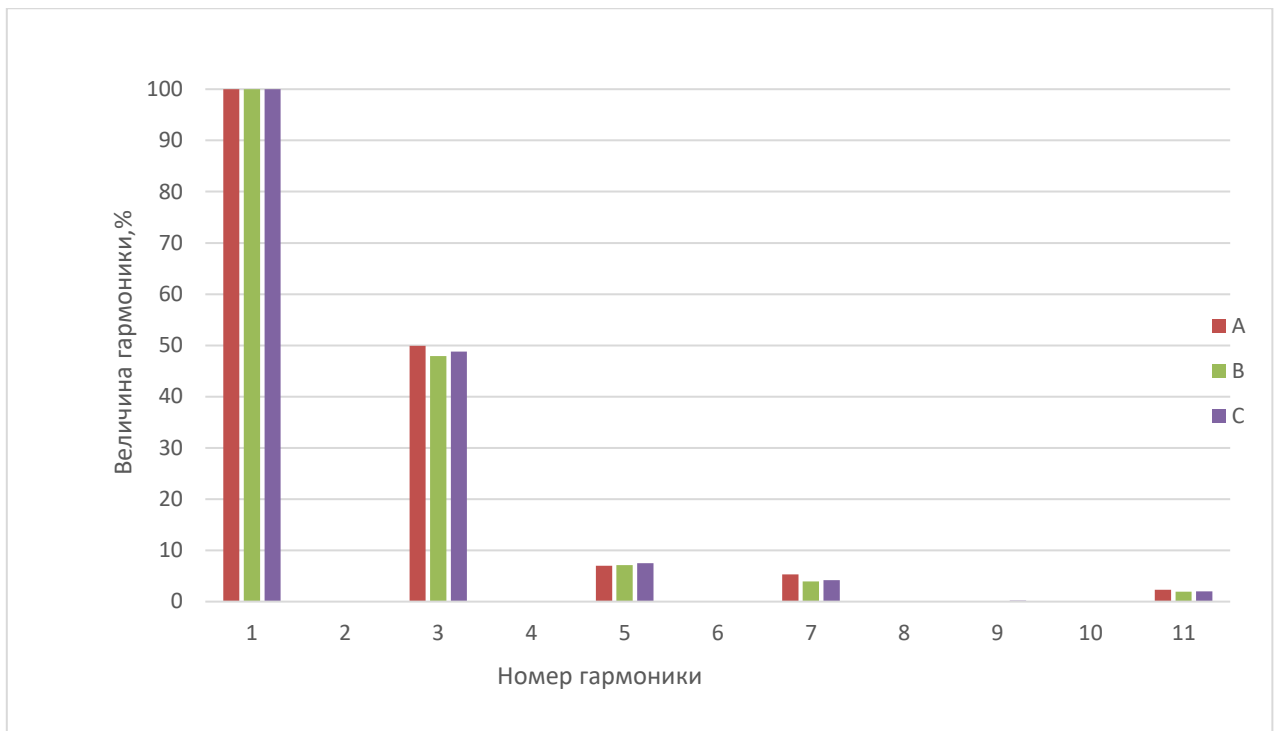


Рисунок 2.8 – График гармонического состава фазных токов холостого хода сетевой обмотки при отсутствии компенсационной обмотки

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

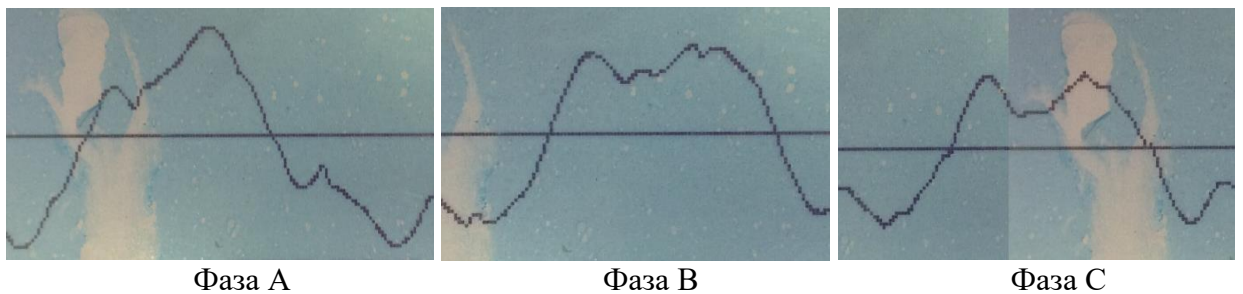


Рисунок 2.9 - Скриншоты кривых тока холостого хода сетевой обмотки



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.

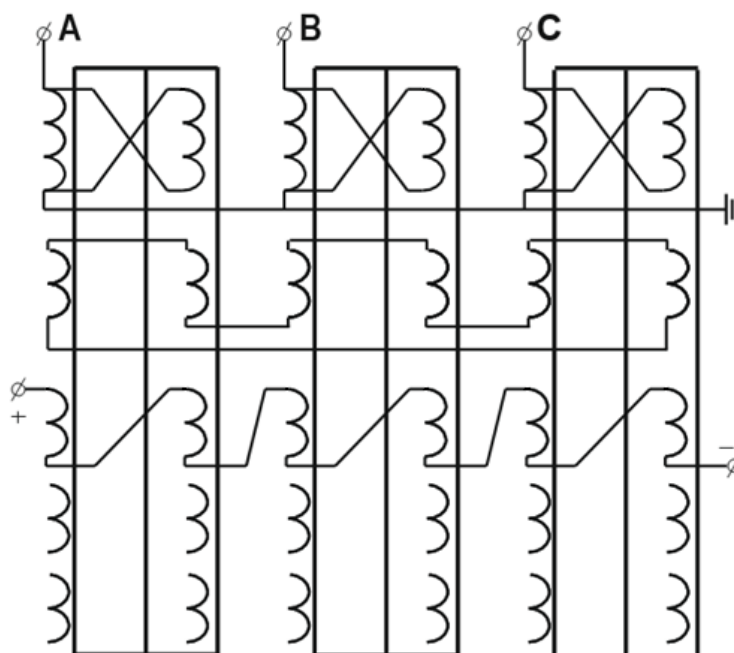


Рисунок 2.11 – Схемы соединения обмоток УШР

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	А	В	С
Напряжение СО, В	219,3	226,8	224,4
Ток СО I, А	5,6	5,9	5,7

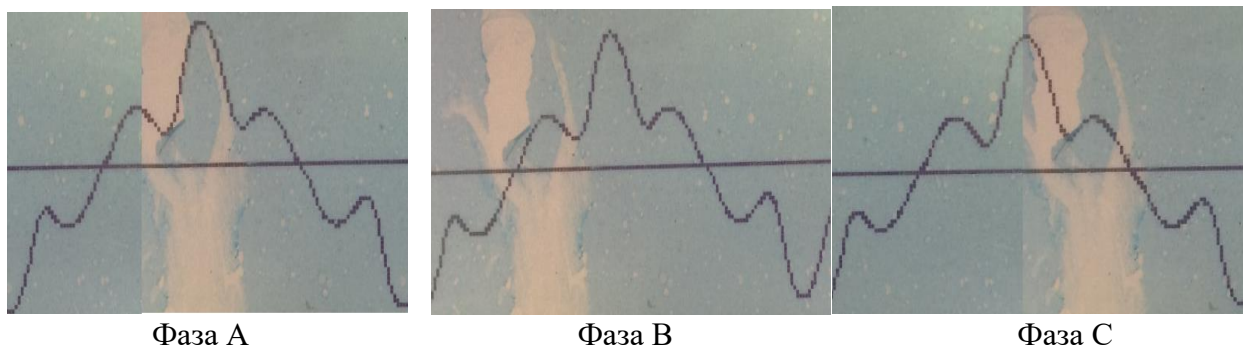


Рисунок 2.12 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 6 А

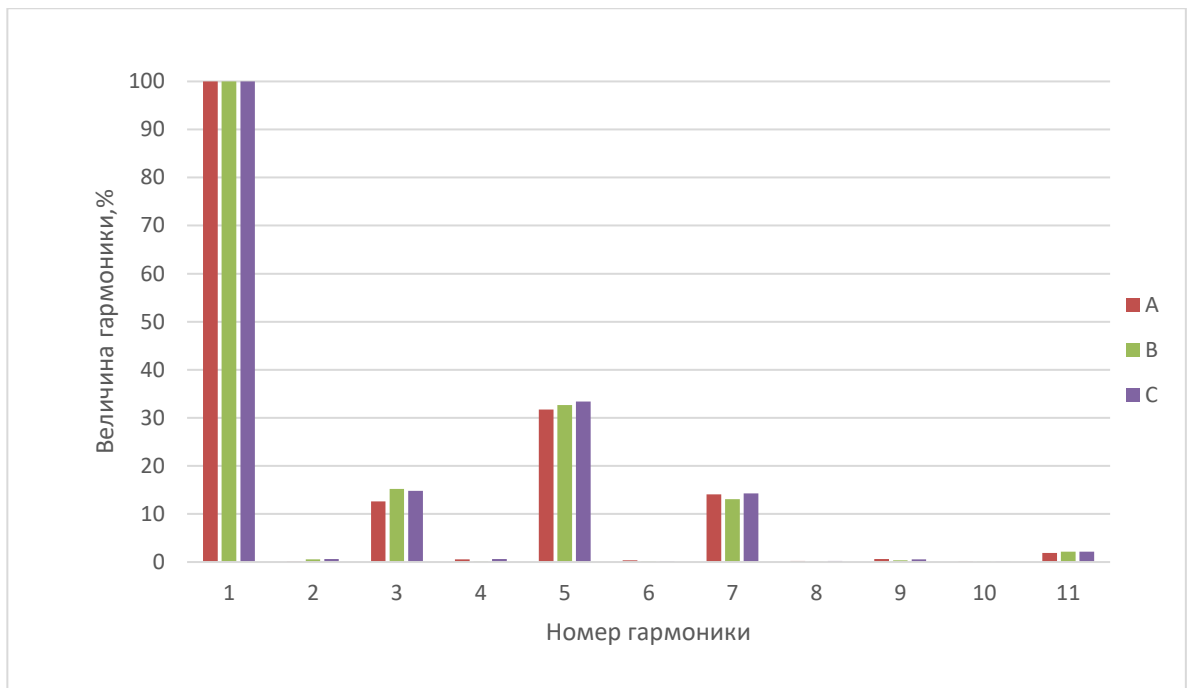


Рисунок 2.13 – Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 6 А

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

Значения напряжения 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	217,44	226,25	223,62
Ток СО I, А	9,527	9,676	9,367

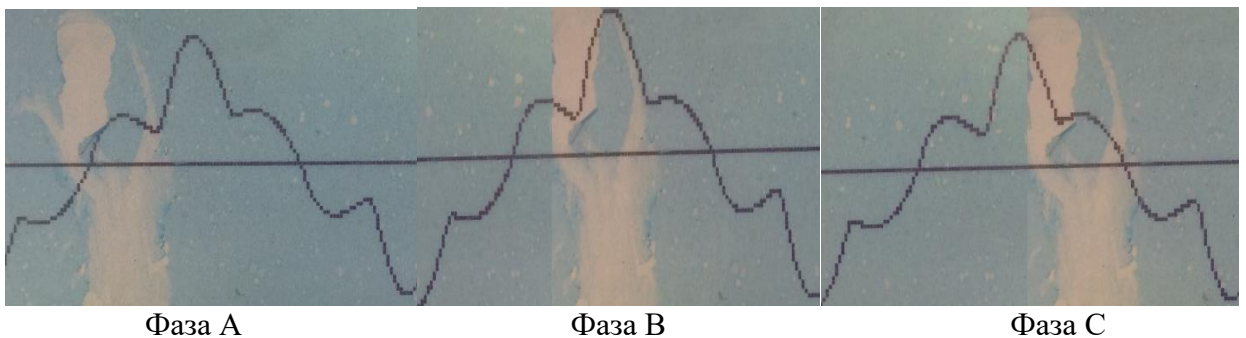


Рисунок 2.14 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 10 А

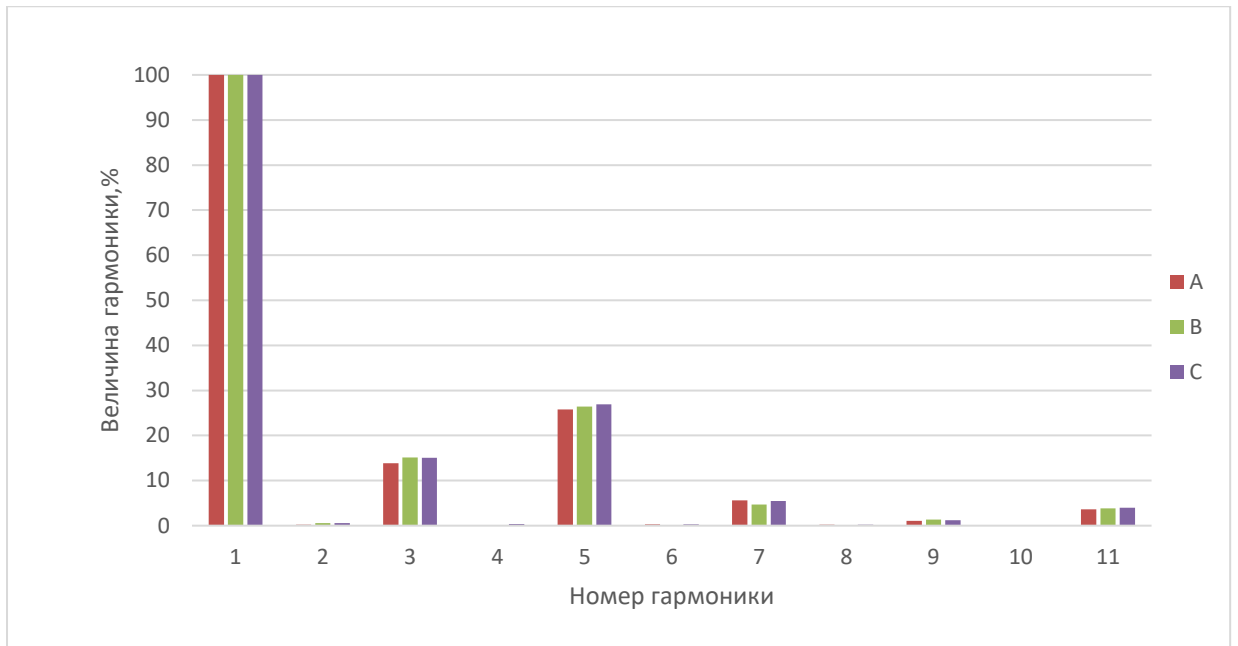


Рисунок 2.15 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 10 А

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. Скриншот 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	217,26	226,04	223,32
Ток СО I, А	14,134	14,117	13,885

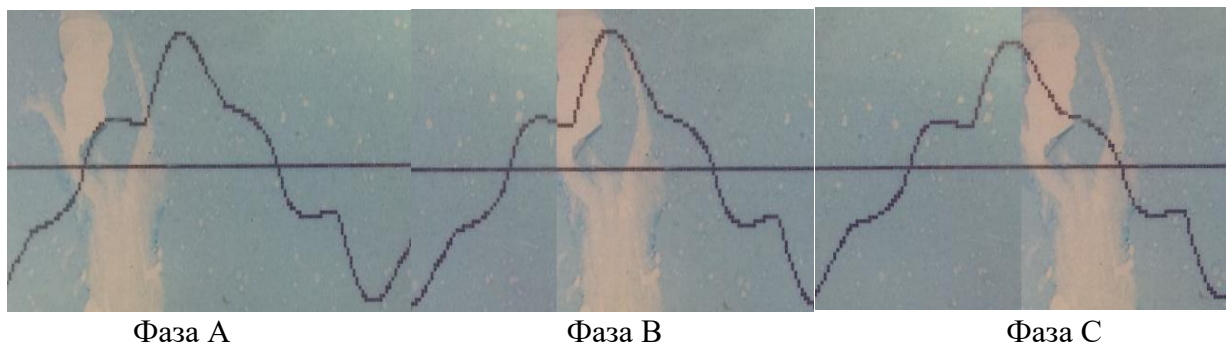


Рисунок 2.16 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 15 А

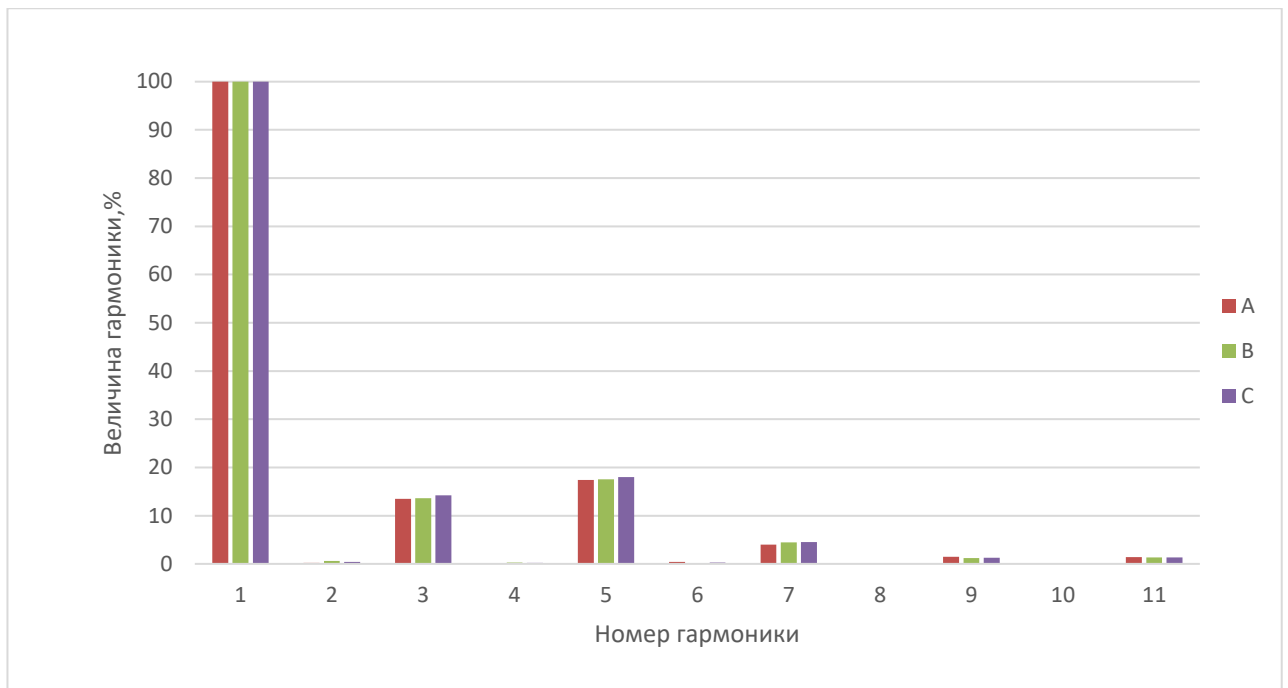


Рисунок 2.17 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 15 А

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	A	B	C
Напряжение CO, В	217,6	225,28	222,21
Ток CO I, А	18,679	18,42	18,303

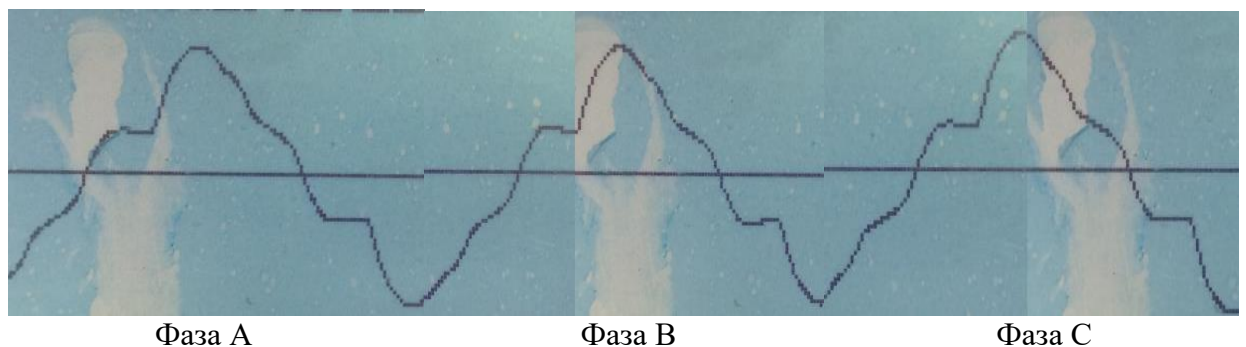


Рисунок 2.18 - Форма кривой тока сетевой обмотки при подмагничивании 20 А

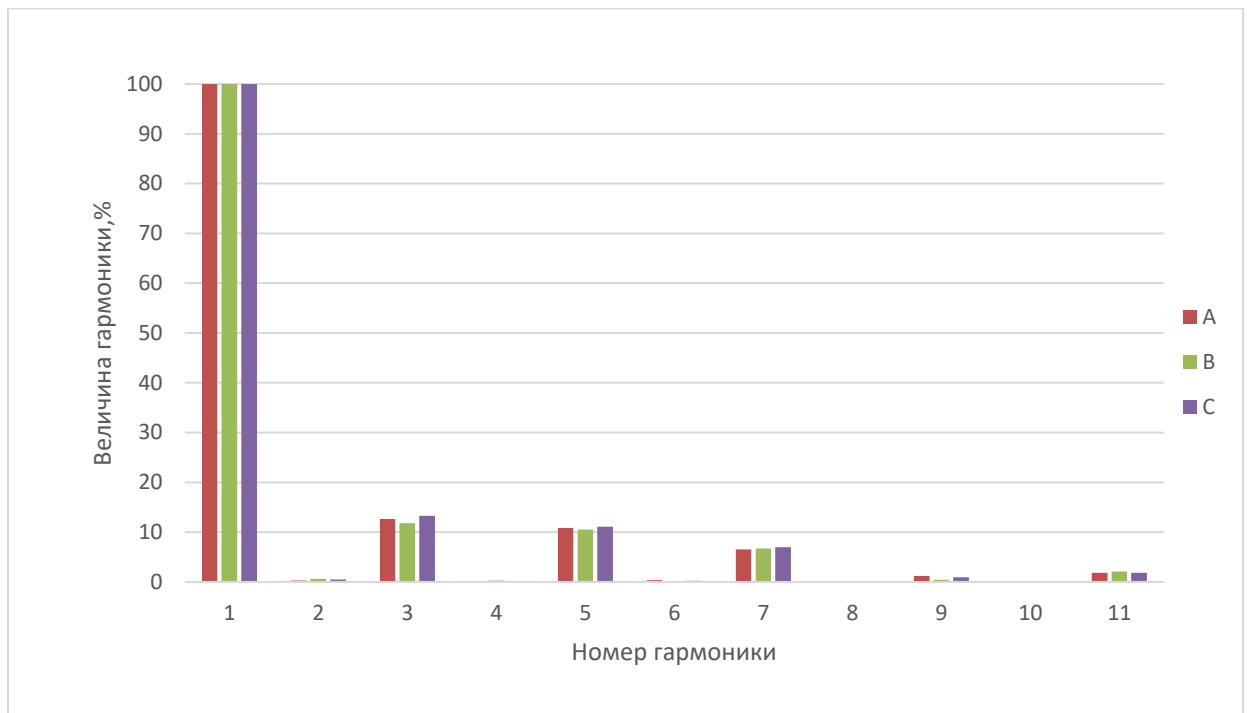


Рисунок 2.19 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании 20 А

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 ходе). 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 [25].

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 [50-55], PSCAD с использованием трансформаторов UMES [56-59], EMTP [60, 61] и др. Ранее автором была проделана работа по моделированию работы шунтирующего реактора в программе PSCAD [25]. 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 [62, 63] с использованием Matlab Simulink, [61] с использованием EMTP и [64] 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.

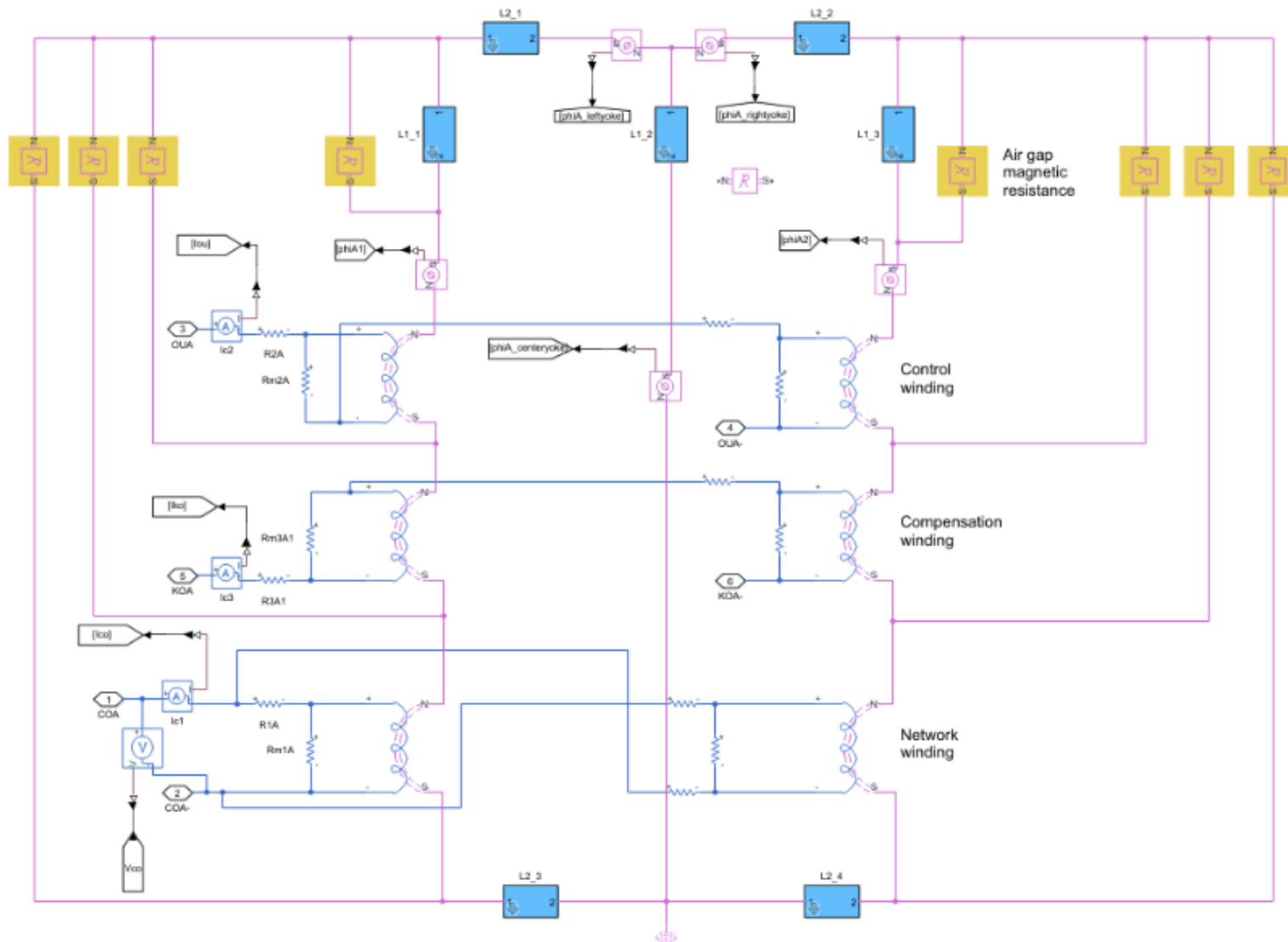


Рисунок 3.1 - Модель однофазного УШР с магнитной (розовой) и электрической (синей) цепями.

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.

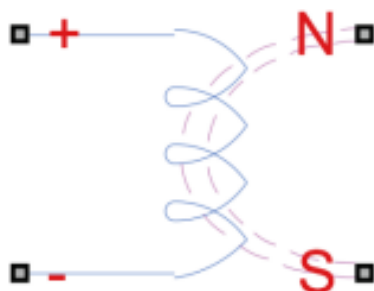


Рисунок 3.2 - Блок электромагнитного преобразователя библиотеки Simscape Foundation

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

$$\begin{cases} mmf = N \cdot I \\ V = -N \cdot \frac{\delta\varphi}{\delta t} \end{cases}$$

где: ММФ – магнитодвижущая сила;

N - количество витков и обмоток моделируемого шунтирующего реактора;

V - напряжение.

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 $R3A1$, $R2A$ и $R1A$ эквивалентны электрическому сопротивлению вышеуказанных обмоток.

Сопротивления $Rm1A$, $Rm3A1$ и $Rm2A$ 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.

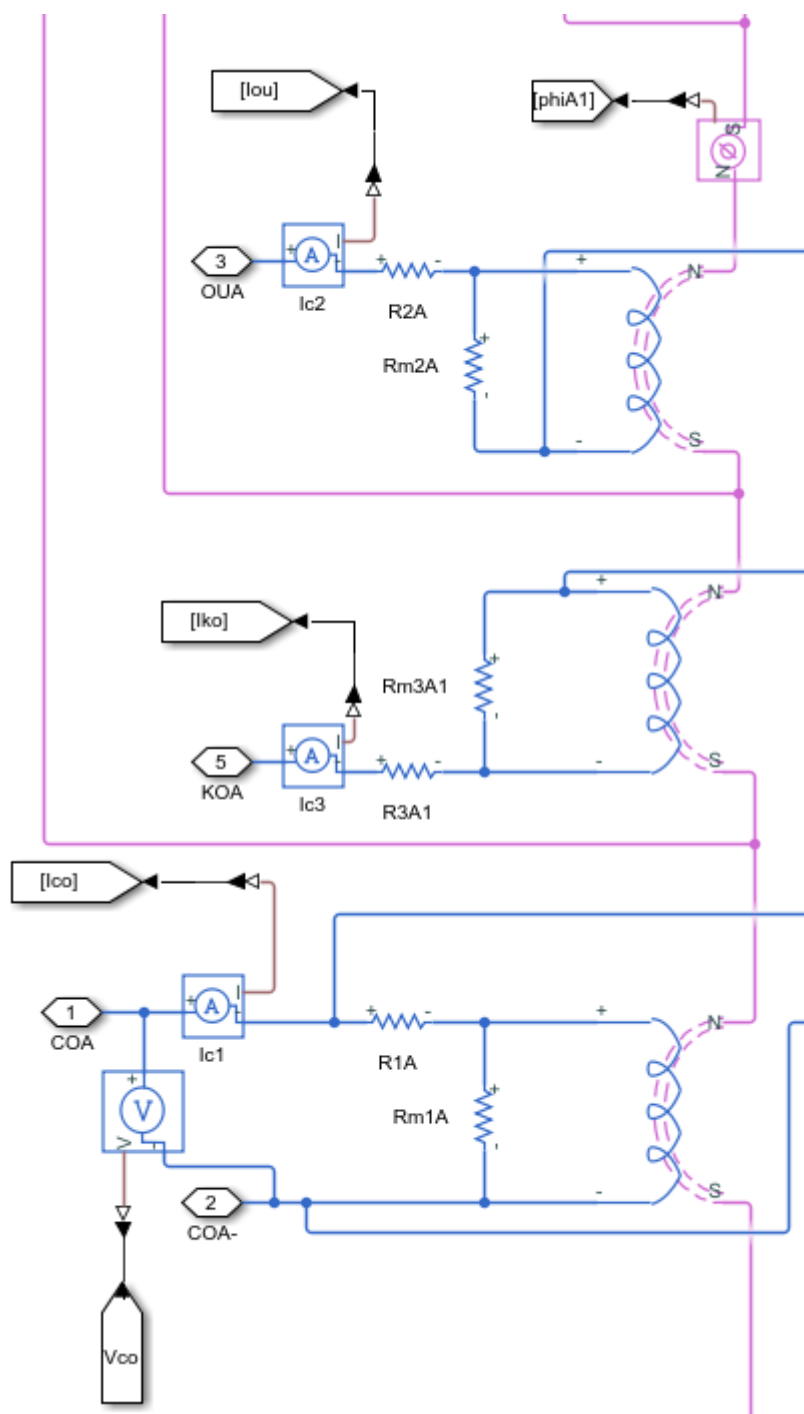


Рисунок 3.3 – Увеличенная фаза обмотки управления и компенсационной, сетевой обмоток

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.

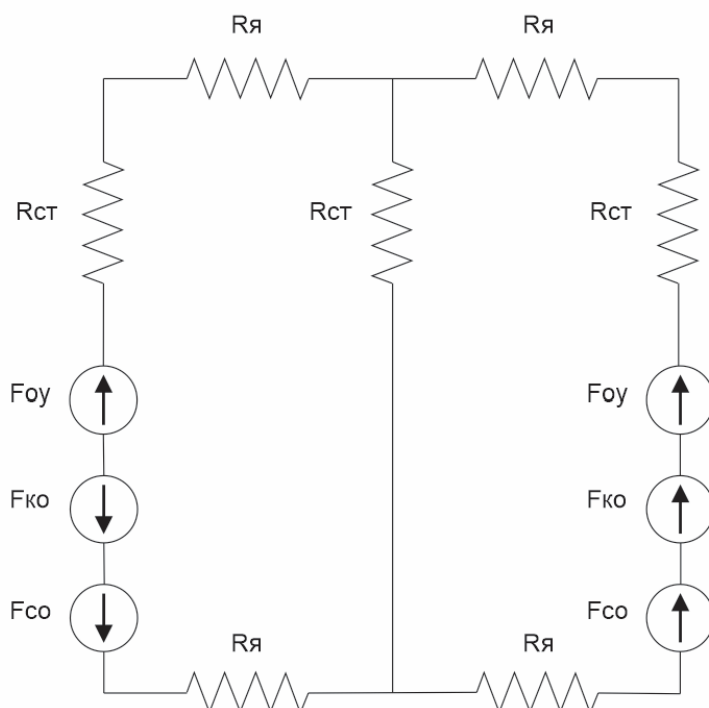


Рисунок 3.4 - Электрическая схема замещения магнитопровода MCR

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.

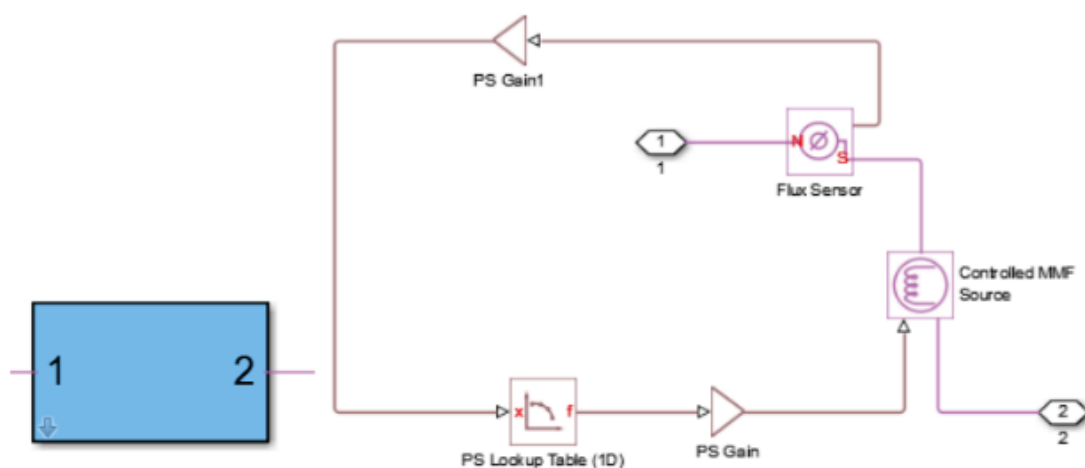


Рисунок 3.5 - Подсистема модели сопротивления магнитопровода (слева) и расширенная (справа)

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 [30].

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.

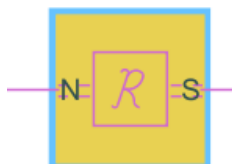


Рисунок 3.6 – Линейное магнитное сопротивление

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 - a. 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).

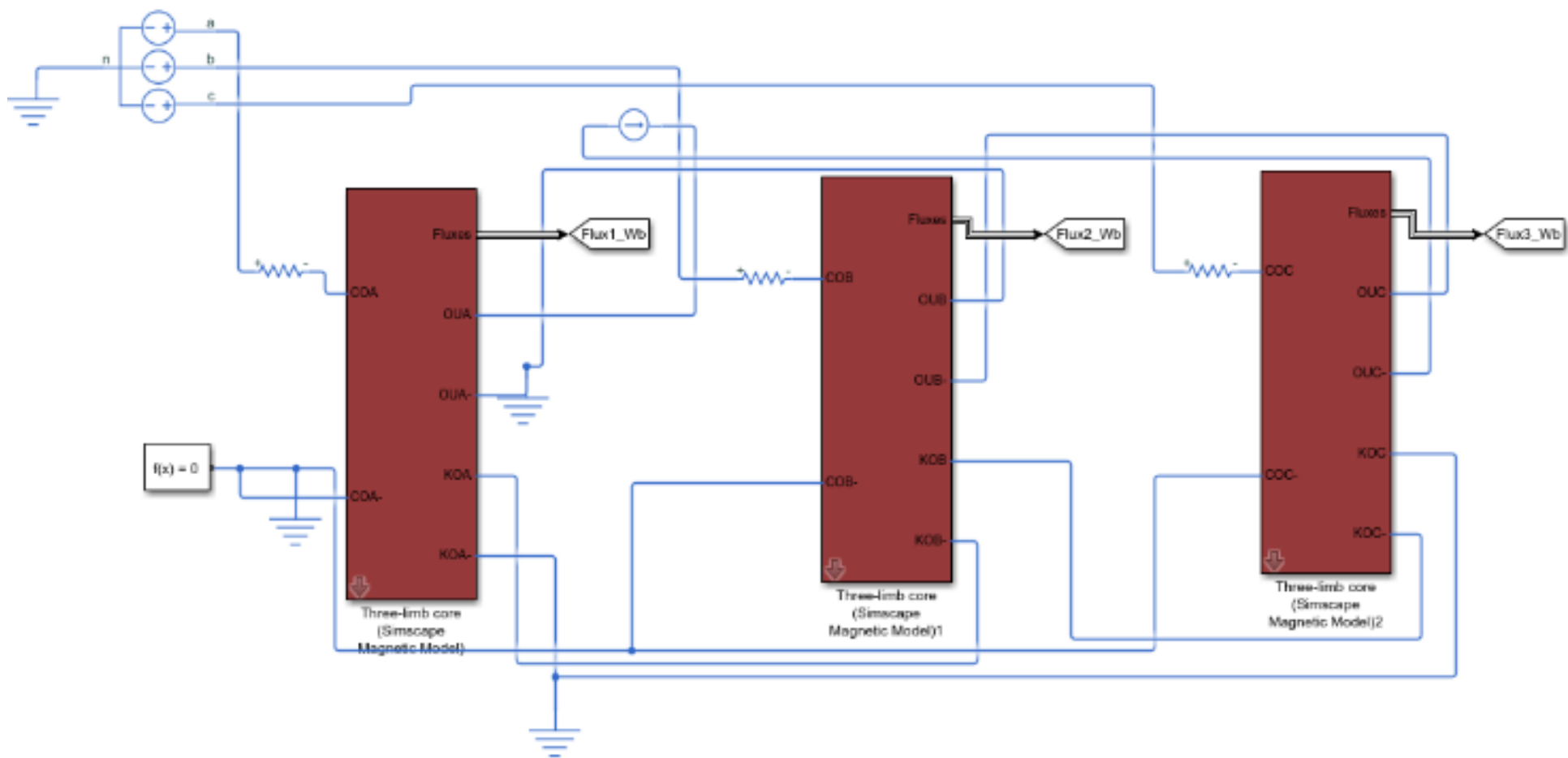


Рисунок 3.7 - Общая схема модели шунтирующего реактора с групповым управлением

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.

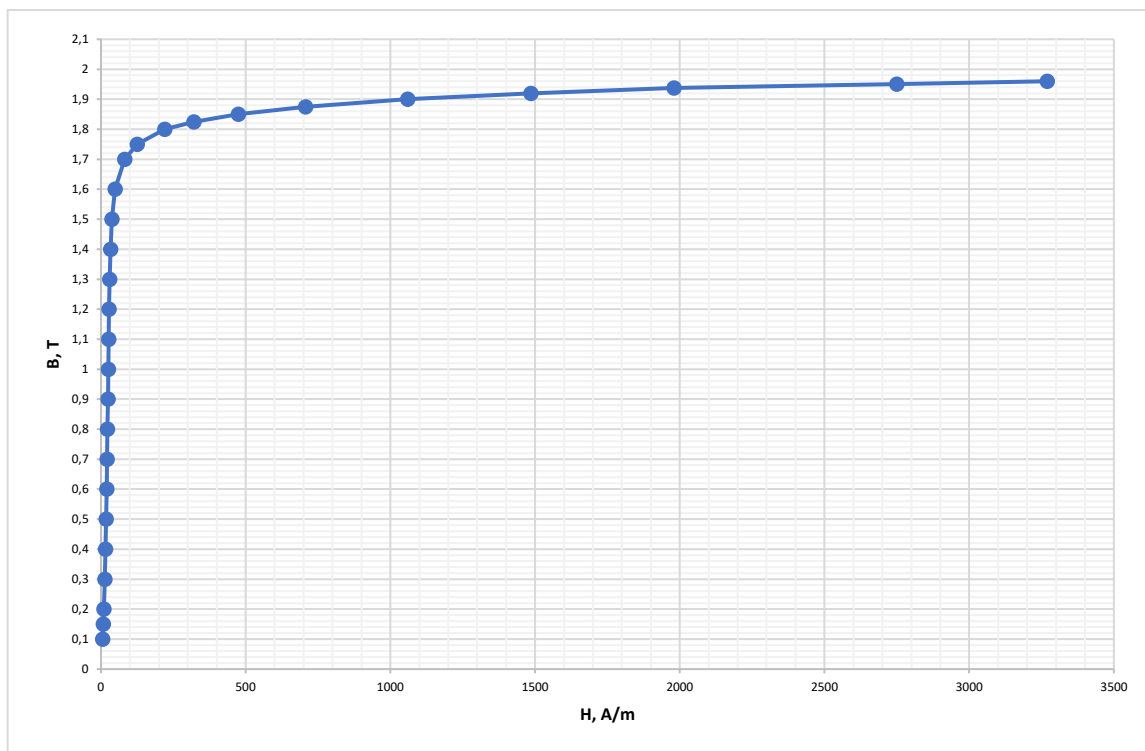
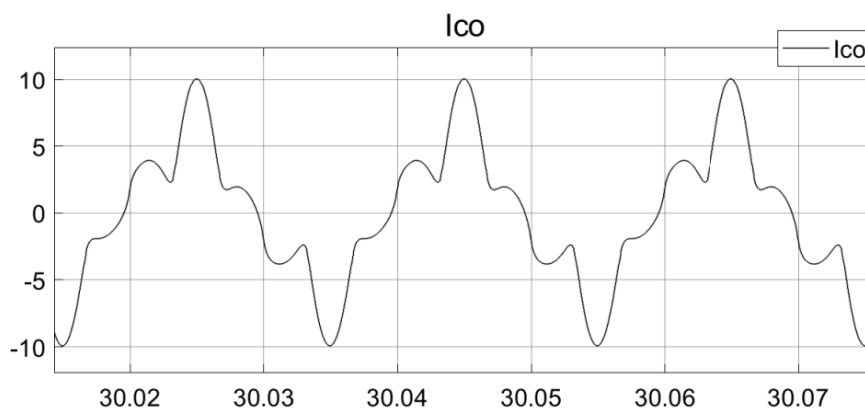


Рисунок 3.8 - Кривая намагничивания стали марки 3409 толщиной 0,27 мм

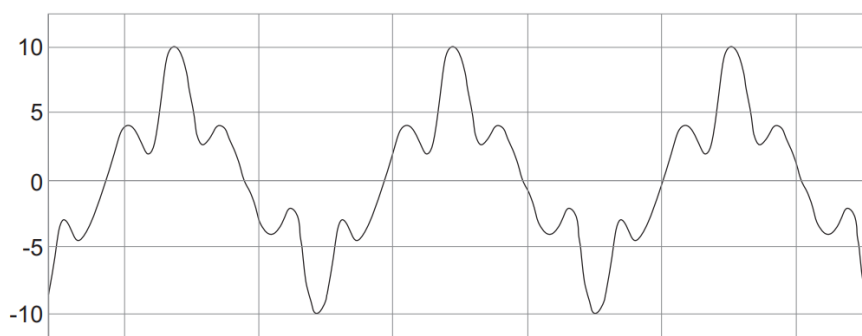
3.2 Проверка полученных результатов моделирования работы трехфазного УШР в Matlab Simulink с экспериментальными исследованиями.

Модель шунтирующего реактора, разработанная 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.

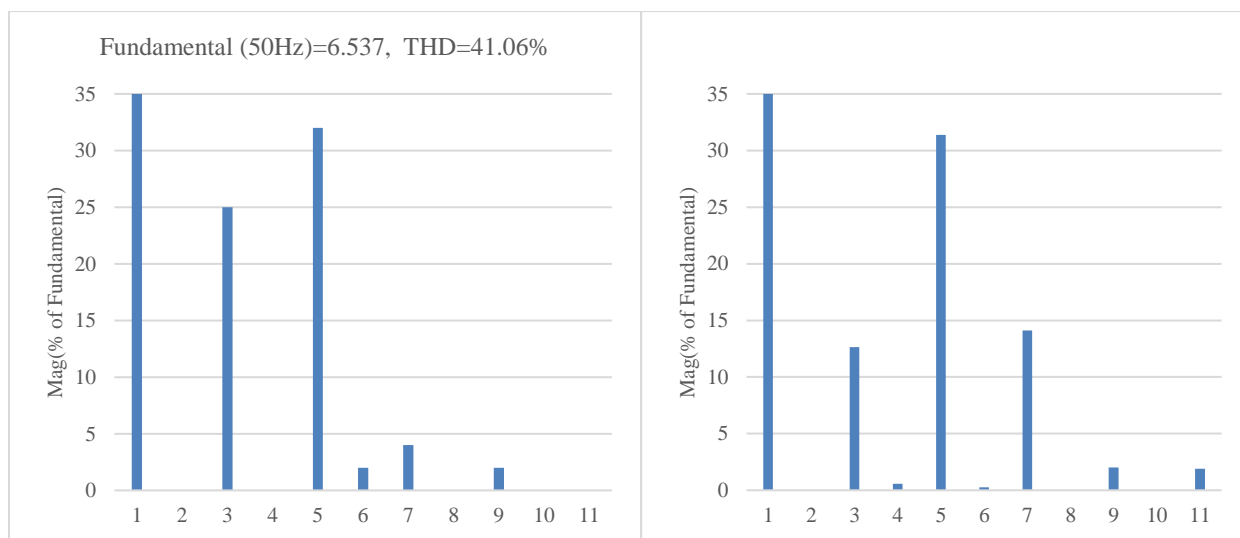


а



б

Рисунок 3.9 - Кривые токов сетевой обмотки при подмагничивании 6 А ($F_0 = 558$ А) математической модели (а) и физической модели (б).

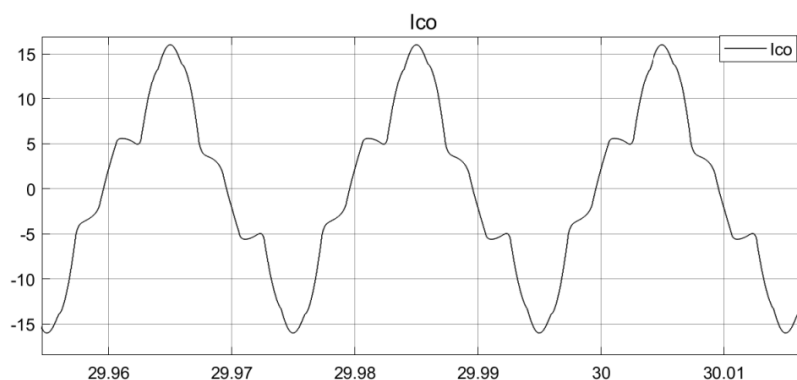


а

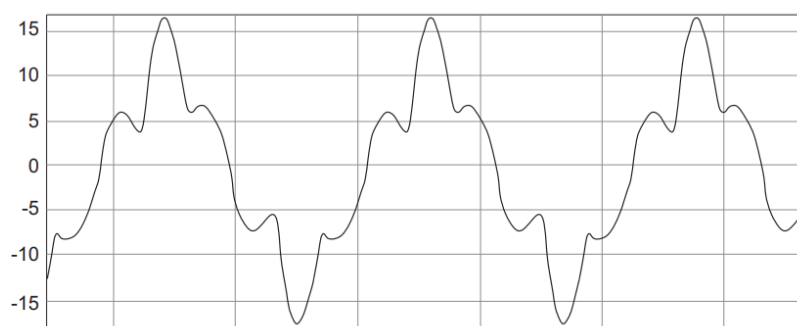
б

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

Коэффициент гармоник (THD) по результатам экспериментальных исследований составляет 39,47%. По результатам имитационного моделирования он составляет 41%.

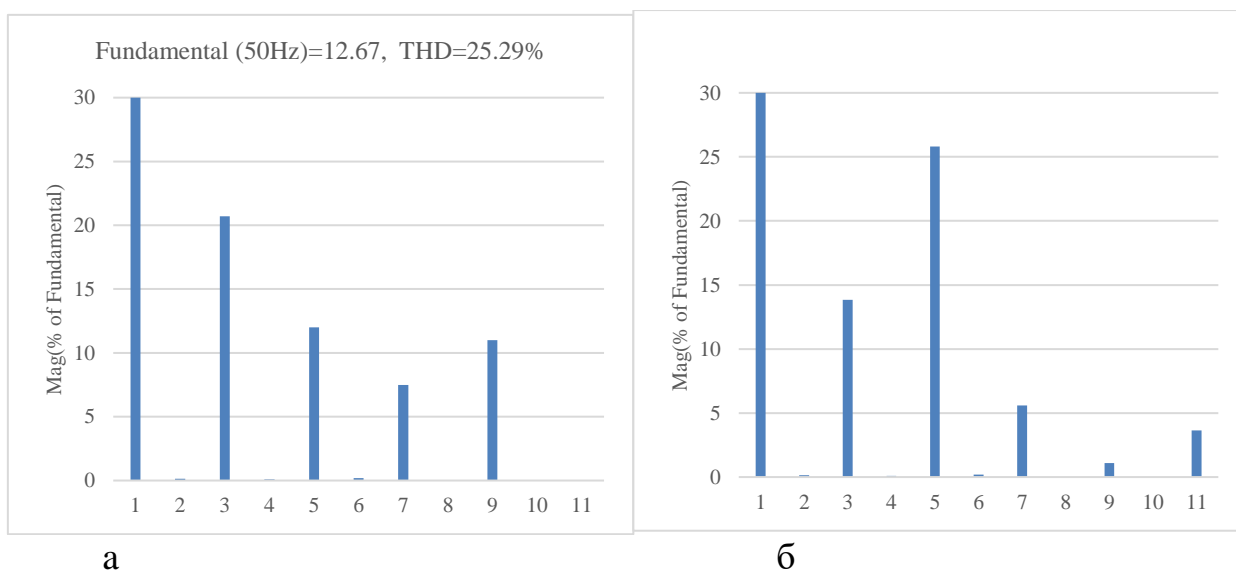


а



б

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

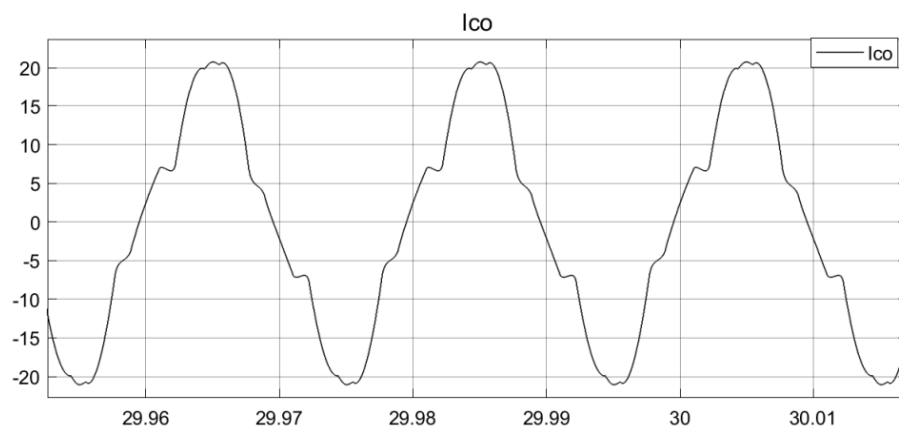


а

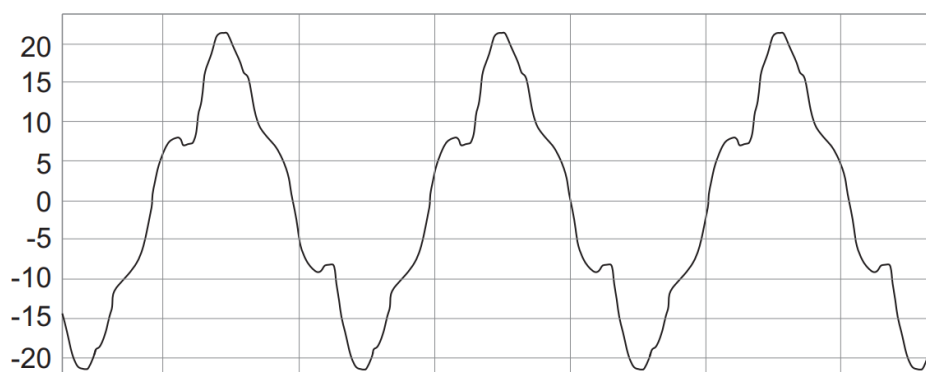
б

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

Коэффициент гармоник по результатам экспериментальных исследований составляет 26,4%. По результатам имитационного моделирования он составляет 25,43%.

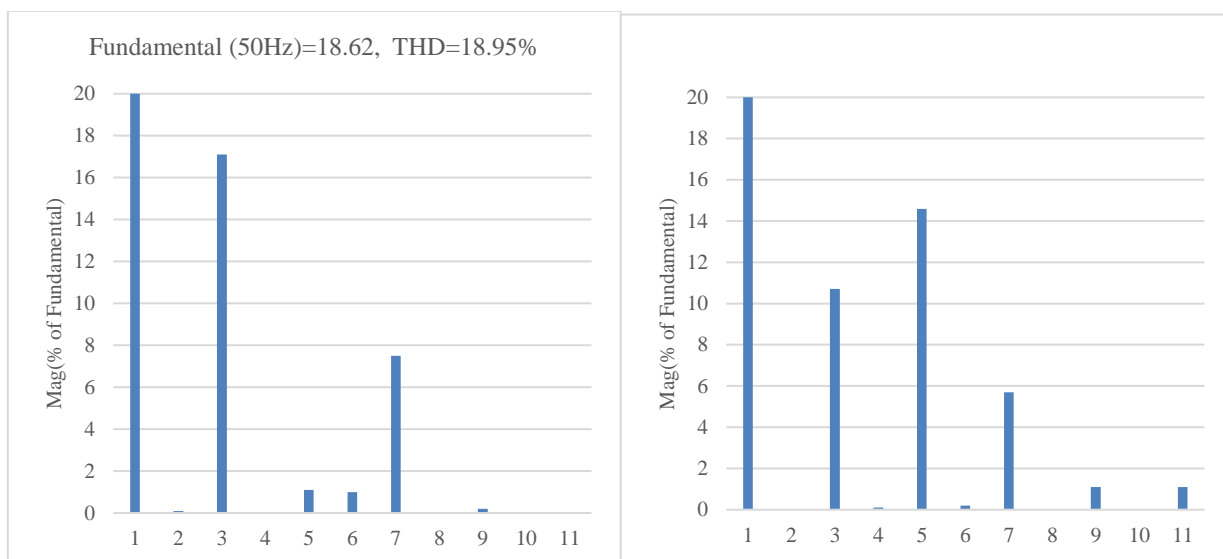


а



б

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



а

б

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

Коэффициент гармоник по результатам экспериментальных исследований составляет 19,14%. По результатам имитационного

моделирования он составляет 19,18%.

Обобщаем анализ результатов сравнения в таблицах № 3.1 и № 3.2.

Таблица 3.1 – Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных исследований

Ток подмагничивания	Ток сетевой обмотки при экспериментальных исследованиях	Ток сетевой обмотки при моделировании	Отклонение, %
0, А	0.88	0.82	6.8
5, А	5.8	6.1	5
10, А	10.1	10.63	5
15, А	15.69	16.2	3.15

Таблица 3.2 – Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных исследований

Ток подмагничивания	THD при экспериментальных исследованиях	THD при моделировании	Отклонение, %
0, А	-	-	-
5, А	39.47	41	3.7
10, А	26.4	25.43	3.7
15, А	19.14	19.18	0.03

В работе [7] 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.

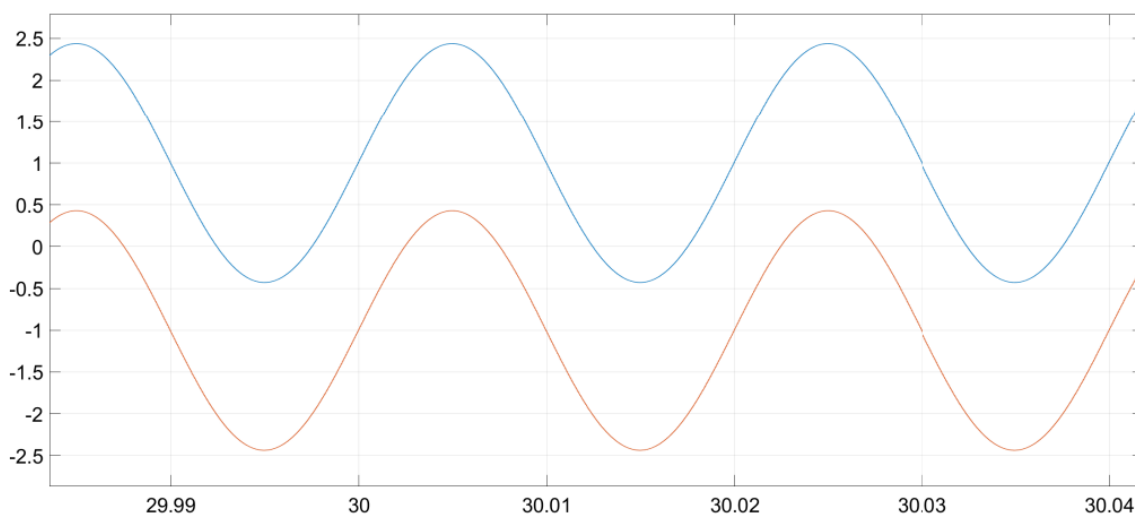


Рисунок 3.15 - Индукция в стержнях шунтирующего реактора при подмагничивании 15 А ($F_0 = 1395$ А)

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 мм^2 . Конечное значение постоянного тока в обмотке управления составило 90 А . Дальнейшее увеличение постоянного тока в обмотке управления увеличивает состав гармоник тока сетевой обмотки.

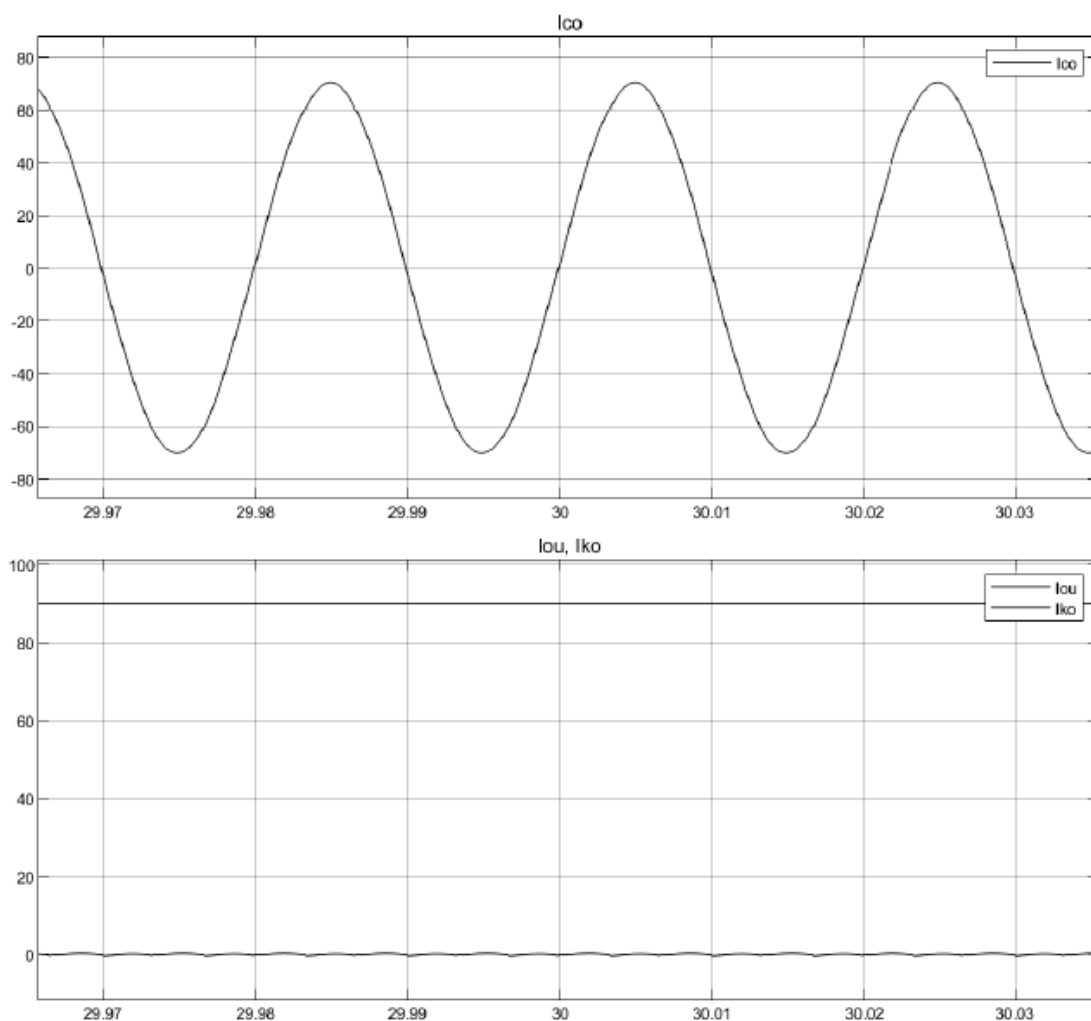


Fig. 14. The curve of the network, control and compensation windings currents at a DC of 90 А ($F_0 = 8370 \text{ А}$), was obtained on a mathematical model

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

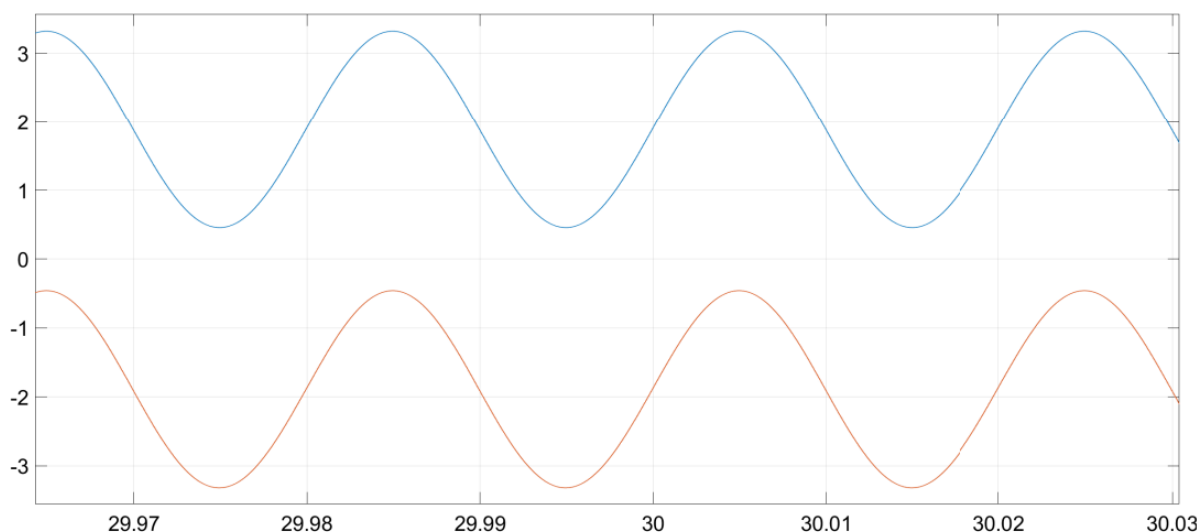


Рисунок 3.17 - Индукция в стержнях шунтирующего реактора при подмагничивании постоянным током 90 А ($F_0 = 8370$ А)

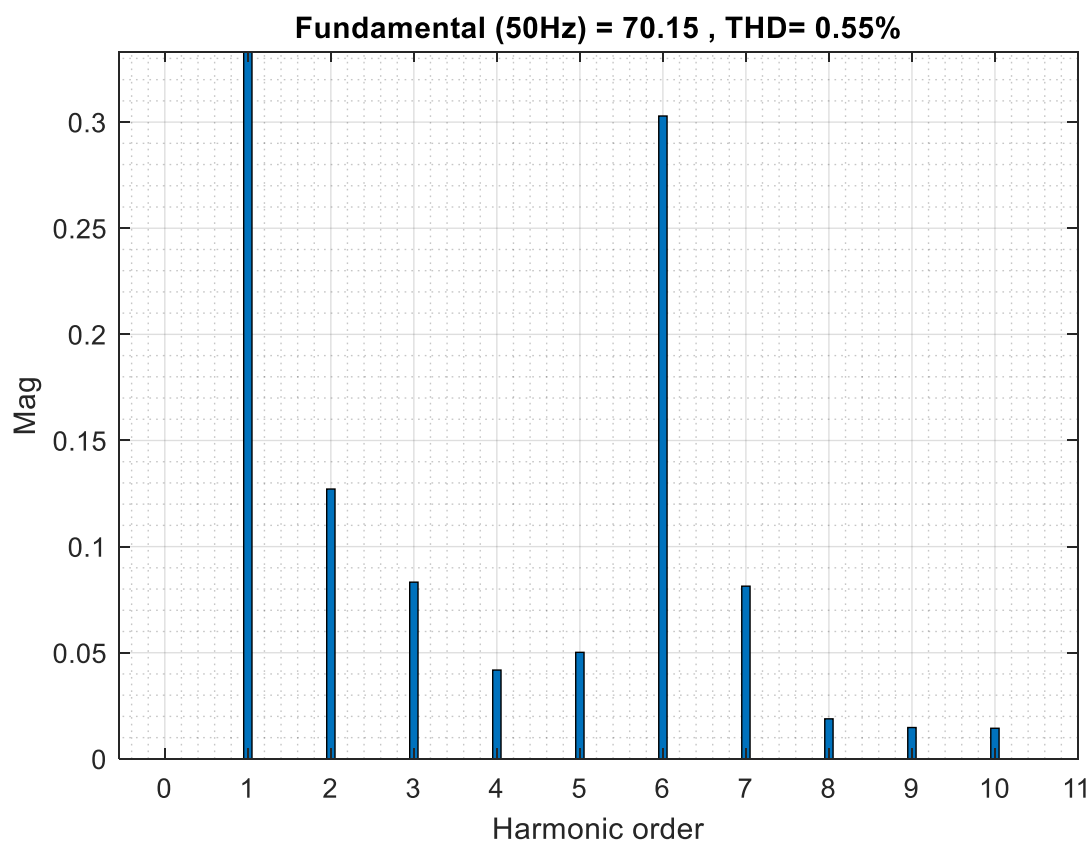


Рисунок 3.18 - Гармонический состав тока сетевой обмотки при подмагничивании постоянным током 90 А ($F_0 = 8370$ А), полученный на математической модели

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.

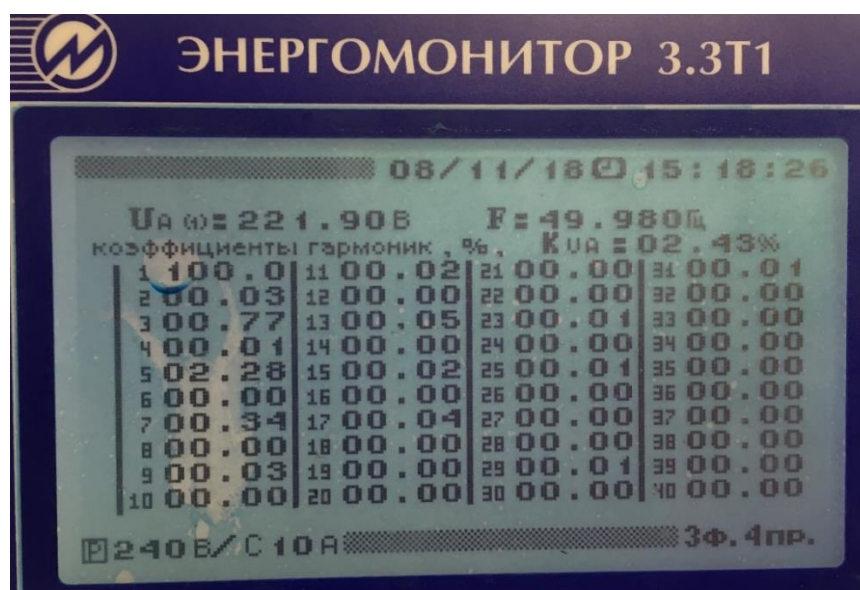


Рисунок 3.19 – Гармонический состав напряжения фазы А сети

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

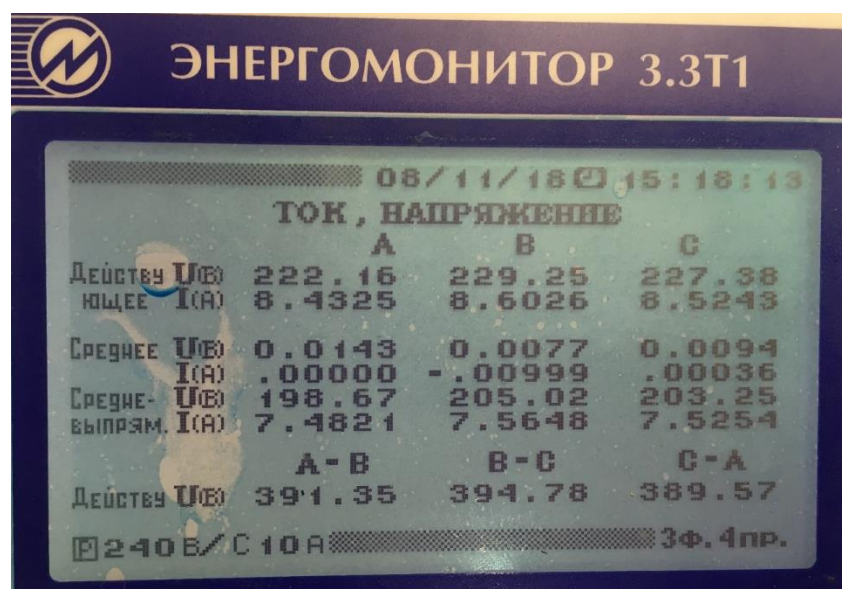


Рисунок 3.26 – Значение напряжения сети при проведении экспериментальных исследований (напряжение фаз A=222,16 В, B=229,25 В, C = 227,38 В)

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 20 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 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 $-0,115526 \text{ мм}^2$ 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

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

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

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

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

количество витков обмотки НН – 268;

номинальная намагничивающая сила обмотки НН

$$F_{\Phi HH} = I_{\Phi HH} \cdot W_{\Phi HH} = 317 \cdot 268 = 84960 \text{ А}$$

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 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

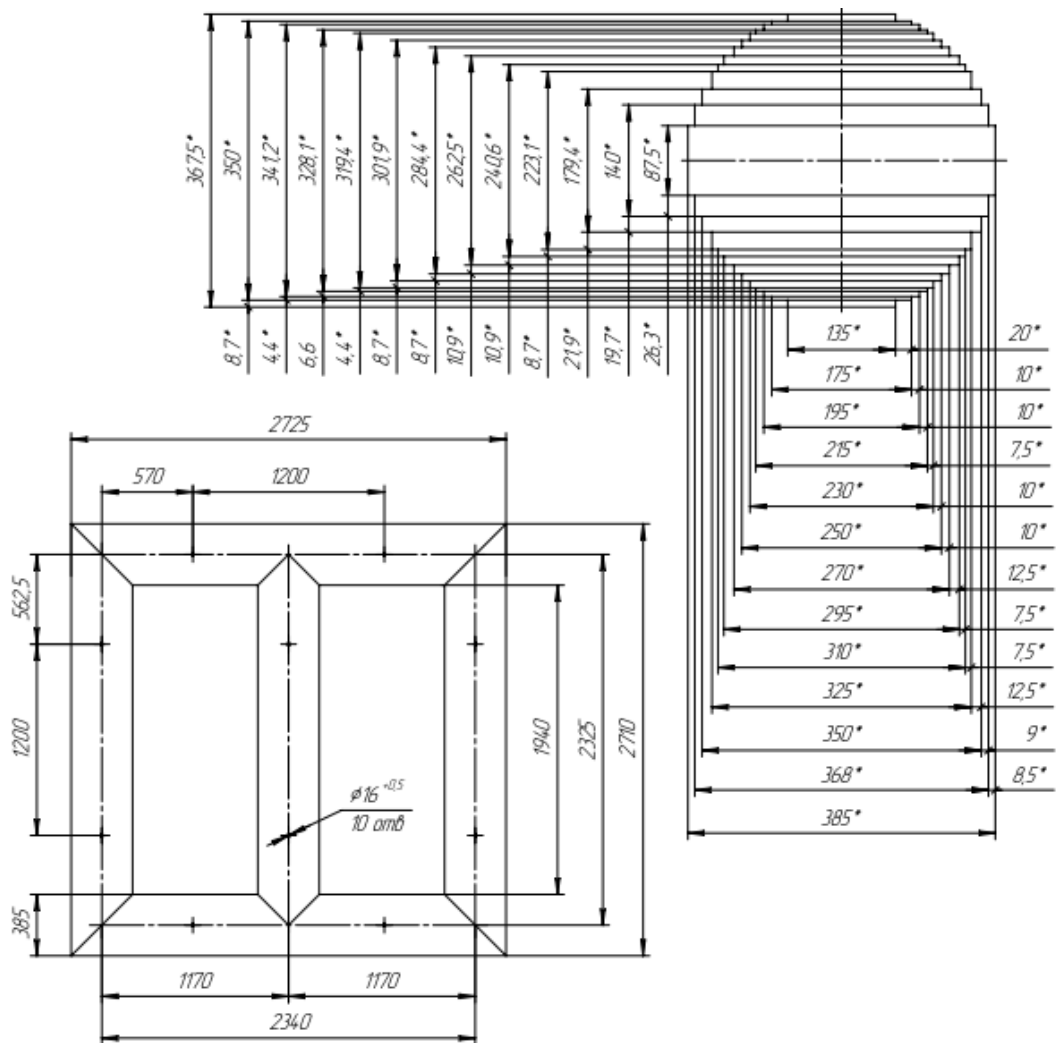


Рисунок 4.1 – Геометрические размеры магнитопровода, трансформатора ТДТН 10 000 -110/35/10 с алюминиевыми обмотками

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

$$I_{\Phi BH} = \frac{S_{\Phi}}{U_{\Phi}} = \frac{5,333 \cdot 10^3}{66,47} = 80,23 \text{ А.}$$

2. Номинальный ток обмотки НН, соединенной в треугольник

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

2. Номинальная намагничивающая сила первичной обмотки

$$F_{\Phi ВН} = I_{\Phi ВН} \cdot W_{\Phi ВН} = 80,23 \cdot 1280 = 102694 \text{ А}$$

3. Номинальная намагничивающая сила обмотки НН

$$F_{\Phi НН} = I_{\Phi НН} \cdot W_{\Phi НН} = 507,9 \cdot 212 = 107675 \text{ А}$$

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.

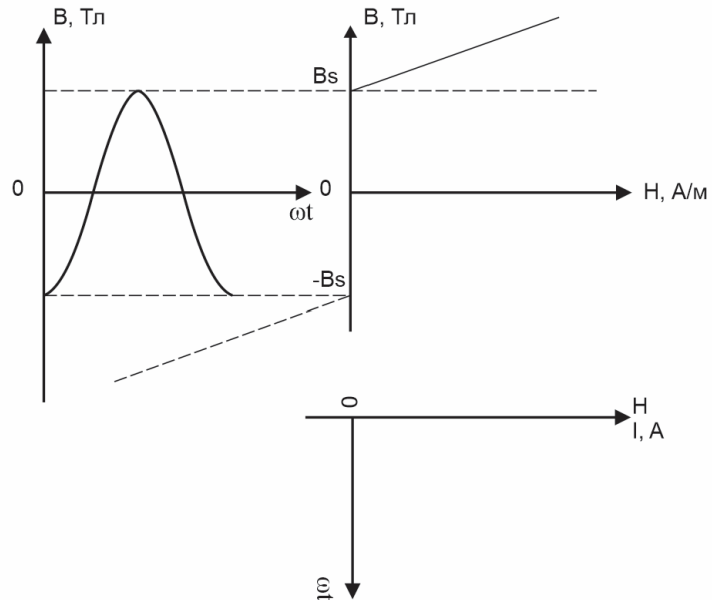


Рисунок 4.2 - Магнитный поток, напряженность магнитного поля и ток сетевой обмотки в режиме х.х.

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.

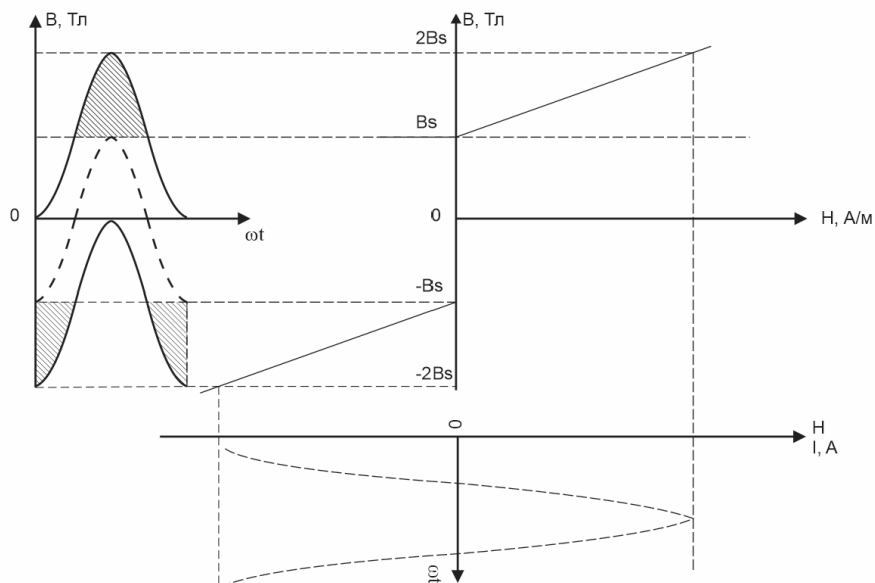


Рисунок 4.3 Магнитный поток, напряженность магнитного поля и выходной ток в режиме полупериодного насыщения
 Состояние 3: Максимальная мощность, степень насыщения.
 В этом случае индукция постоянного магнитного поля $B=B_s$, оба стержня I и II являются постоянно насыщенными.

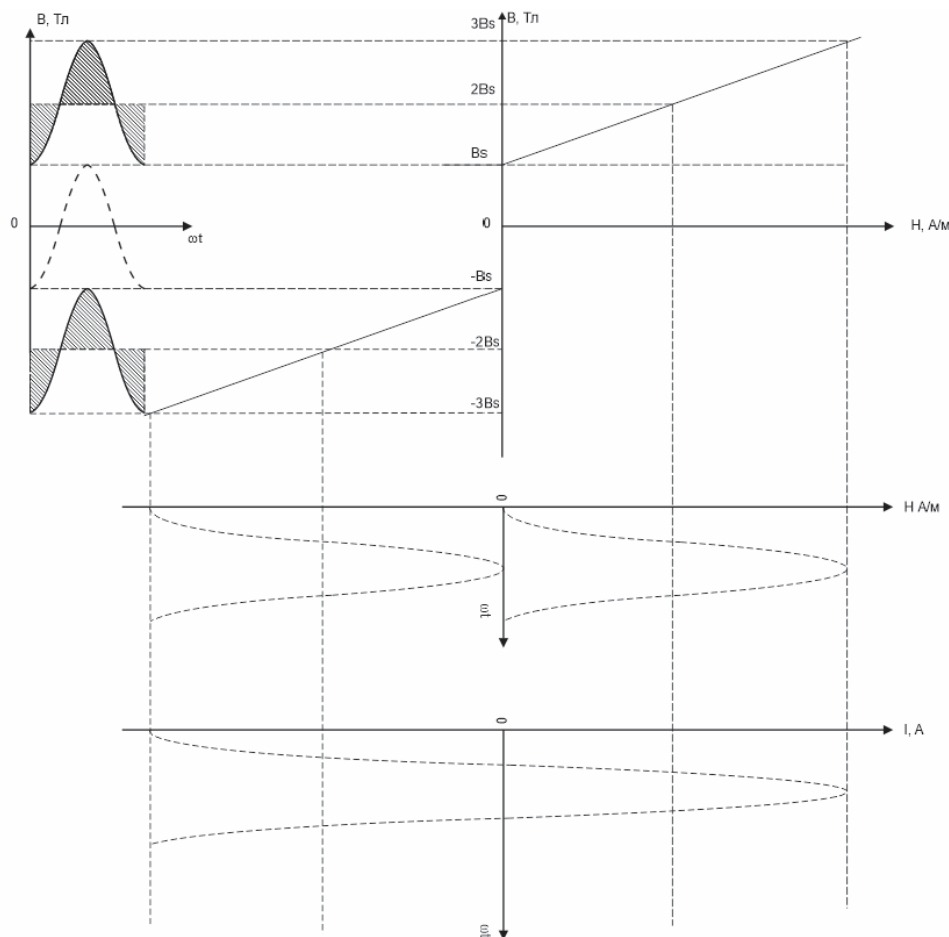


Рисунок 4.4 - Магнитный поток, напряженность магнитного поля и выходной ток в режиме периодного насыщения

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 [70] 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.

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

$n = 2, 3, 5.$

$$f(B_1(\omega t)) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t \leq \pi - \frac{\beta}{2} \\ \frac{B_{\text{насыщ}}(-\cos(\omega t) - \cos(\frac{\beta}{2}))}{\mu_0}, & \pi - \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq \pi + \frac{\beta}{2} \\ 0, & \pi + \frac{\beta}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4.4)$$

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

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

За базовое значение авторы статьи [The 500 kV MCSR Modeling and Steady-state Characteristics Analysis. Liang Yan-ping, Zhang Yue, Zhang Hai-ting, An Zhen. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. ISBN:978-1-4577-1043-8] 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 необходимо 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 равным 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 [5].

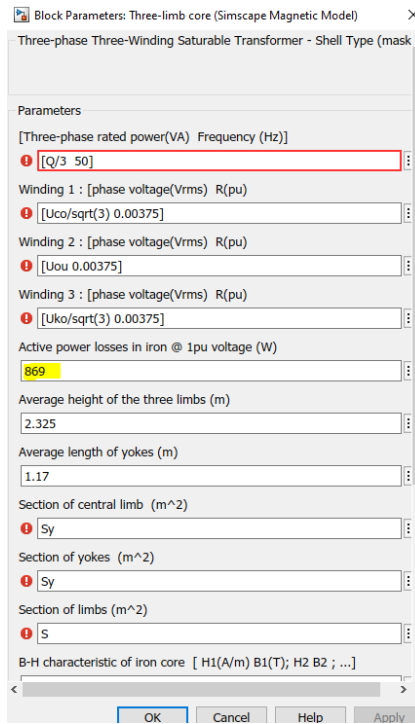


Рисунок 4.5 – параметры модели реактора

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

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

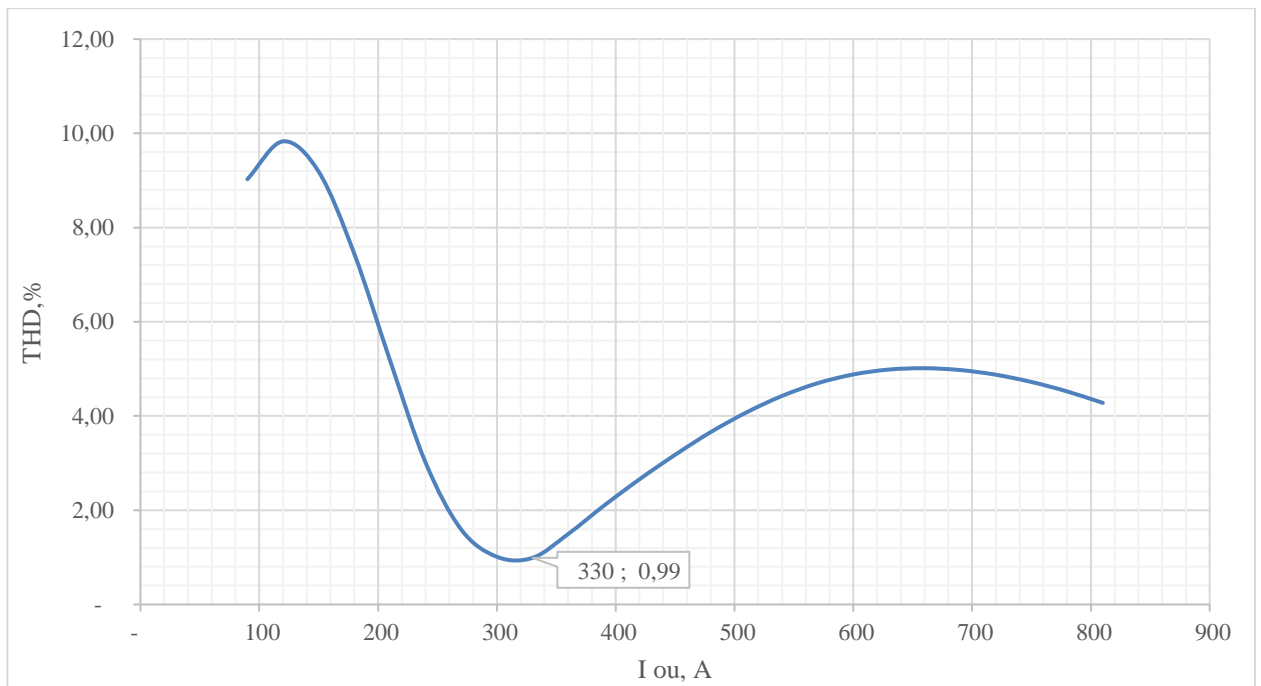


Рисунок 4.6 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,22643 \text{ м}^2$

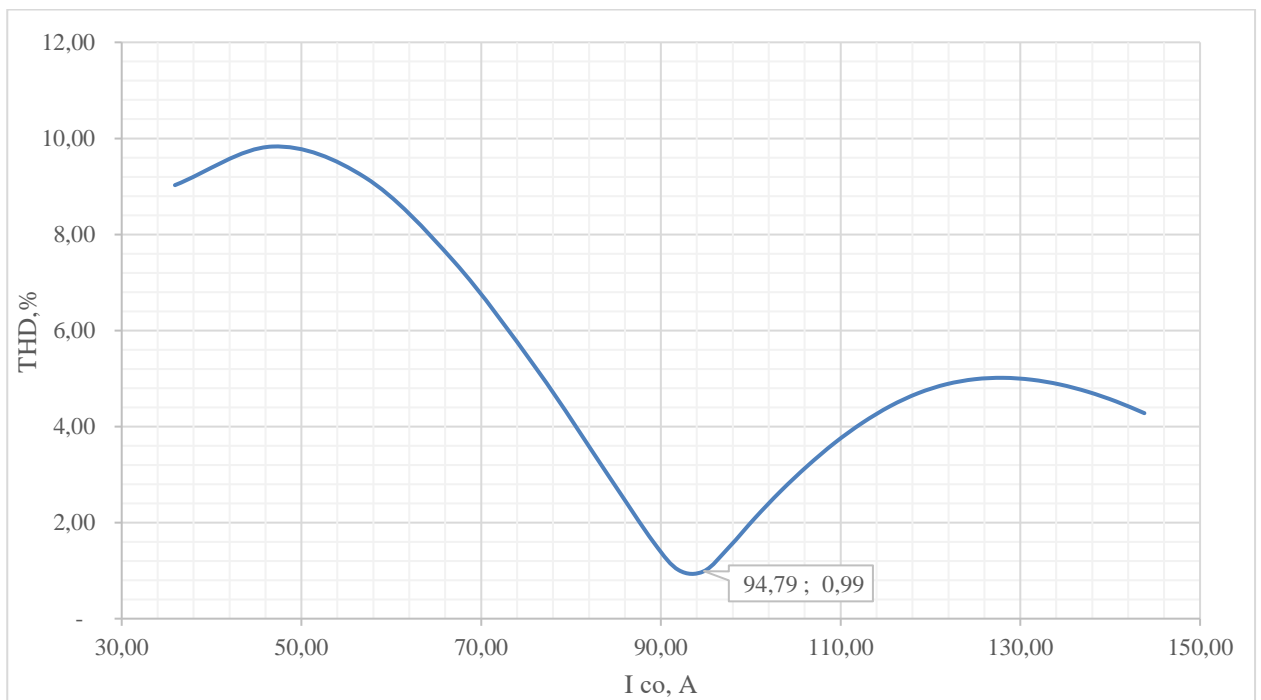


Рисунок 4.7 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,22643 \text{ м}^2$

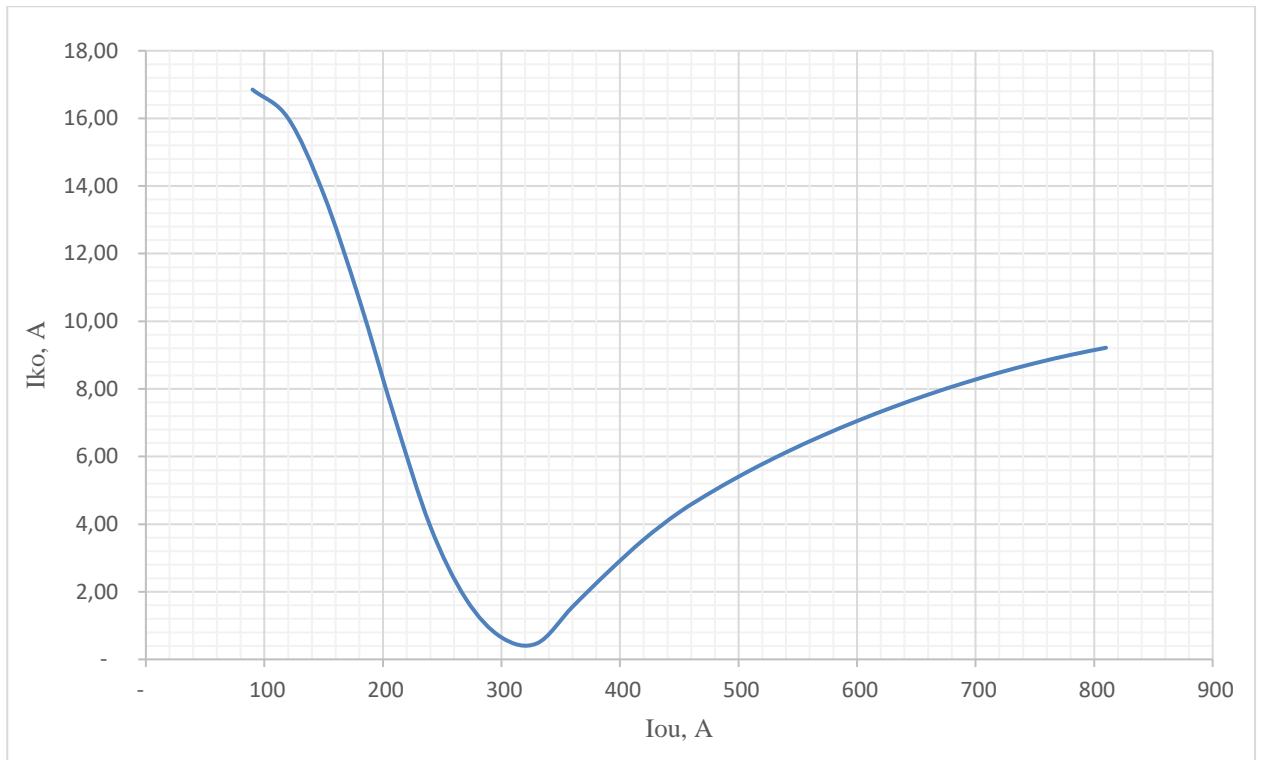


Рисунок 4.8 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,22643 \text{ м}^2$

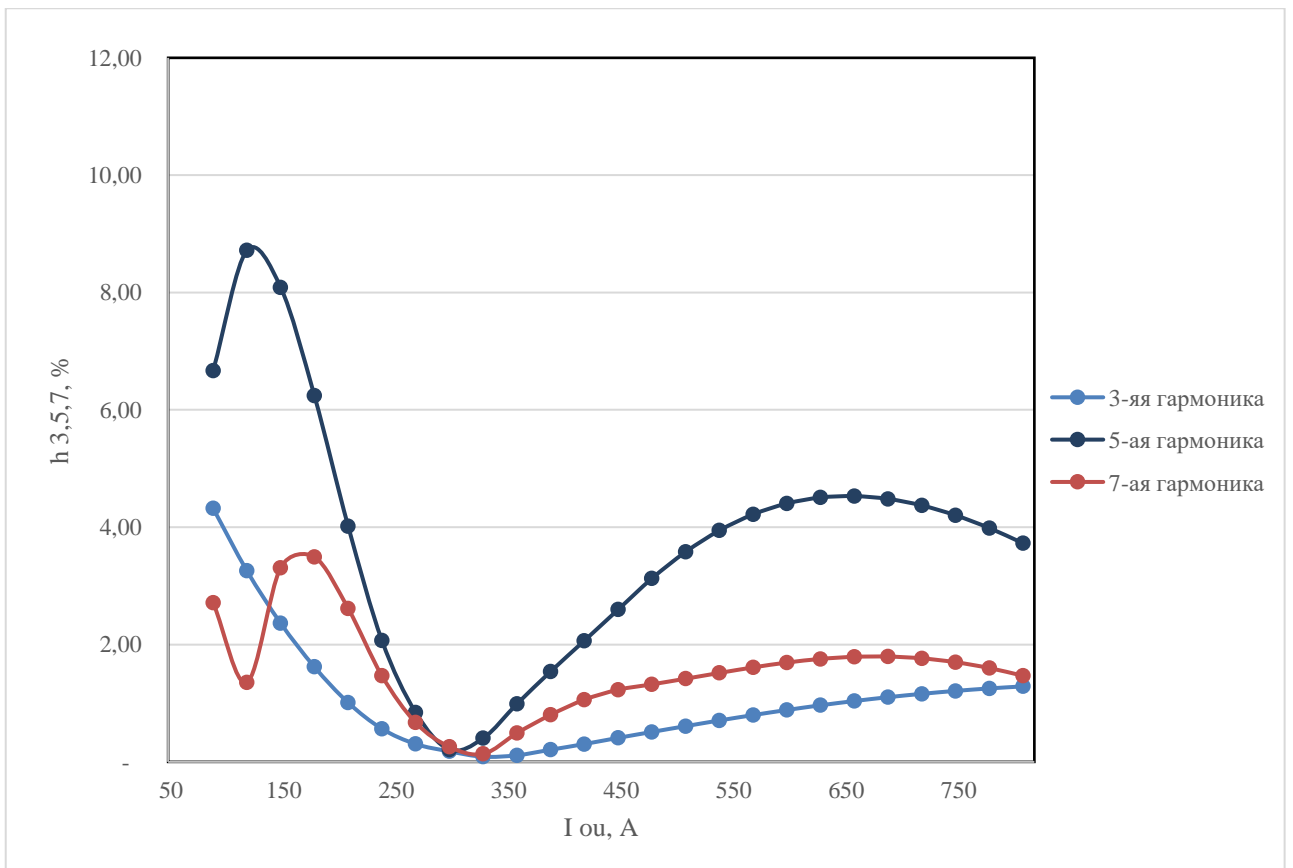


Рисунок 4.9 - График изменения гармоник тока сетевой обмотки $I_{со}$ $S_{стержня} - 0,115526 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,22643 \text{ м}^2$

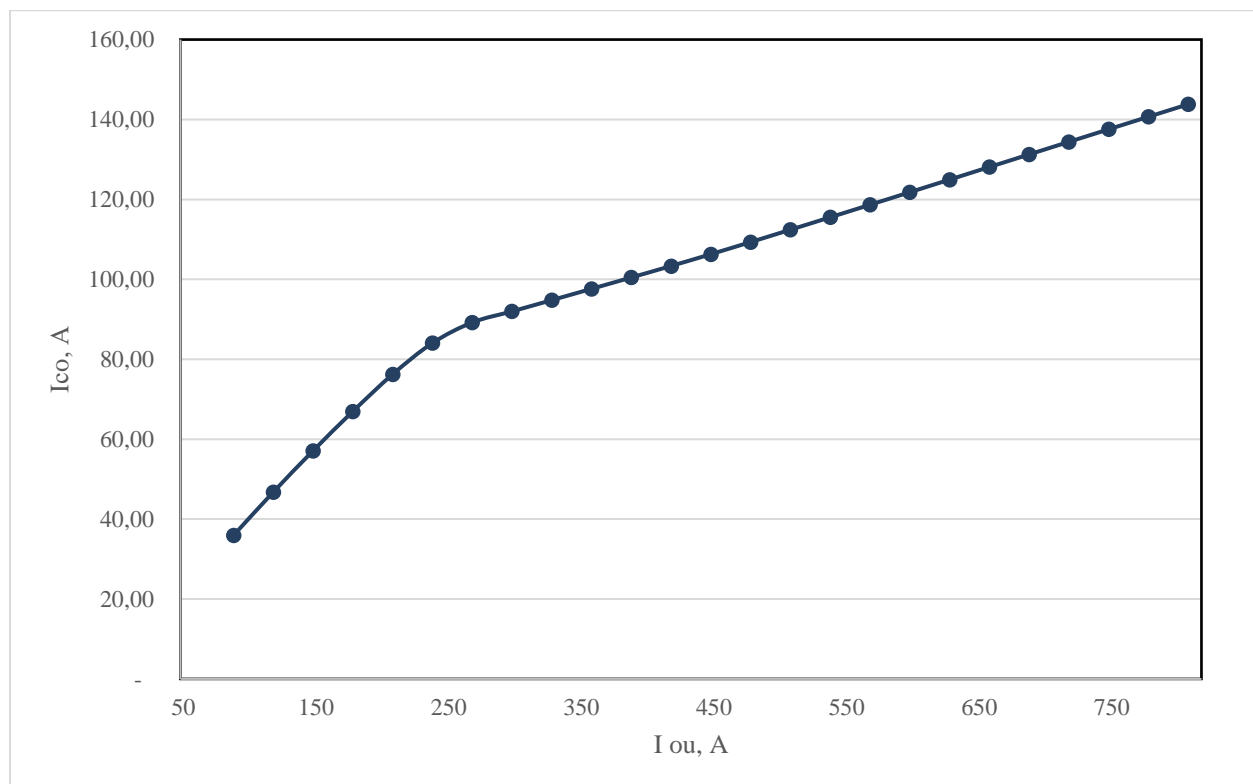


Рисунок 4.10 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,115526 \text{ м}^2$
 $S_{ярем} - 0,22643 \text{ м}^2$

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.

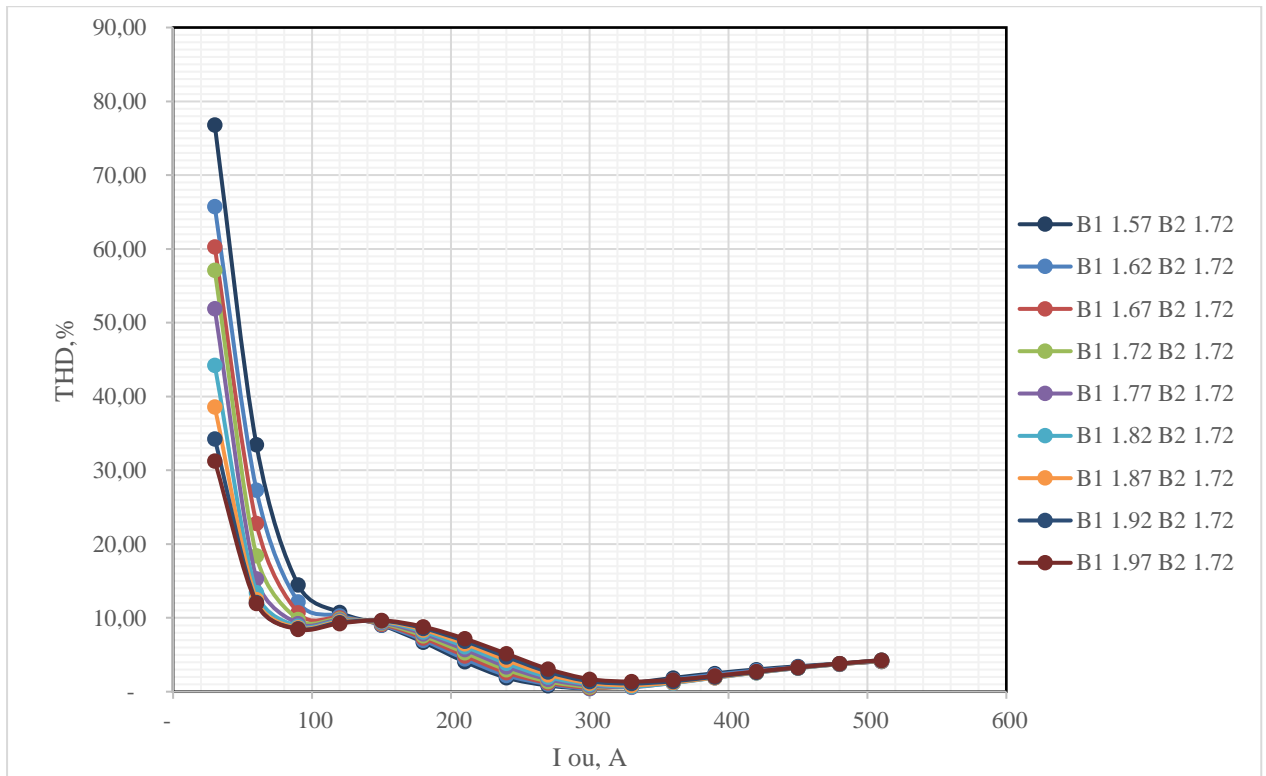


Рисунок 4.11 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

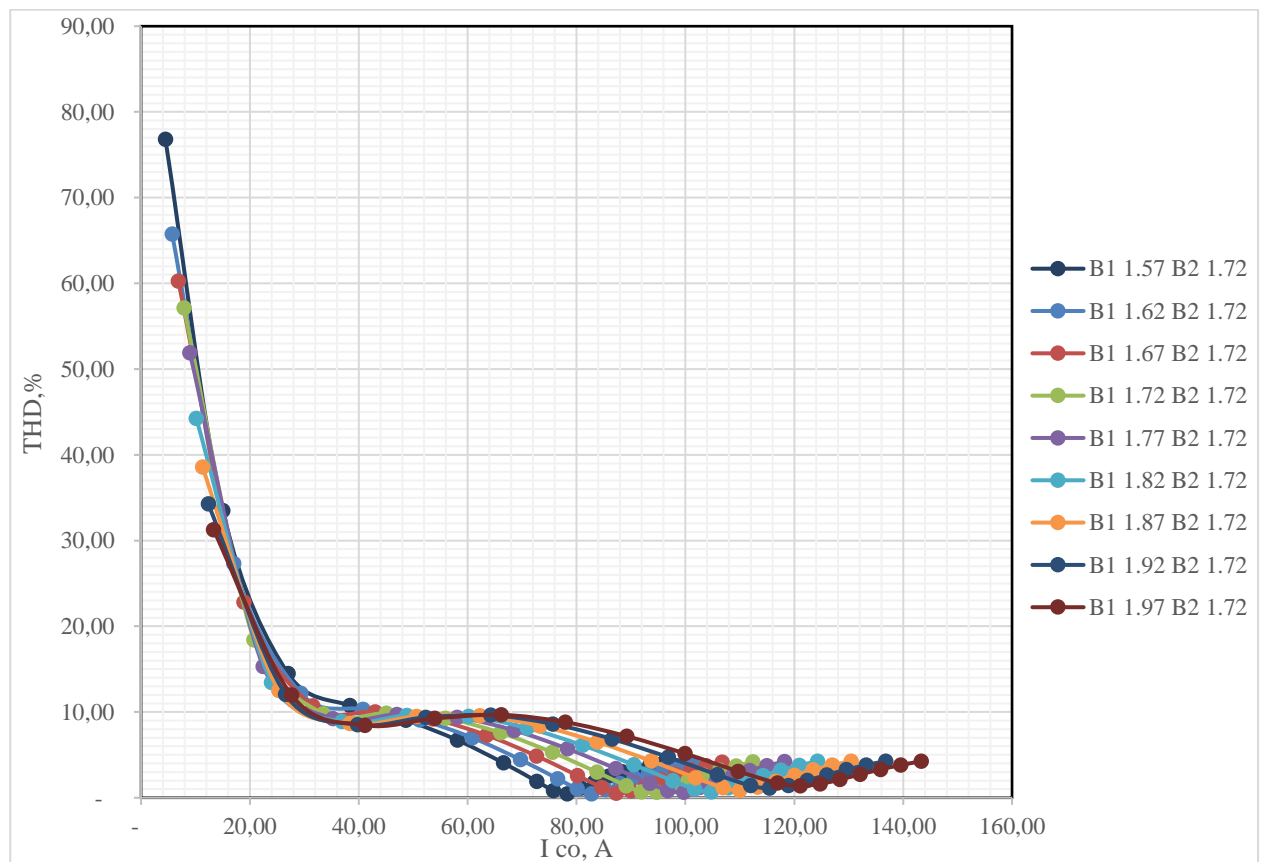


Рисунок 4.12 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

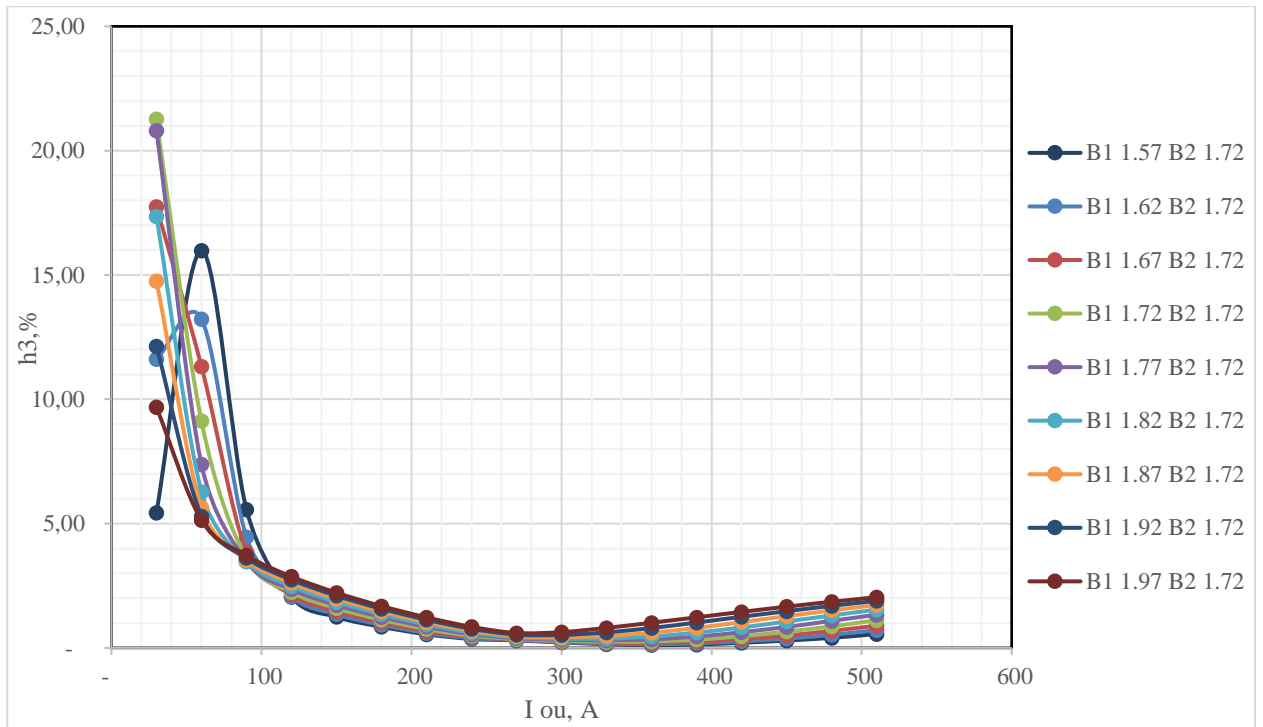


Рисунок 4.13 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

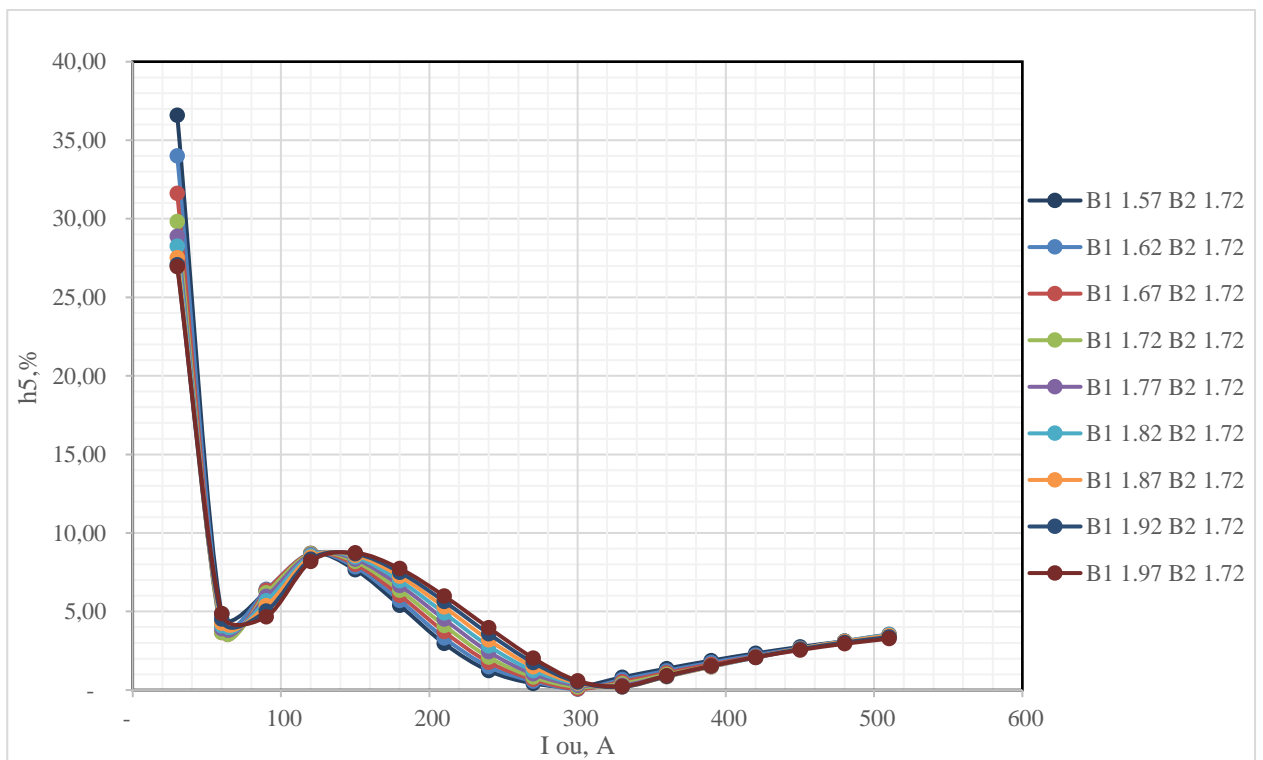


Рисунок 4.14 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

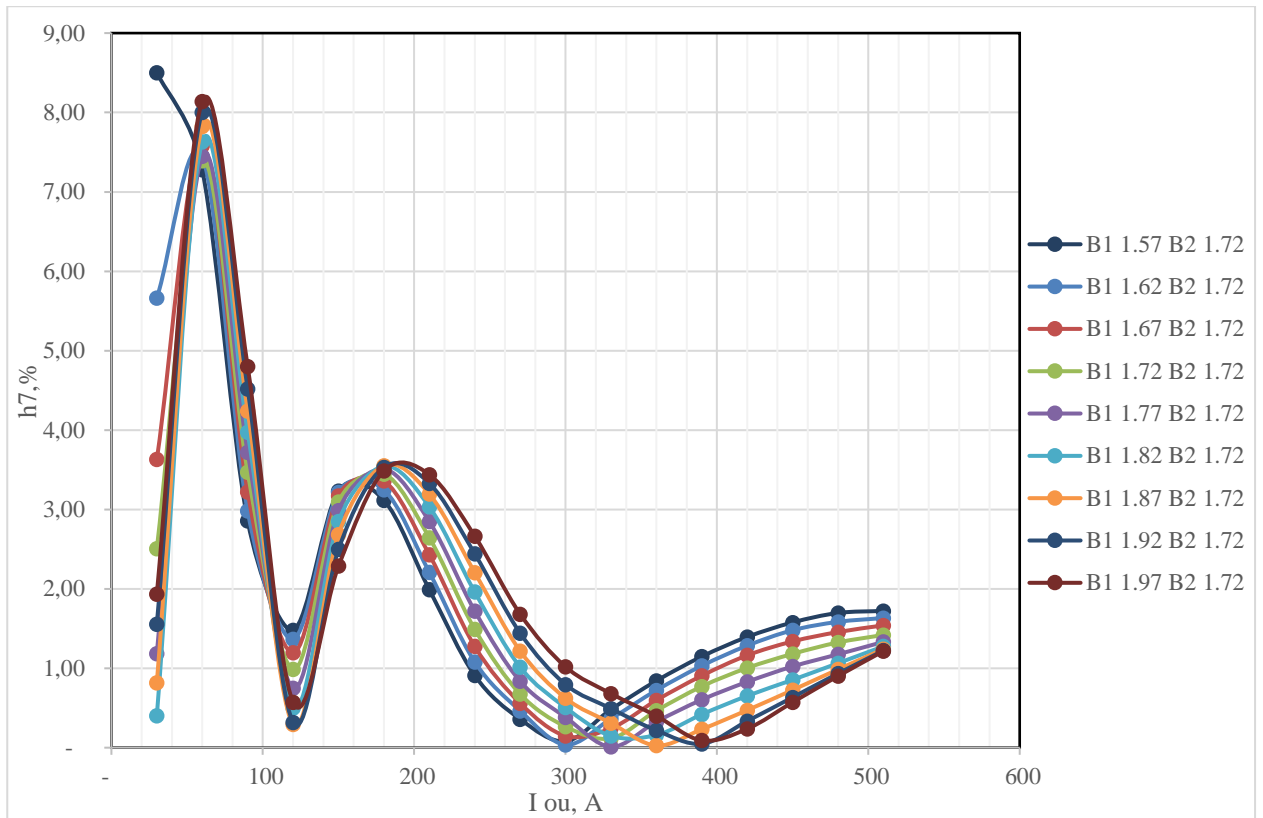


Рисунок 4.15 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

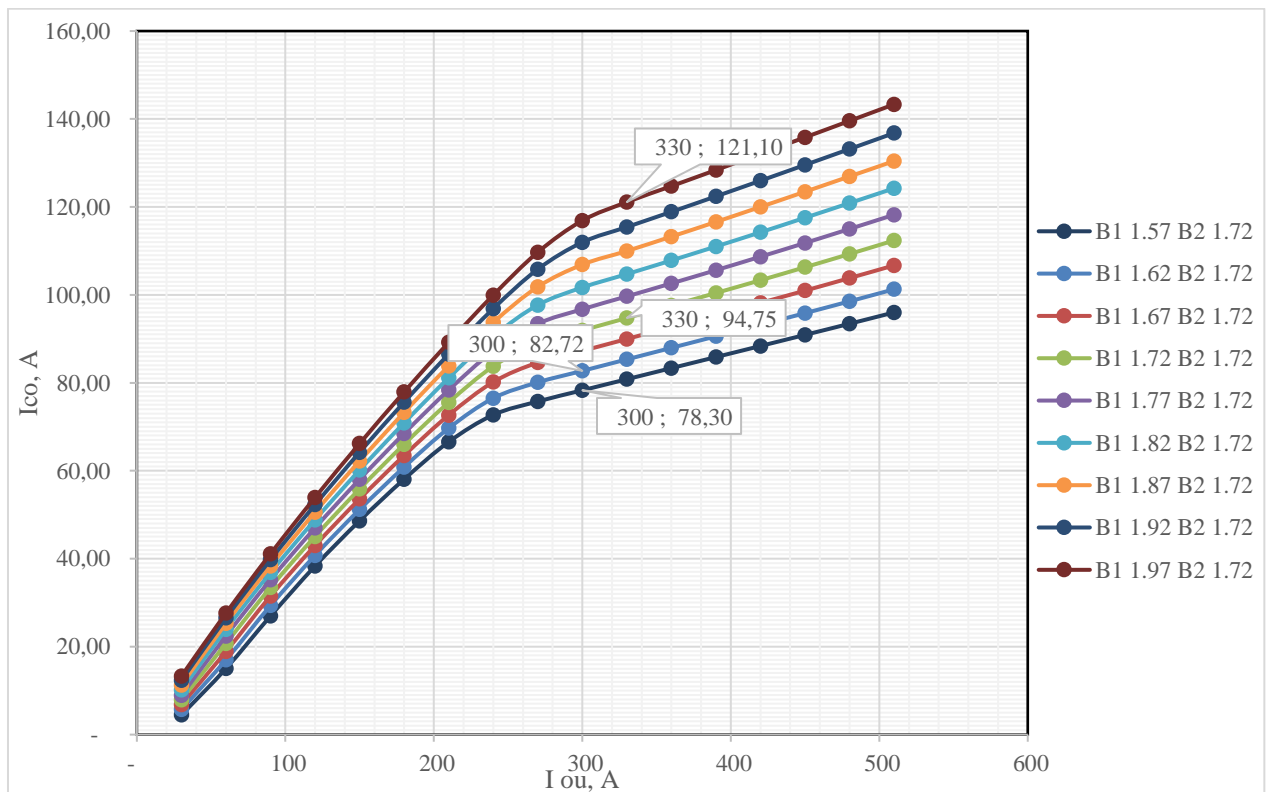


Рисунок 4.16 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

С увеличением индукции переменного магнитного поля, создаваемым сетевой обмоткой, увеличивается и потребляемый ток, соответствующий режиму полупериодного насыщения. При индукции магнитного поля B_1 1.97

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.

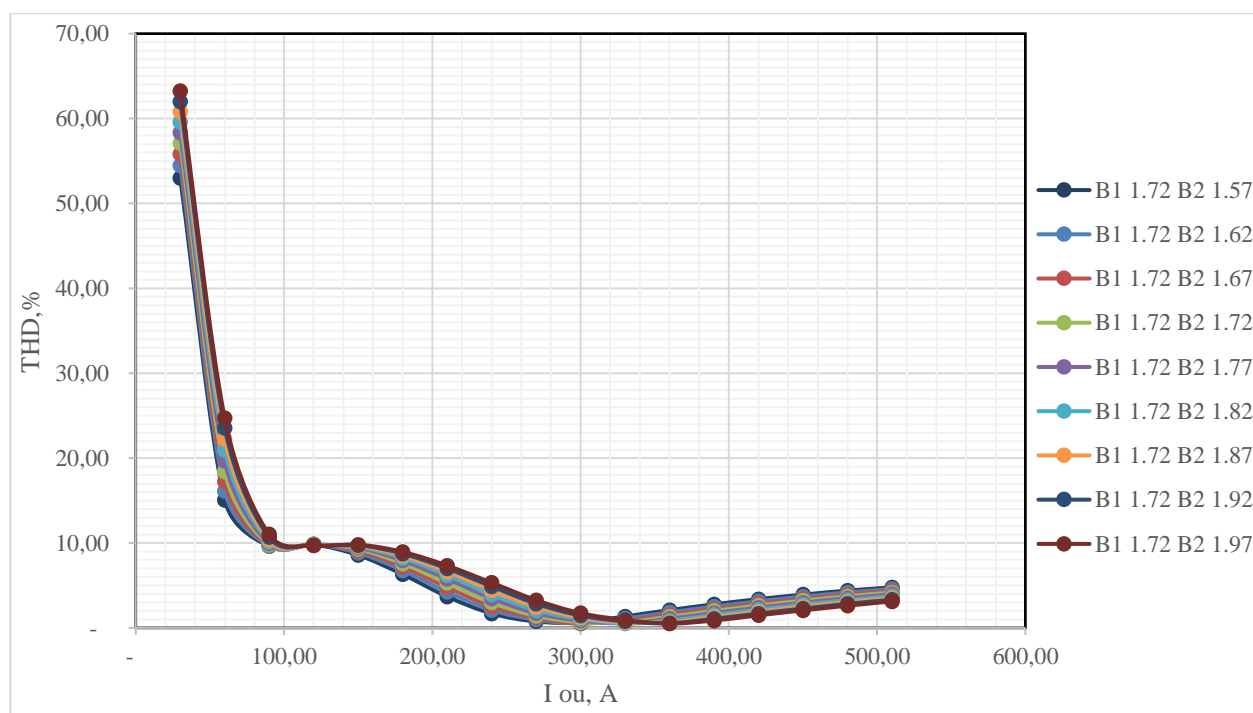


Рисунок 4.17- График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

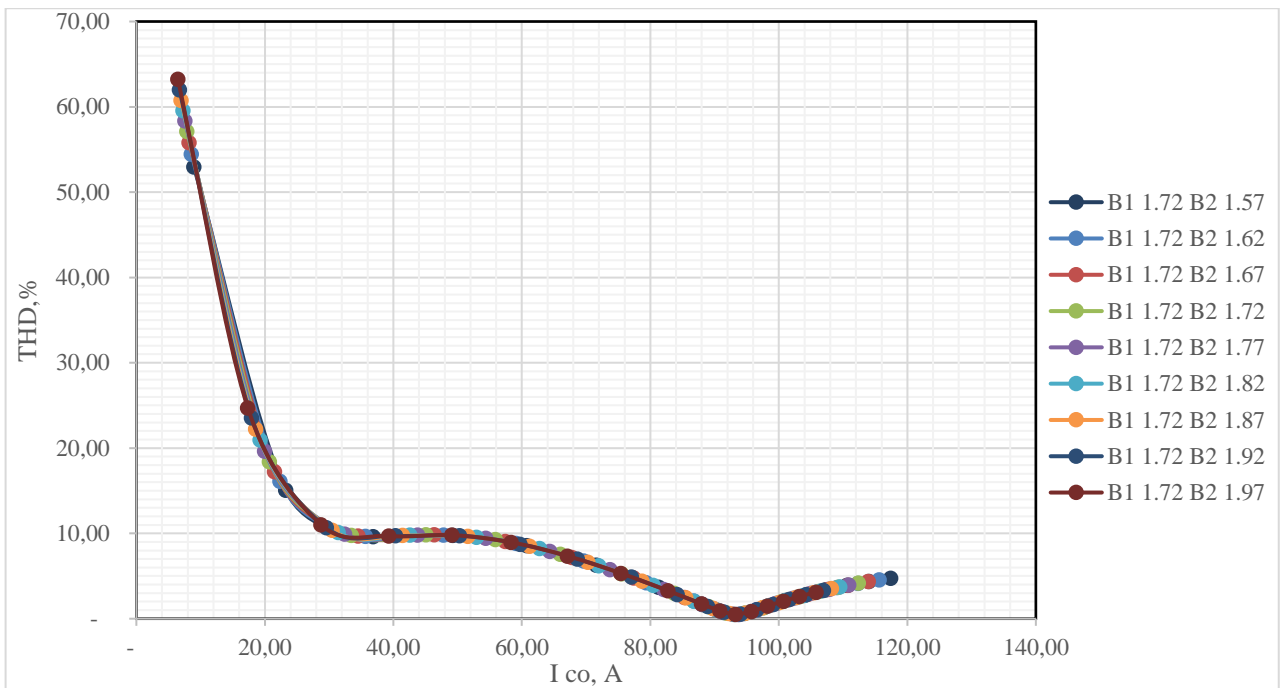


Рисунок 4.18 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co}

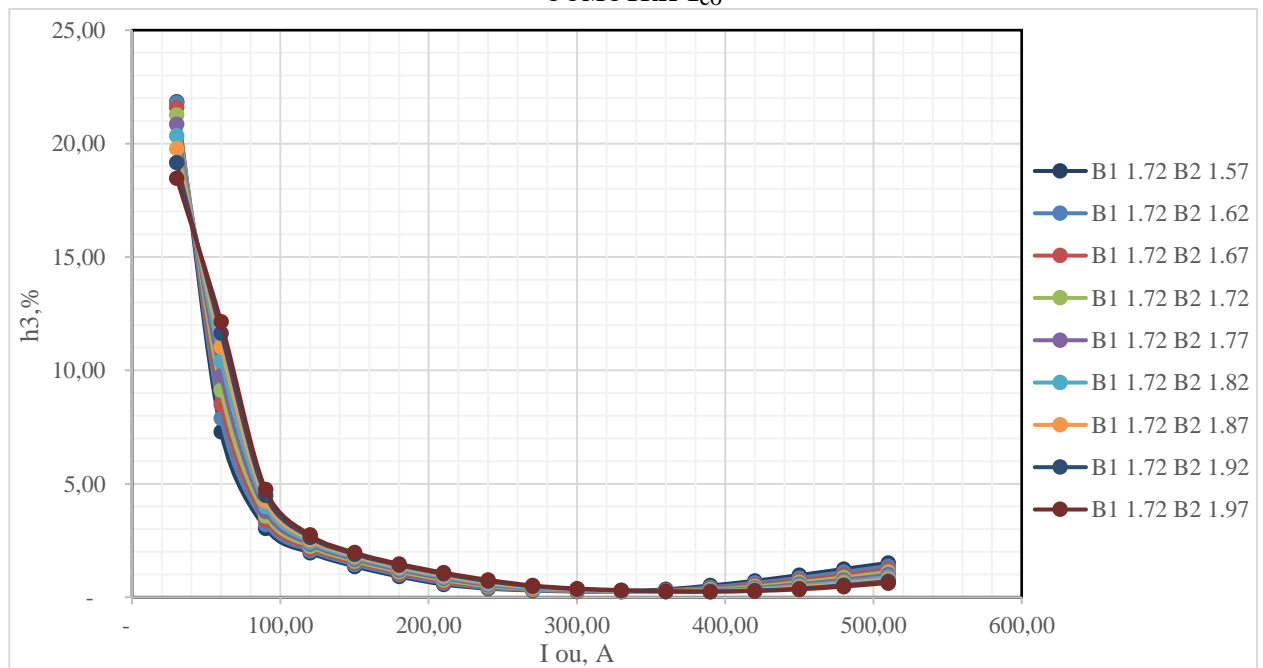


Рисунок 4.19 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

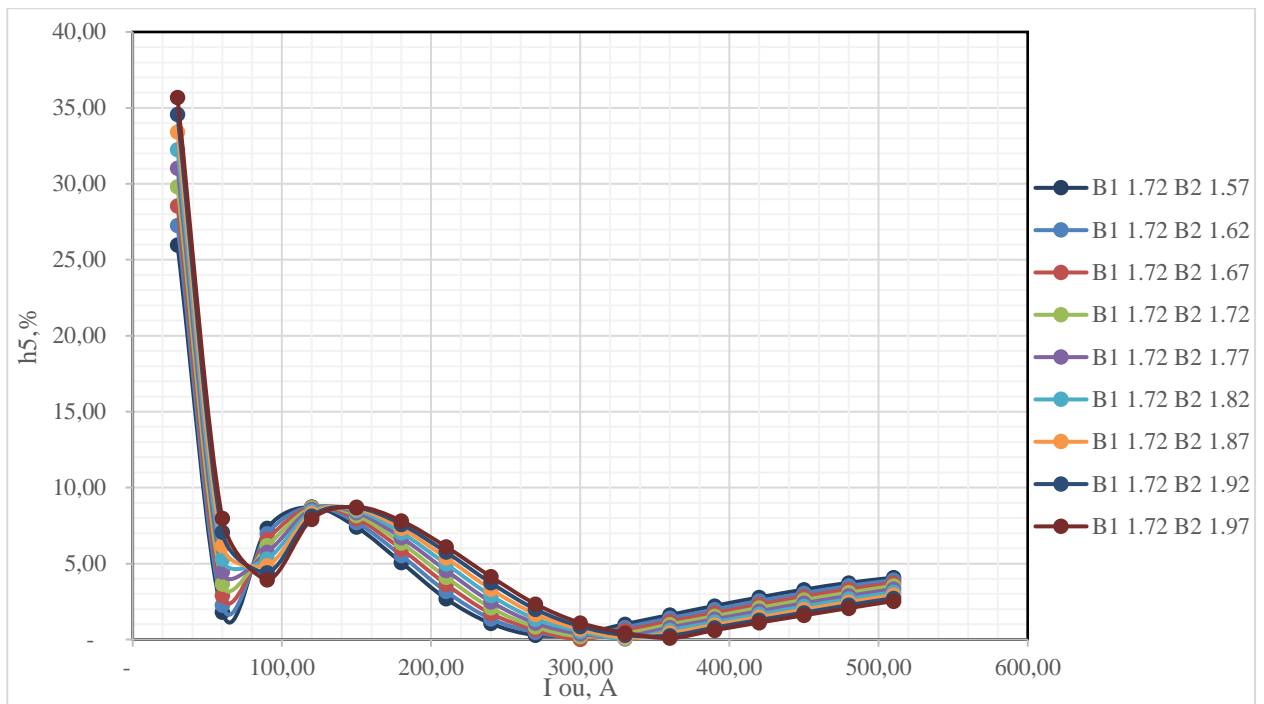


Рисунок 4.20 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{5o}

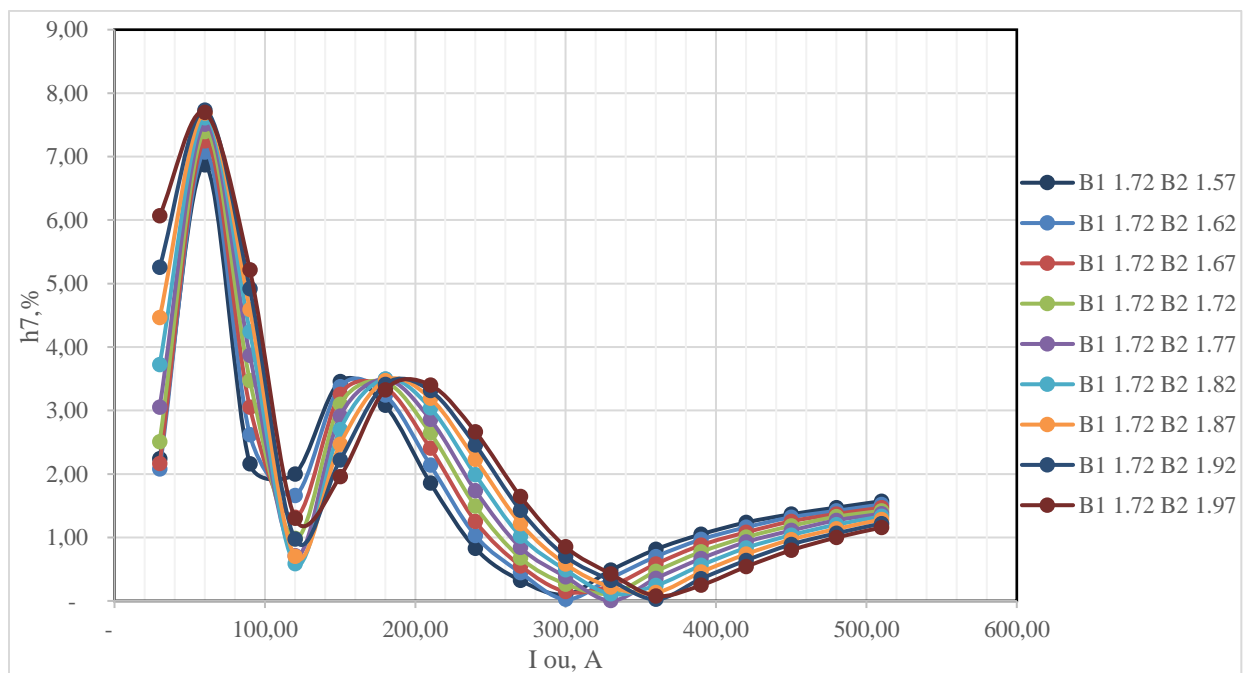


Рисунок 4.21 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{7o}

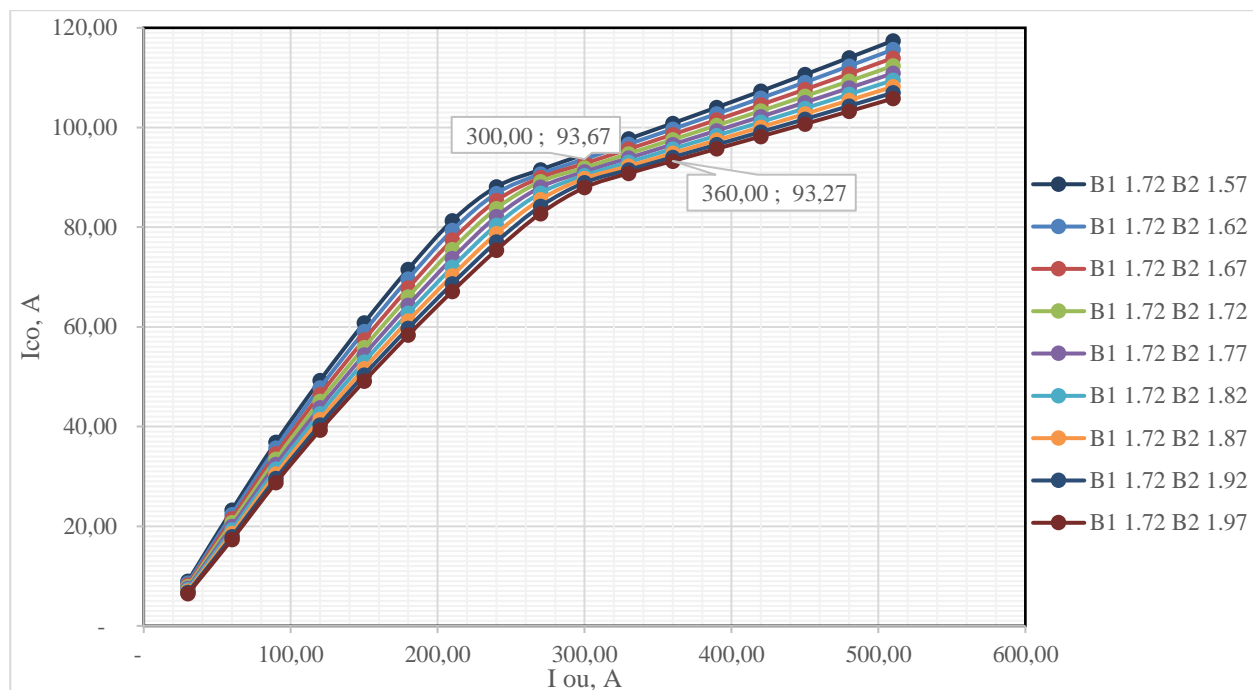


Рисунок 4.22 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

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.

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

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

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 5500 В вследствие оптимизационных расчетов. Напряжение компенсационной обмотки устанавливалось в диапазоне 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В с шагом регулирования 1000 В.

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

	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

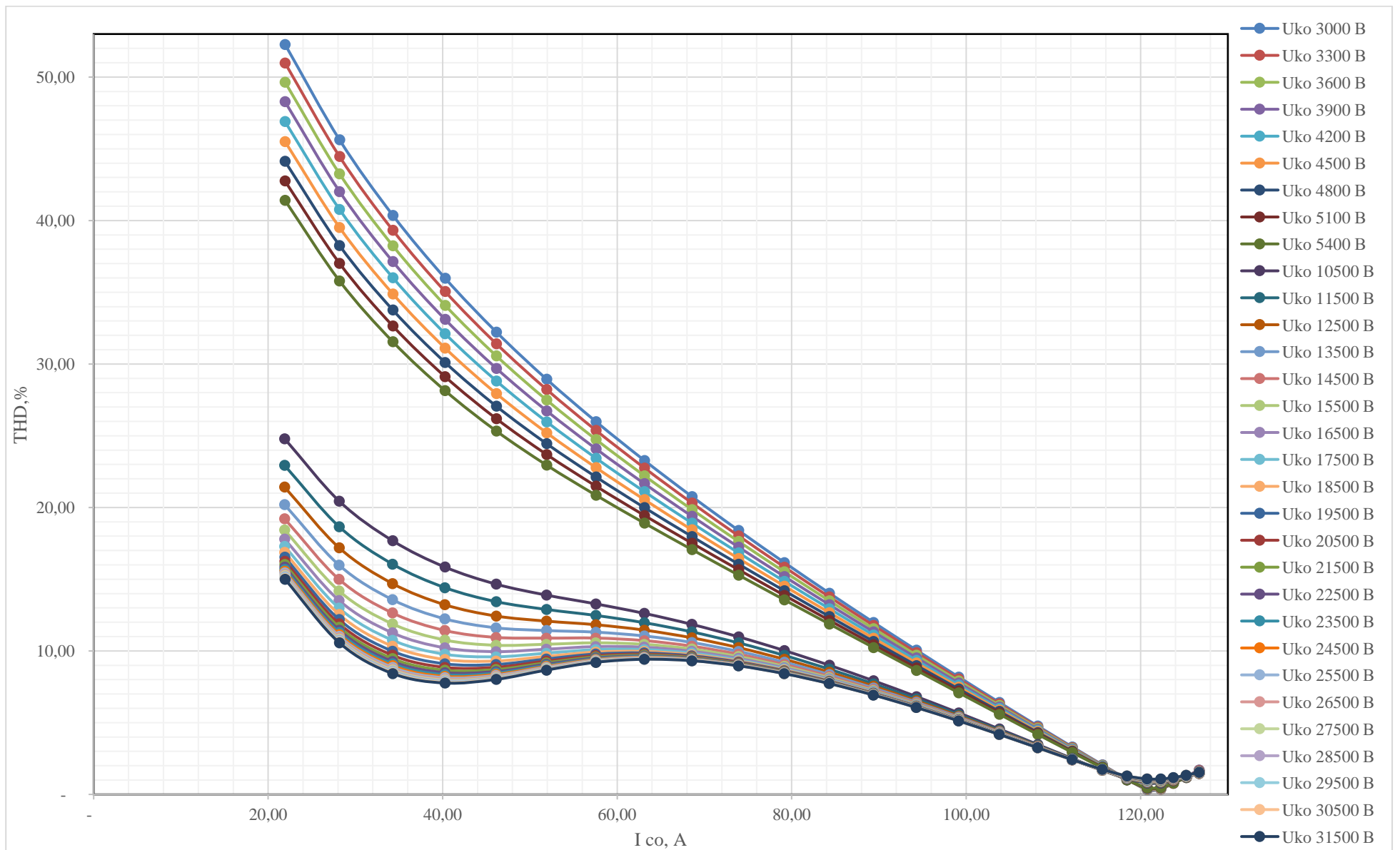


Рисунок 4.23 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$

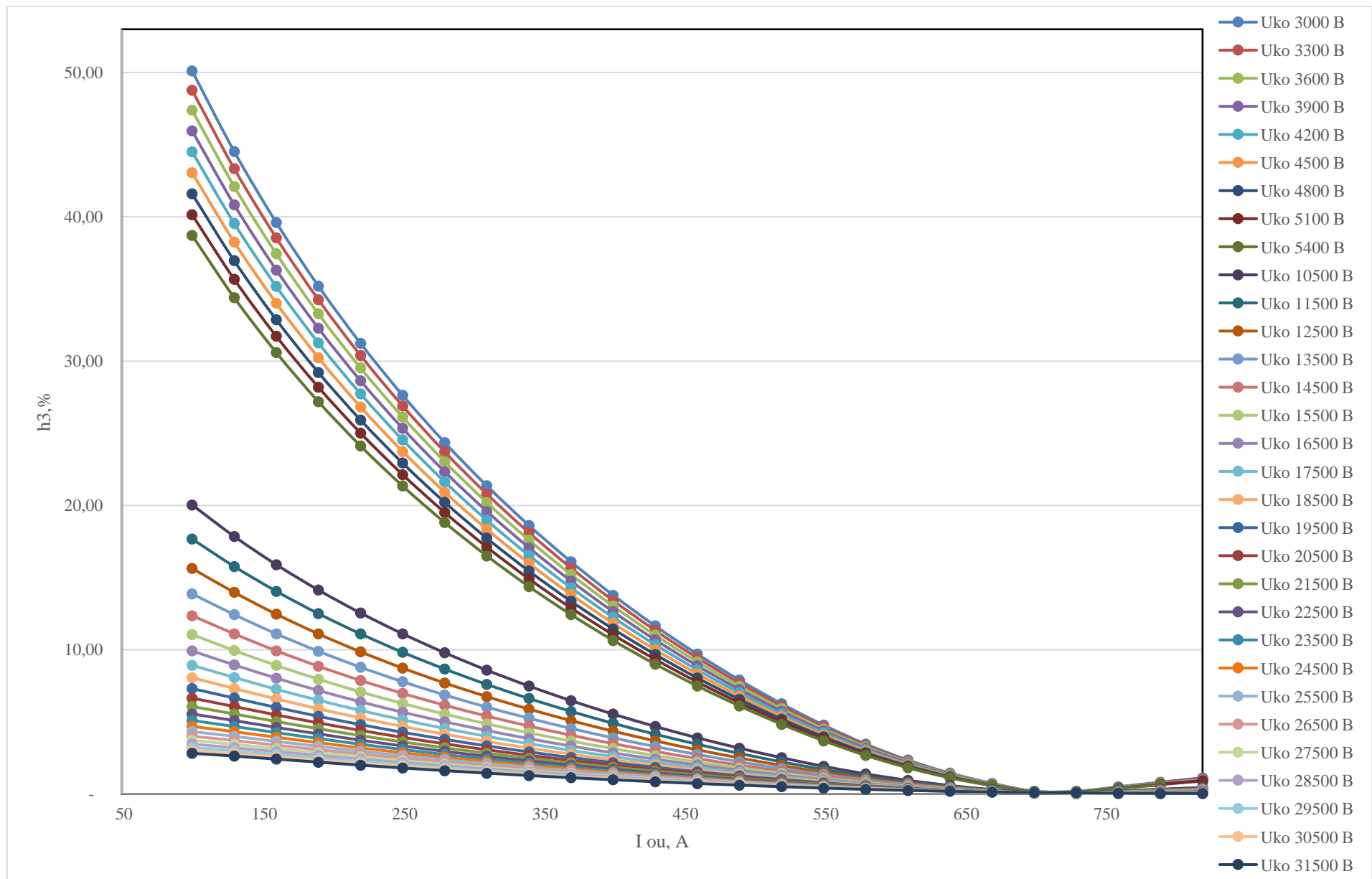


Рисунок 4.24 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$

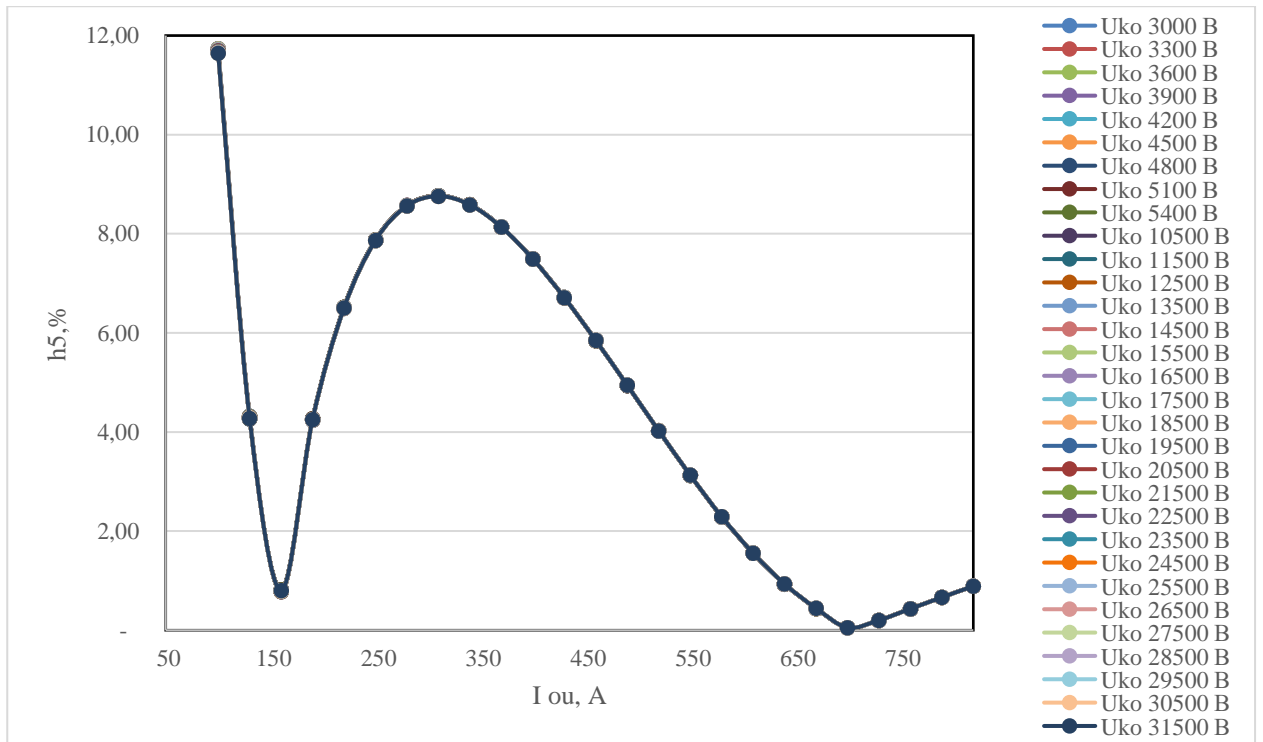


Рисунок 4.25 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярсм}} - 0,29436 \text{ м}^2$

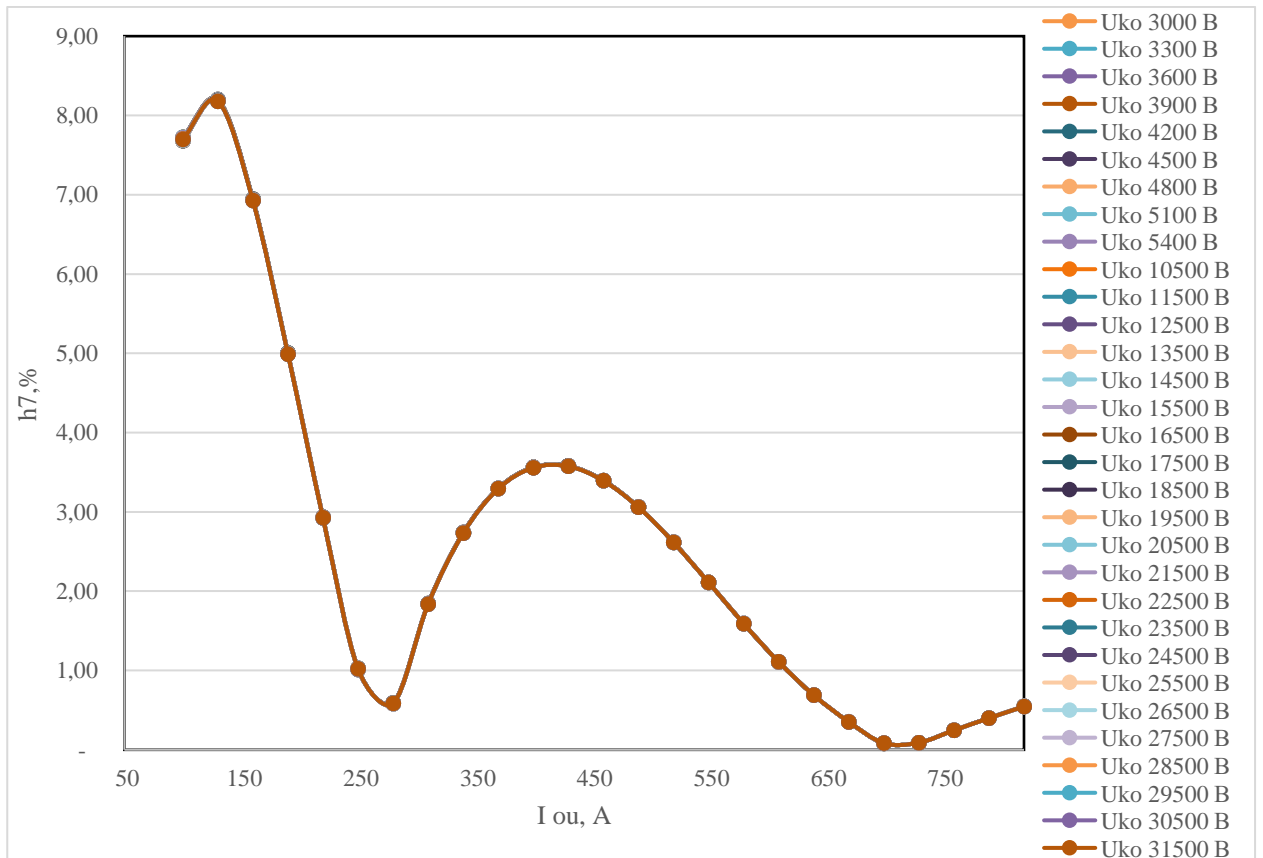


Рисунок 4.26 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярсм}} - 0,29436 \text{ м}^2$

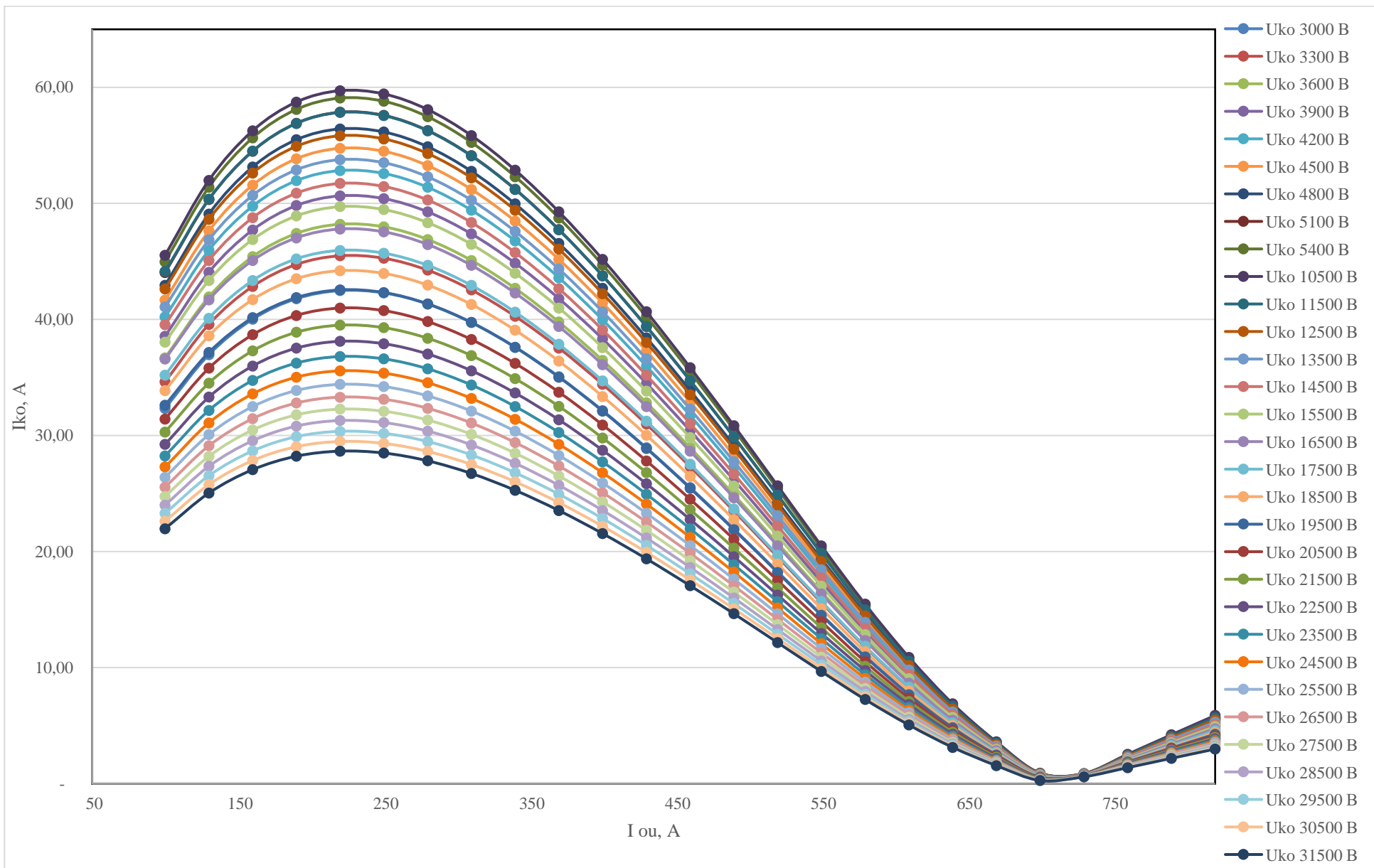


Рисунок 4.27 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$

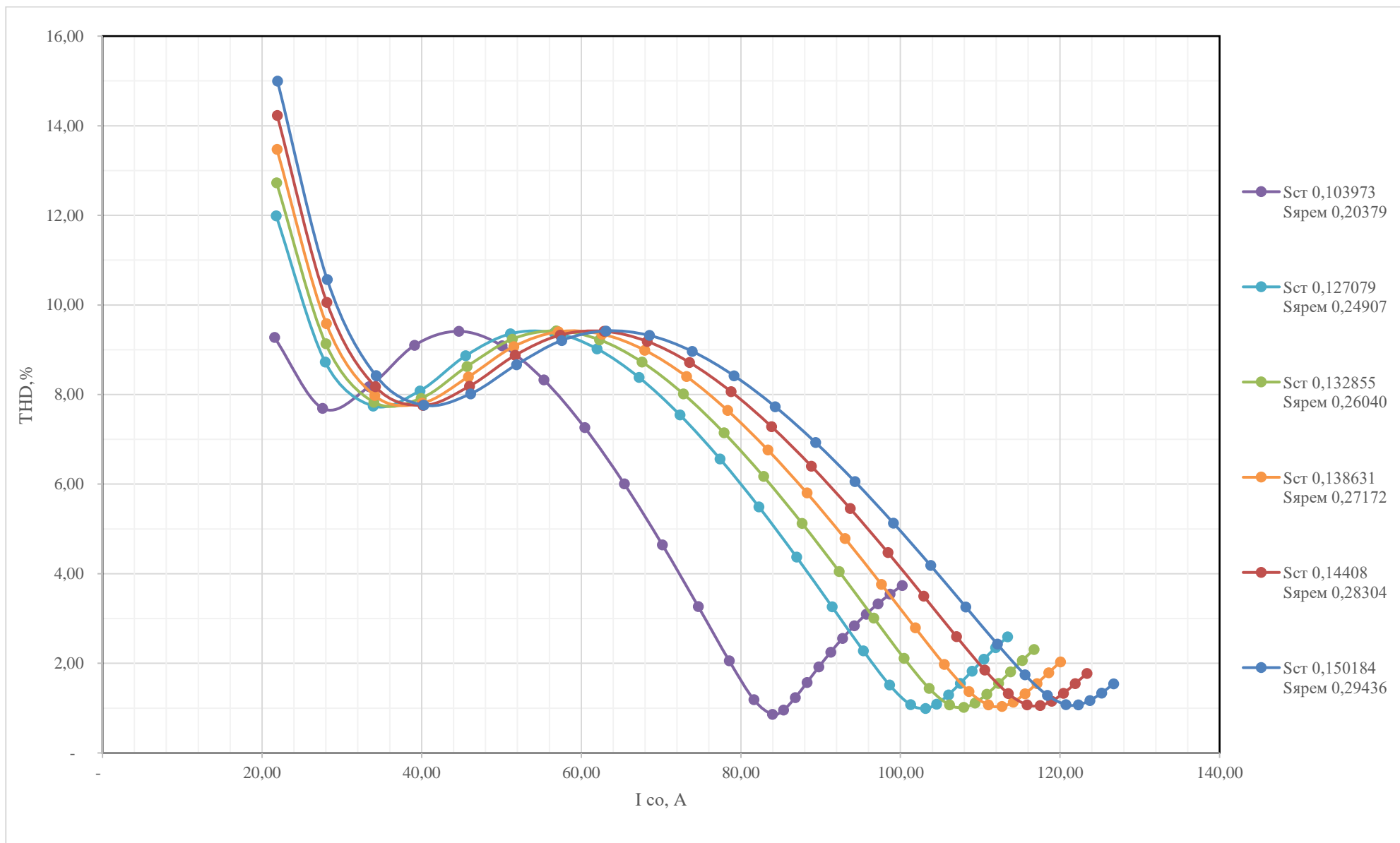


Рисунок 4.28 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} при изменении сечений стержня $S_{стержня}$ и ярем $S_{ярем}$ напряжение компенсационной обмотки 31,5 кВ

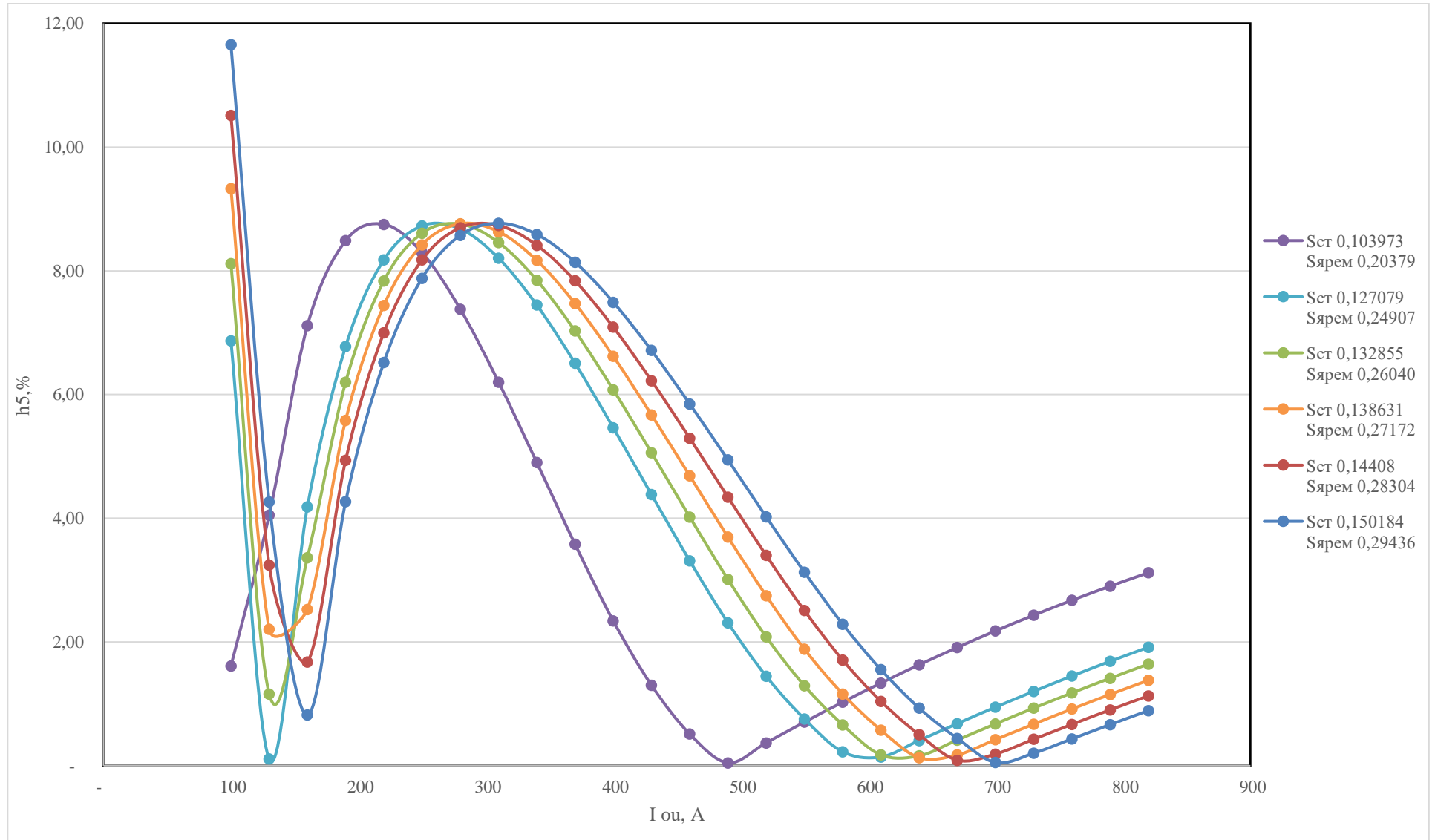


Рисунок 4.29 - График изменения 5-ой гармоника тока сетевой обмотки I_{co}

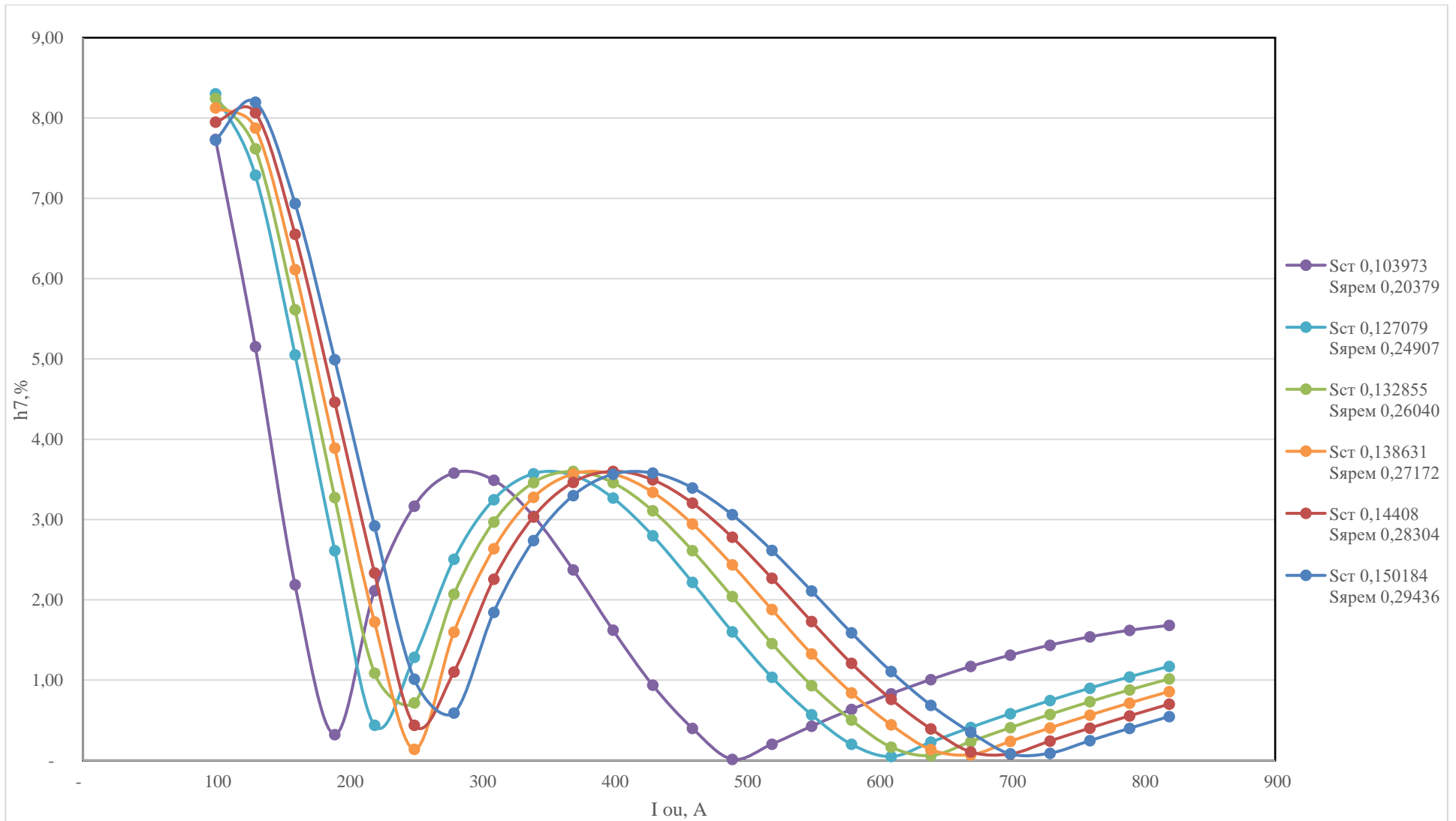


Рисунок 4.30 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}

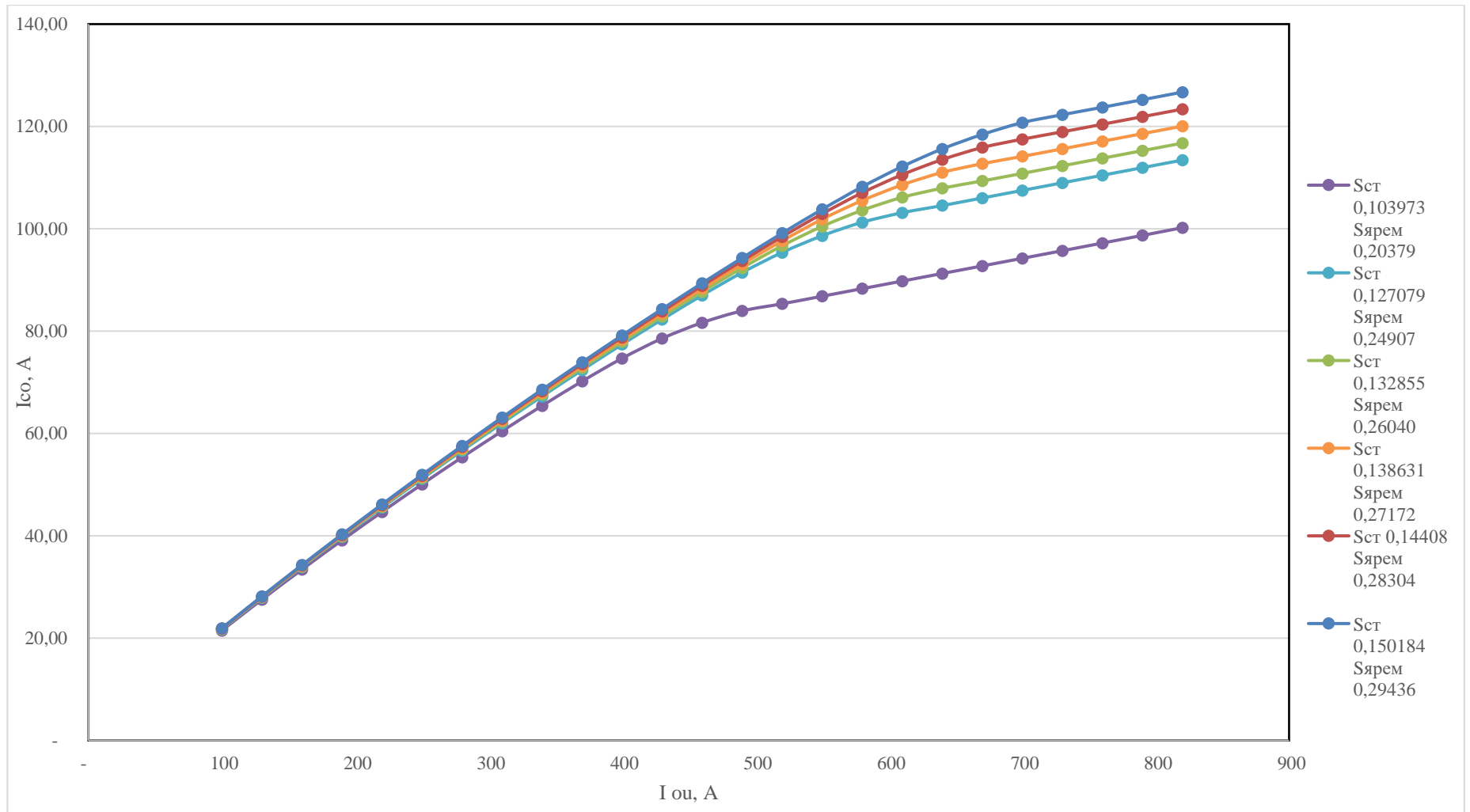


Рисунок 4.31- График изменения тока сетевой обмотки I_{co}

Согласно графику приведенному на рисунке 4.28 режим полупериодного намагничивания наступает при номинальных параметрах режима работы УШР при выборе сечения рабочих стержней равному $0,150184 \text{ м}^2$, сечения ярем равному $0,29436 \text{ м}^2$. При выборе сечений стержней и ярем 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 31 500 В, обмотки управления 5 500 В.

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 31 500 В. Ранее, при моделировании работы УШР с различным сечением и соотношением стержней и ярем магнитопровода напряжение компенсационной обмотки устанавливалось в диапазоне 3 000 В – 5 400 В с шагом регулирования 300 В, 10 500 В – 31 500 В с шагом регулирования 1000 В. Решение по выбору напряжения компенсационной обмотки равной 31 500 В принято на основании меньшего коэффициента гармоник в начальных стадиях подмагничивания УШР при большем напряжении компенсационной обмотки.

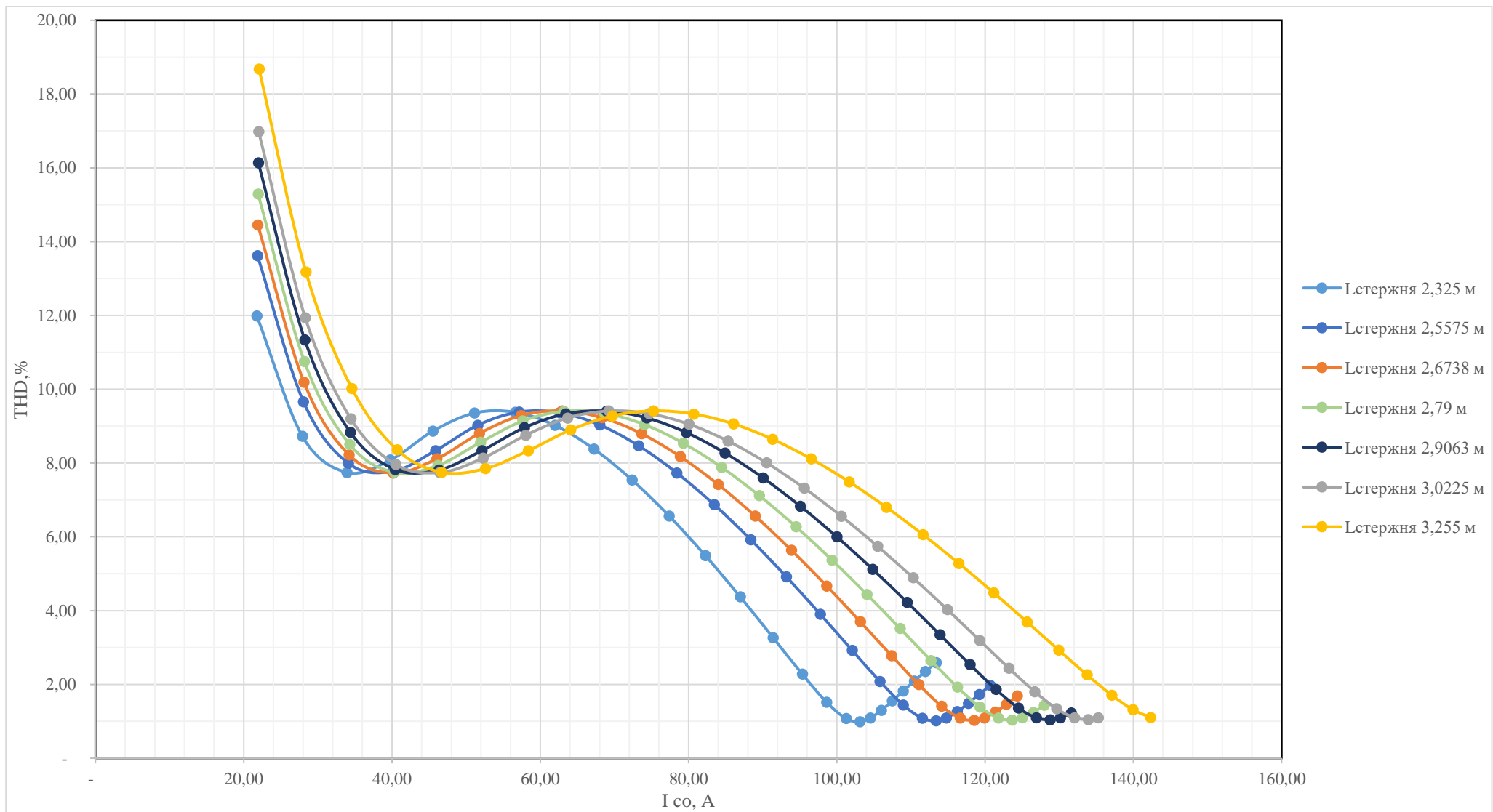


Рисунок 4.31 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} при изменении высоты стержня $L_{\text{стержня}}$

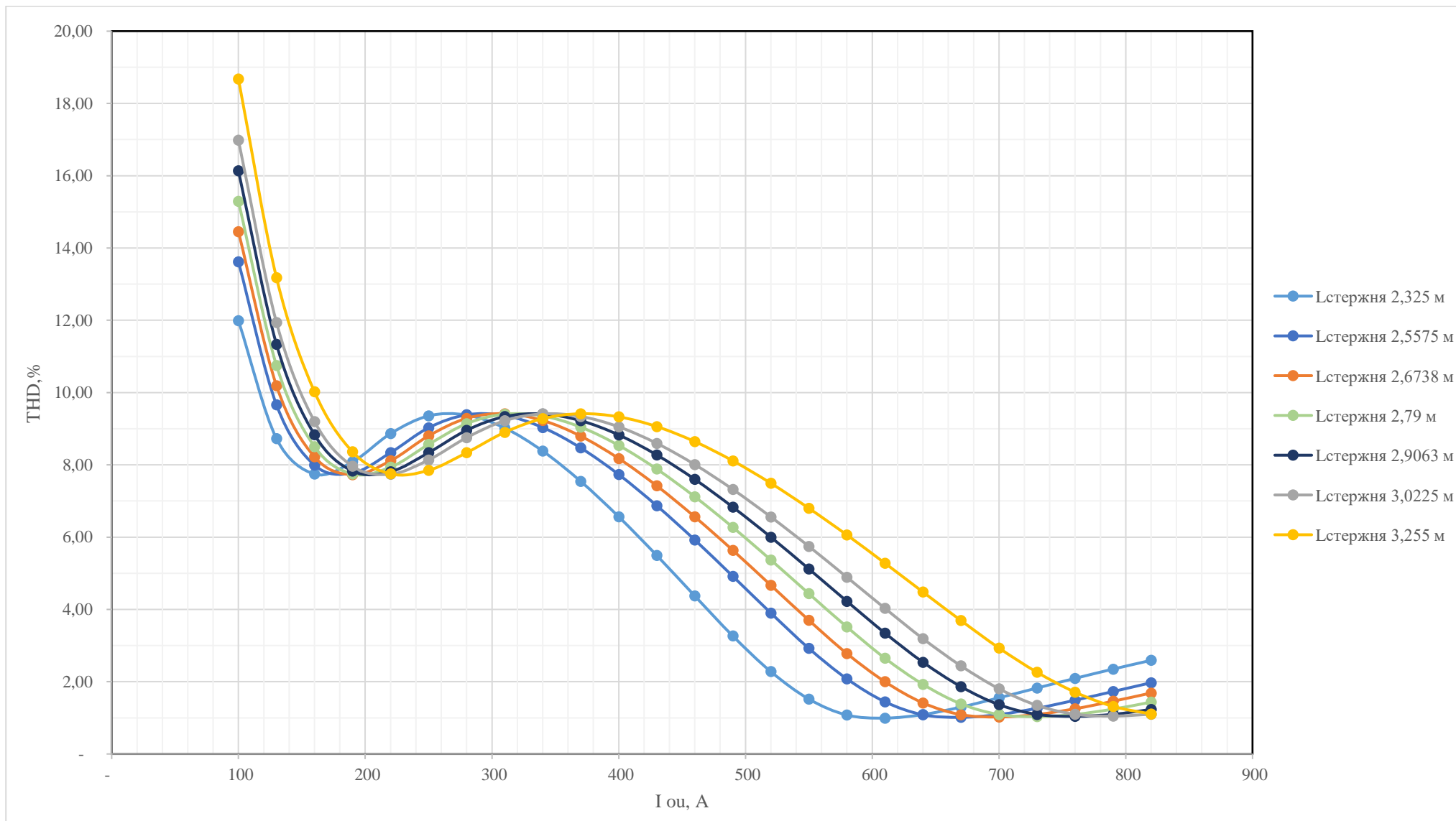


Рисунок 4.32 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{c0} при изменении высоты стержня $L_{\text{стержня}}$

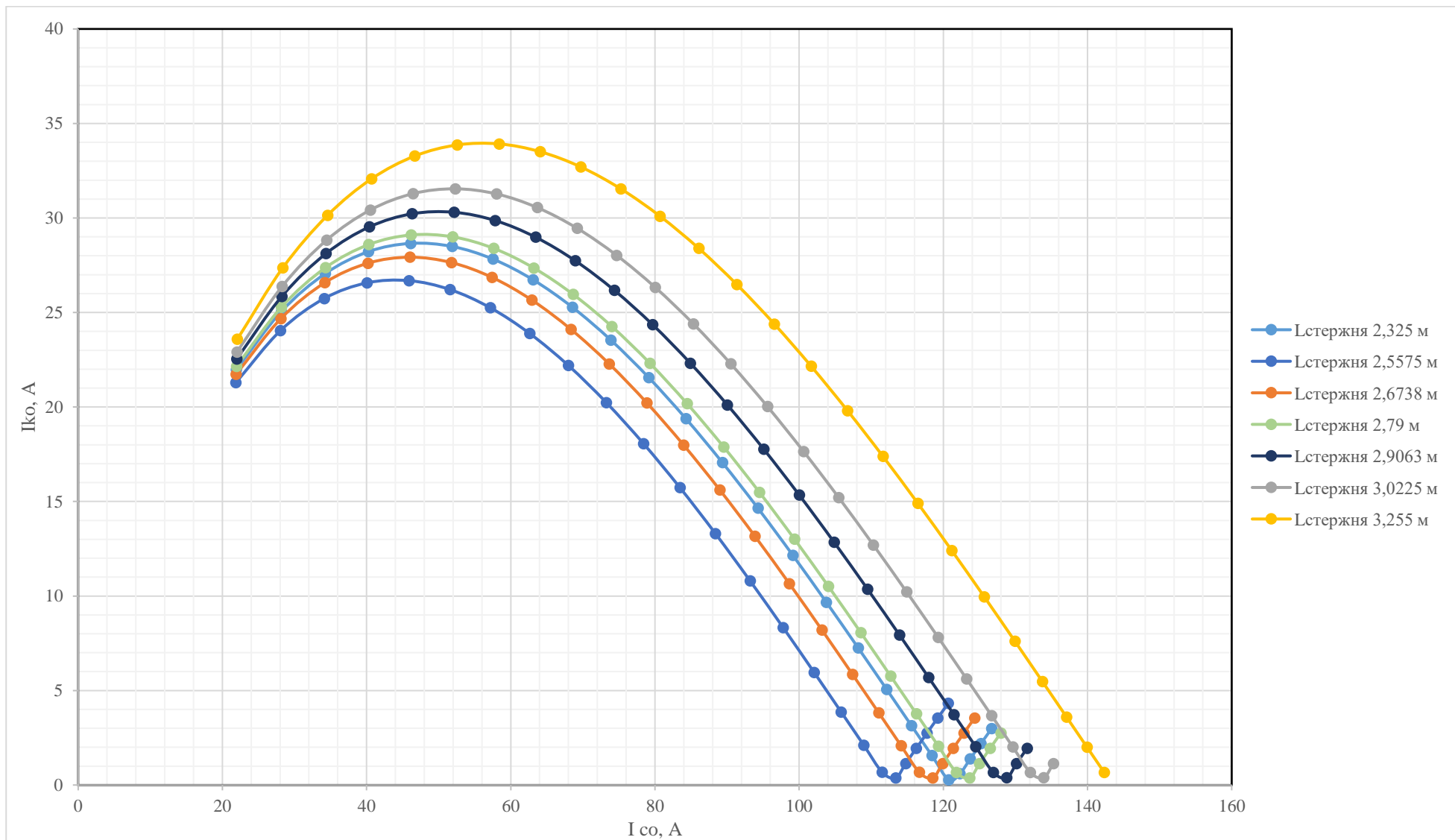


Рисунок 4.33 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ в зависимости от тока сетевой обмотки $I_{со}$ при изменении высоты стержня $L_{\text{стержня}}$

Согласно графику, приведенному на рисунке 4.31 режим полупериодного намагничивания УШР наступает при выборе высоты рабочих стержней равному 2,79 м. При выборе высоты стержней больше или меньше режим полупериодного насыщения 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 ТНД. Ток в компенсационной обмотке стремится к нулю по мере наступления режима полупериодного намагничивания. При дальнейшем увеличении намагничивания ток в компенсационной обмотке возрастает.

4.8 Улучшение характеристик быстродействия УШР

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.

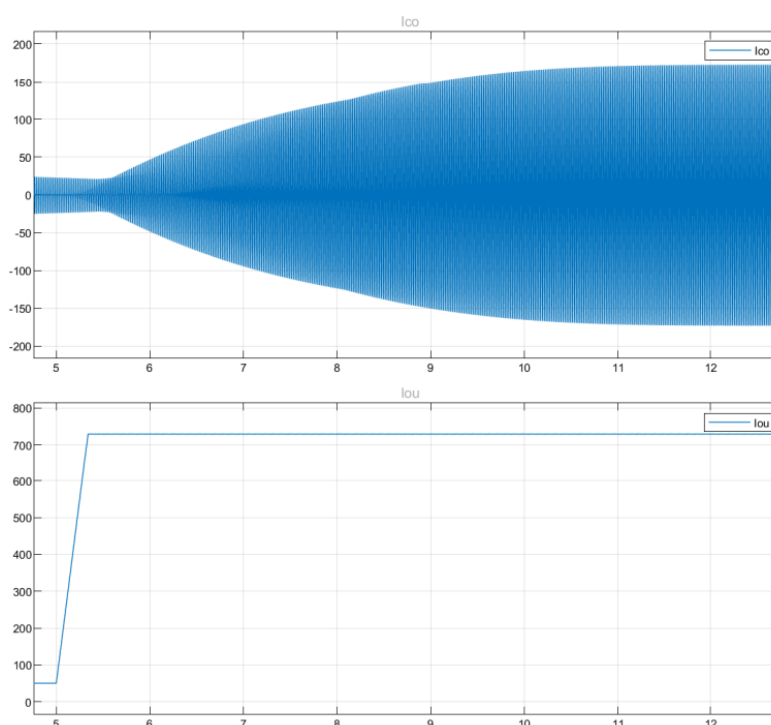


Рисунок 4.34 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ

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 решения задач по оптимизации работы исследуемого реактора.

Одним из таких технических решений является заземление нейтралей СО УШР через активные сопротивления (рисунок 4.35), как это было предложено и выполнено в четырехстержневой конструкции УШР [8]. 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.

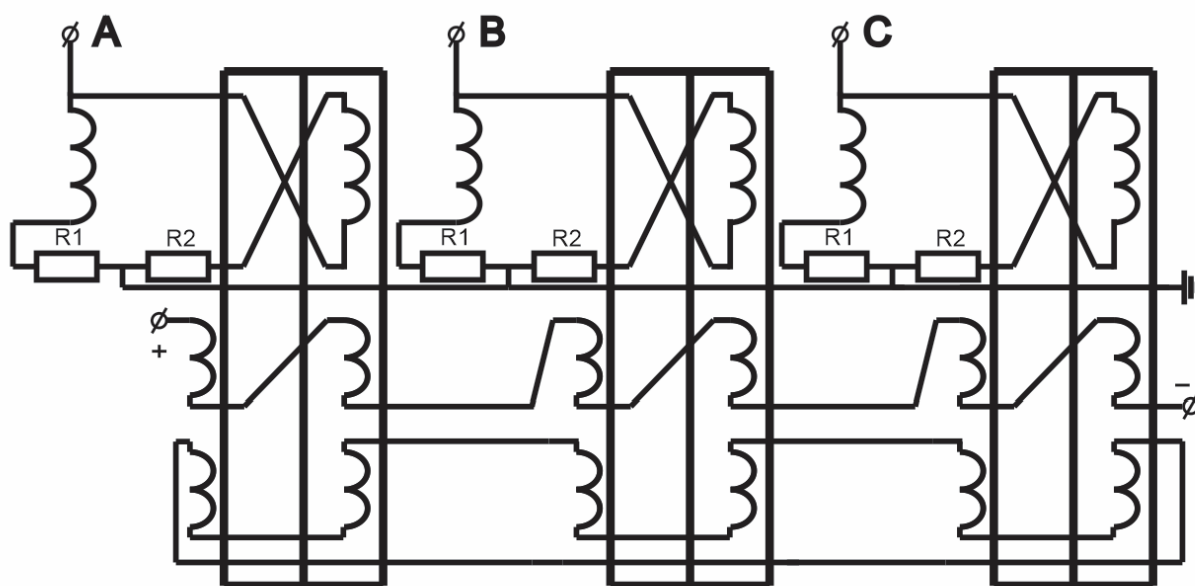


Рисунок 4.35 – Схема соединений УШР с повышенным быстродействием

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.

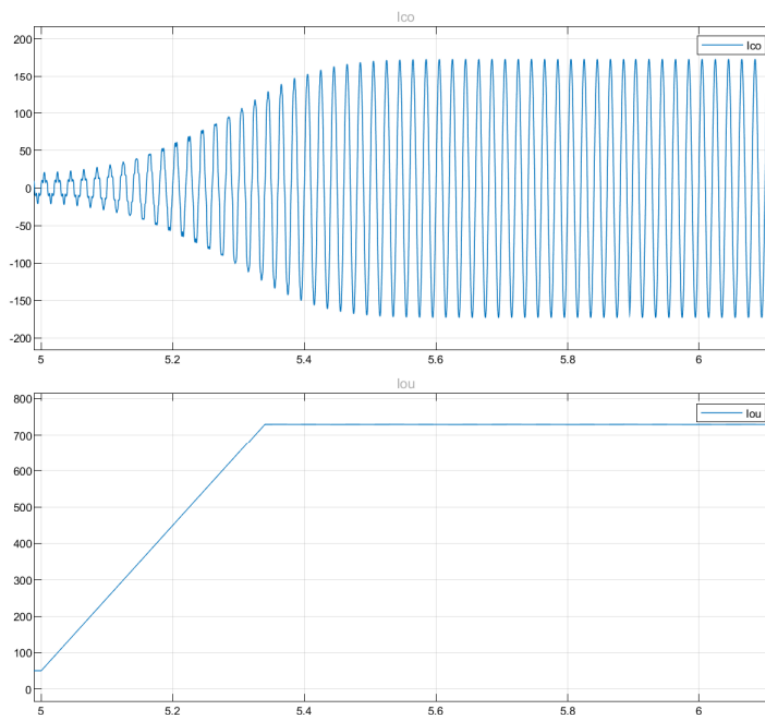


Рисунок 4.34 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=R_2=20$ Ом

Таблица 4.3 - Результаты моделирования скорости регулирования УШР

№	Сопротивление R1, Ом	Сопротивление R2, 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 нейтральных 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 $0,15 \text{ м}^2$ и ярем $0,29 \text{ м}^2$. Потребляемый ток сетевой обмотки составил 121 А, коэффициент гармоник 1,08.

- Третий при одновременном увеличении сечения стержня до $0,127 \text{ м}^2$ (сечение ярем до $0,249 \text{ м}^2$) 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 наоборот приводит к увеличению расхода 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 $0,15 \text{ м}^2$ и ярем до $0,29 \text{ м}^2$ как во втором варианте, влечёт за собой и увеличение сечения среднего стержня до $0,29 \text{ м}^2$.

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 [63, 64] и увеличением первой гармоники индукции переменного поля B_1 незначительно уменьшается индукция постоянного поля

ПОДМАГНИЧИВАНИЯ.

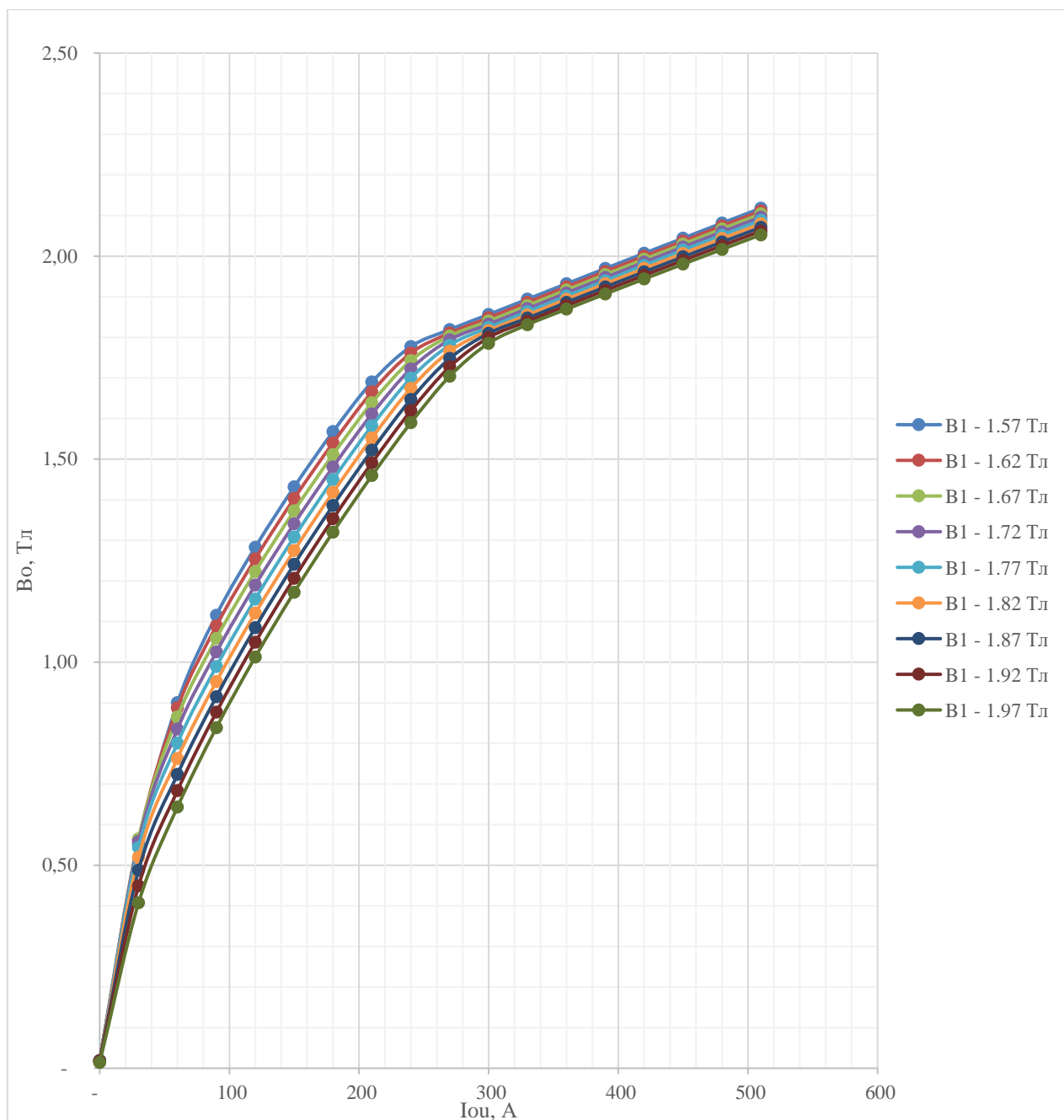


Рисунок 4.35- График изменения В₀

8. В начальный момент подмагничивания коэффициент гармоник тем больше, чем меньше номинальное напряжение компенсационной обмотки. Например по результатам моделирования модификации магнитопровода $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,30938 \text{ м}^2$, коэффициент гармоник при номинальных напряжениях 10 500 В и 31 500 В 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 4.1.

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

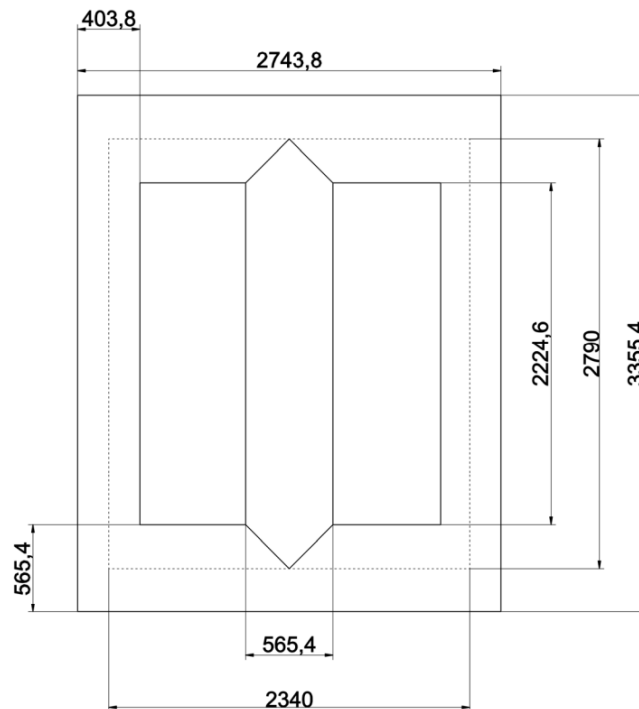


Рисунок 5.1 – Геометрические размеры магнитопровода УШР 110 кВ

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:

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

номинальный ток обмотки СН:

$$I_{\Phi СН} = \frac{S_{\Phi}}{U_{\Phi}} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{22,22} = 150 \text{ А},$$

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:

$$F_{\Phi CH} = I_{\Phi CH} \cdot W_{\Phi CH} = 150 \cdot 458 = 58\,050 \text{ А},$$

номинальный ток обмотки НН, соединенной в треугольник:

$$I_{\Phi HH} = \frac{S_{\Phi}}{U_{л}} = \frac{3,33 \cdot 10^3}{5,5} = 606 \text{ А},$$

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:

$$F_{\Phi HH} = I_{\Phi HH} \cdot W_{\Phi HH} = 606 \cdot 113 = 68\,416 \text{ А}$$

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 $I_{\text{оу}} = 730 \text{ А}$. Номинальный потребляемый ток из сети равен $I_{\text{со}} = 125 \text{ А}$. Максимальный потребляемый действующий ток в компенсационной обмотке при выбранном сечении и высоты стержня равен $I_{\text{ко}} = 29 \text{ А}$ (наступает при 40% потребляемой мощности реактора).

Таким образом сечение обмоток УШР:

$$S_{\text{оу}} = \frac{730}{1,51 \cdot 10^6} = 483 \text{ мм}^2.$$

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

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

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.

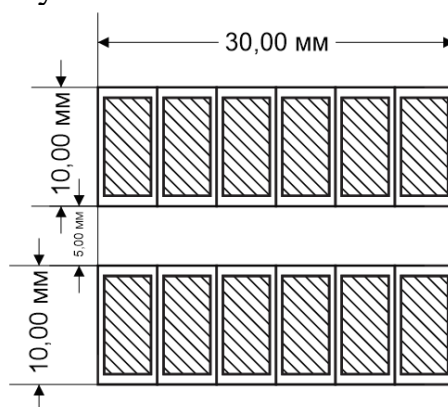


Рисунок 5.2 - Сечение витка обмотки ОУ из алюминиевого провода

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 $q = 1200 \frac{W}{m^2}$.

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

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

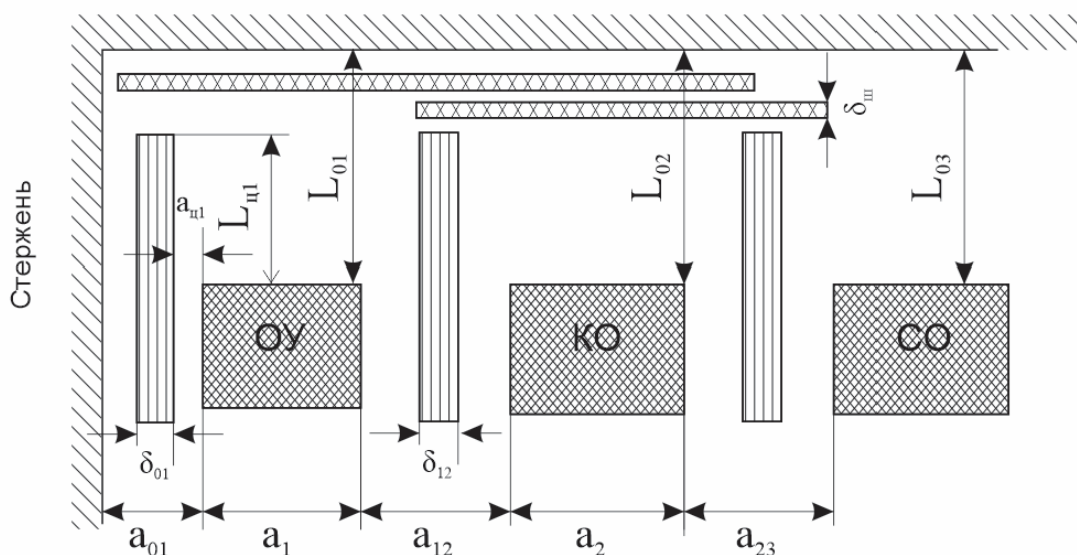


Рисунок 5.3 - Изоляционные расстояния обмоток УШР

КО от ярма, $L_{02} = 80$ 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 ярма, $L_{03} = 185$ 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

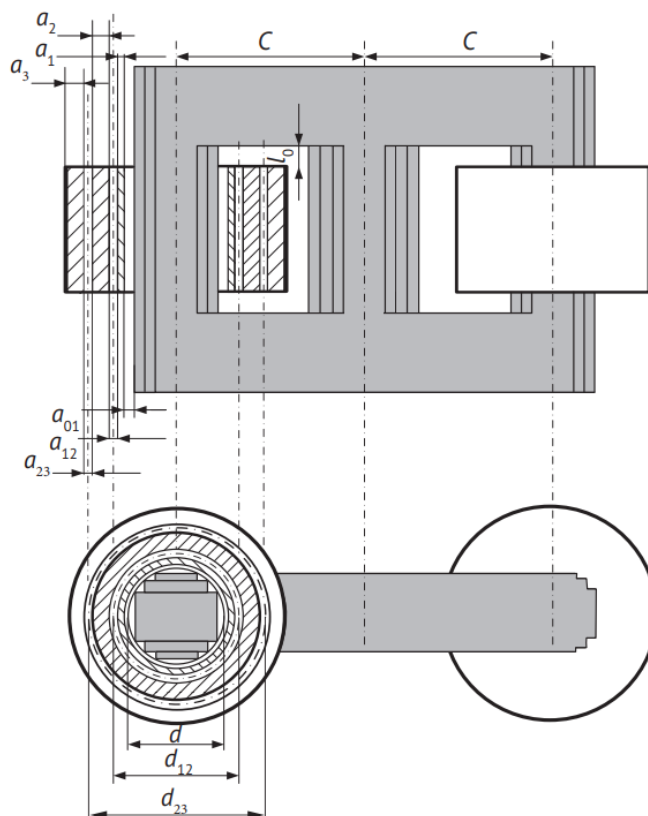


Рисунок 5.3 – Иллюстрация основных размеров УШР
Продольная изоляция обмоток.

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 марки проводов АПБ толщина изоляции на две стороны 0,45 (0,50).

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.

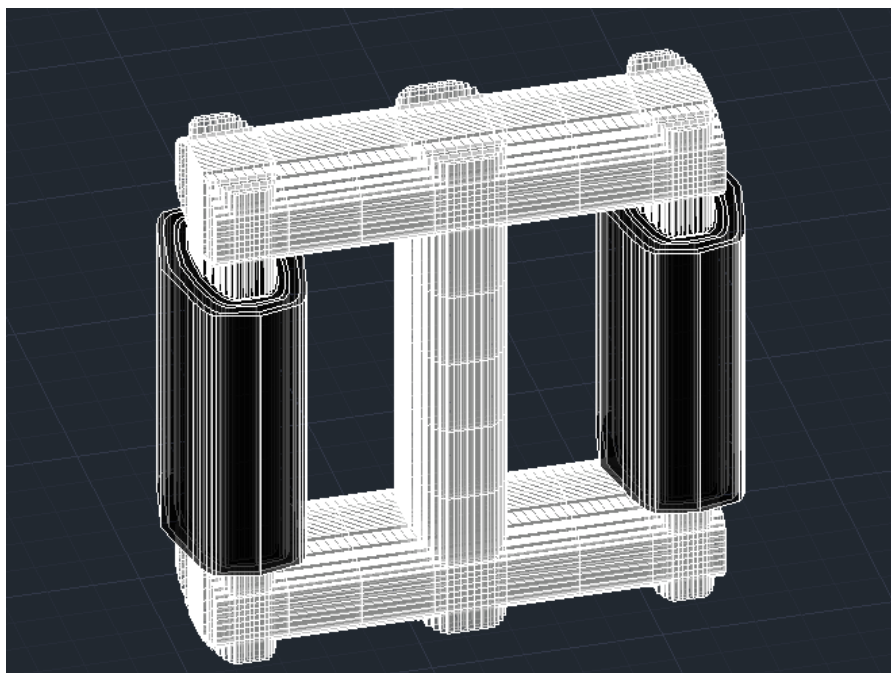


Рисунок 5.4 – Межобмоточная изоляция УШР

5.4 Геометрические размеры обмоток

Учитывая характеристики магнитопровода УШР, была рассчитана высота обмотки равная 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 их 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
W , 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 4.1.

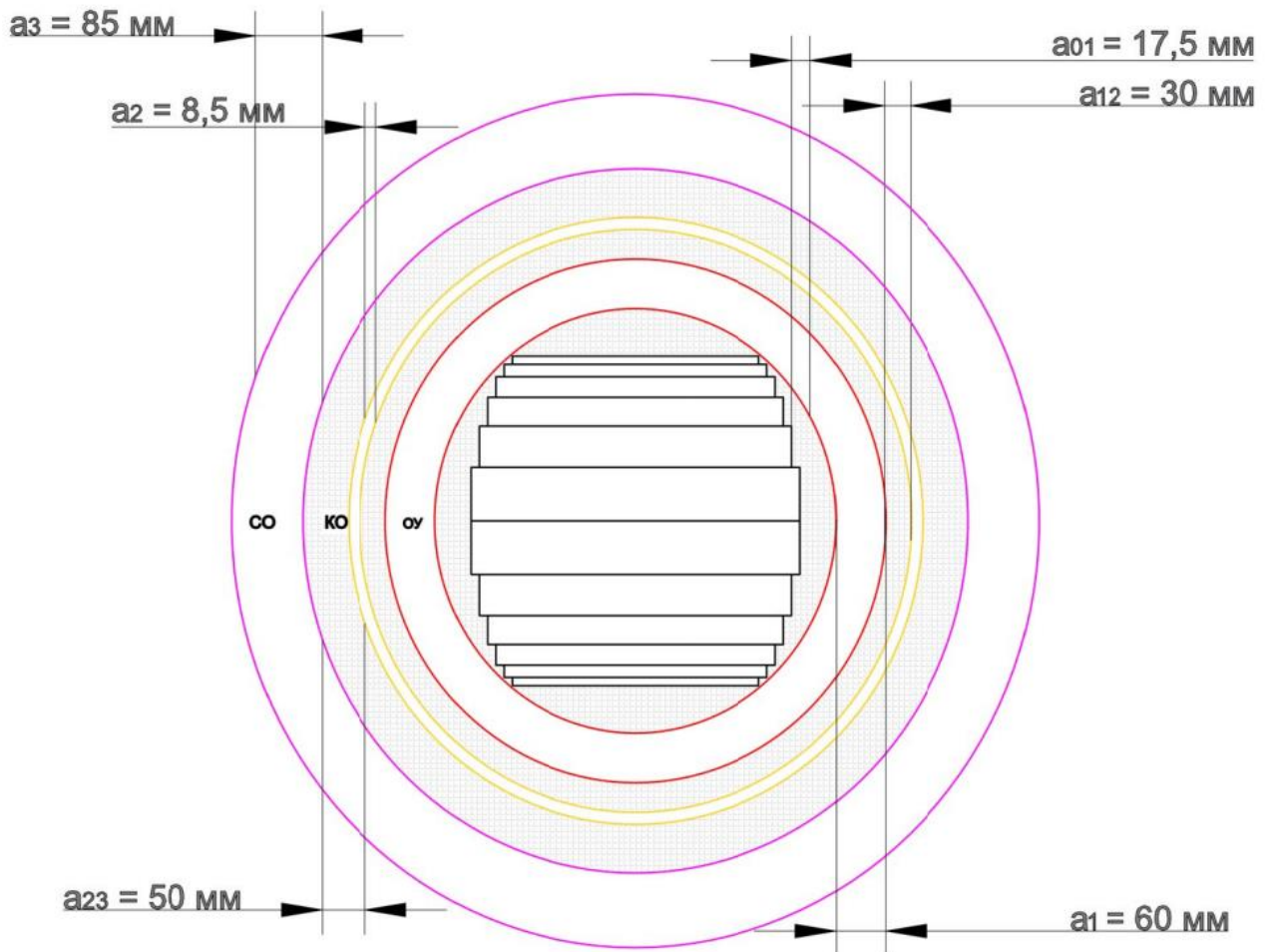


Рисунок 5.5 - Радиальное строение активной части однофазного УШР

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 Ё.

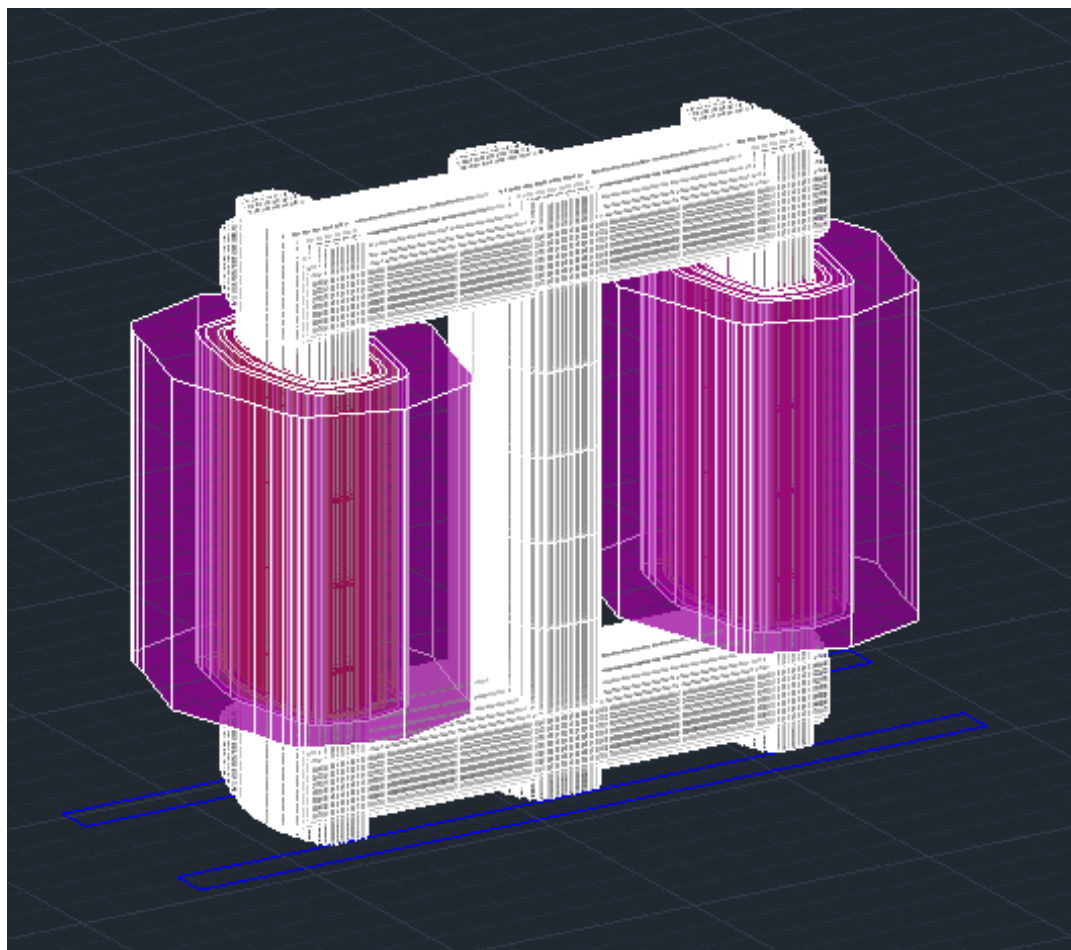


Рисунок 5.6 - Обмотки УШР в трехмерном исполнении

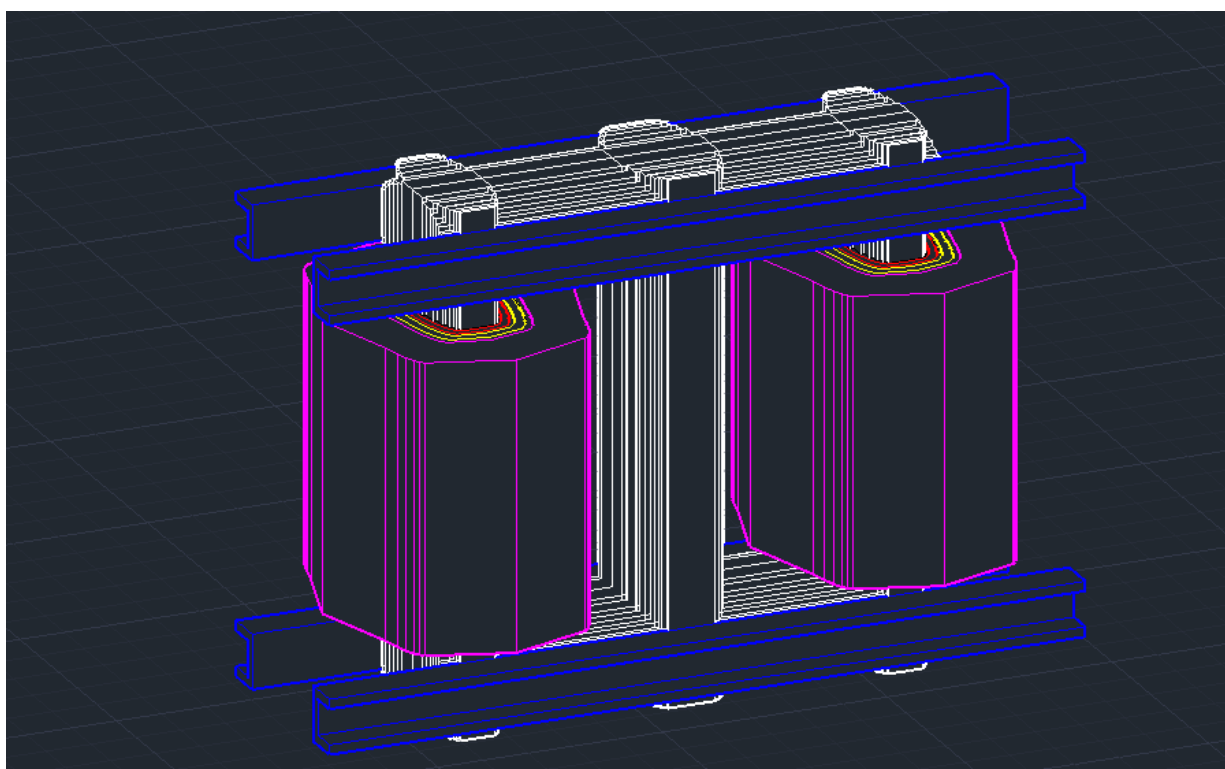


Рисунок 5.7 -Трехмерный вид одной фазы УШР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная 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 Ё размещены полученные акты внедрения от завода изготовителя трансформаторного оборудования. По результатам выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ конструкций и опыт эксплуатации существующих управляемых шунтирующих реакторов позволил выявить способ увеличения технико-экономических показателей трехстержневой конструкции УШР, путем применения принципа полупериодного насыщения. Более корректное определение конструктивных решений позволило обосновать параметры и испытать физические модели управляемых шунтирующих реакторов подмагничиванием постоянным током.

2. В графической среде Simulink математического пакета Matlab на базе стандартных библиотек Simscape разработана модель УШР, которая используется для анализа коммутационных и динамических процессов в реакторе при его работе в энергосистеме. Модель создана на основе реальной конструкции УШР, применяемых схмотехнических решениях и учитывает характеристику намагничивания стали, которая используется в магнитной системе реактора. Проверка адекватности результатов расчета, полученных с использованием разработанной модели, проводилась на основании экспериментальных исследований с физическими моделями УШР.

3. Предложенное и подтвержденное теоретическими расчетами в работе и имитационным моделированием применение принципа полупериодного насыщения для трехстержневой конструкции УШР позволило достичь снижения коэффициента гармоник THD до 1,09 при номинальных параметрах режима работы УШР. Оценено влияние третьей гармоники индукции на гармонический состав потребляемого из сети тока.

4. Разработан вариант модернизированной конструкции УШР мощностью 25 МВАр номинальным напряжением 110 кВ с трехстержневым магнитопроводом. Оптимальное соотношение сечений ярем и стержней определено с применением математических методов расчета.

5. Для получения полупериодного насыщения реактора, приняты конструктивные решения с учетом увеличения сечения и высоты стержней, подтвержденные результатами расчетов и моделирования в программе Matlab Simulink.

5. Исследованы процессы в УШР 110 кВ, влияющие на его быстродействие и применен способ, позволяющий существенным образом улучшить скоростные характеристики УШР 110 кВ без конструктивных

доработок электромагнитной части реактора.

6. По результатам комплексных исследований и конструктивных решений разработана рабочая конструкторская документация на основе использования современных программных продуктов 3D проектирования для организации собственного серийного производства в Республике Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi //Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. ISBN 0-7803-3455-8.
- 2 Долгополов А.Г., Соколов С.Е. Управляемые реакторы. Обзор технологий// Новости Электротехники. – 2012. - №3(75).
- 3 Электрические системы: Под ред. В.А. Веникова — Москва: Высшая школа, 1971. — 438 с., ил.
- 4 Bogdanovičs, R., 2015. Magnetically Controlled Shunt Reactors Overview.
- 5 Долгополов А.Г., Ивакин В.Н. Управляемые шунтирующие реакторы. Обзор и сравнительные характеристики // Новости электротехники.-2013. - №6(84).
- 6 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.
- 7 Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы /под редакцией профессора Г.А.Евдокунина. Издательский дом «Родная ладога», Санкт-Петербург, 2013г.
- 8 Долгополов А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы (принцип действия, конструкции, режимы работы, релейная защита и автоматика). М.: ИД «Энергия» 2015.
- 9 Fisher F., Friedlander E. D.C. controlled 100 MVA reactor // GEC Journal. 1955. Vol. 22. № 2.
- 10 Kramer W. Drehstromiransformator mit regelbaren Magnetisierungsstrom // ETZ-A, 1959. Bd 80. N. 4.
- 11 Либкинд М.С. Управляемый реактор для линии передачи переменного тока. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
- 12 Соколов С.Е. Исследование схем питания обмотки подмагни- чивания управляемого реактора с вращающимся магнитным полем. Энергетика и электрификация // Алма-Ата: КазПТИ, 1971, вып. 1.
- 13 Соколов С.Е. Трехфазный управляемый реактор с цилиндрическими обмотками/ Соколов С.Е., Брянцев А.М. // Тезисы докладов на V Всес. межвуз. конф. по теории и методам расчета нелинейных эл. цепей и систем. Ташкент, 1975, вып. 2.
- 14 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.
- 15 Соколов С.Е. О взаимосвязи гармоник нелинейности магнитного потока и напряженности поля трехфазных ферромагнитных устройств // Изв. вузов. Энергетика. - 1981. - № 6.
- 16 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.
- 17 Бобриков С.А. Метод изготовления магнитопровода катушки со

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

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

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

20 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, декабрь 2004 г.

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

22 Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ 50 МВАр пущен в эксплуатацию. // Электричество. - 2002. - № 3.

23 Дорожко Л.И., Лейтес Л.В. Сравнительный анализ различных конструкций управляемых реакторов// Электротехника. - 1991. - № 2.

24 Александров Г.Н., Кашина В.А Сравнение технико-экономических показателей неуправляемых и управляемых реакторов // Электротехника. - 1997. - № 1.

25 Boris V. Oleksyuk, Vladimir N. Tulsy and Stefan Palis. Magnetically Controlled Shunt Reactors as Sources of Current and Voltage Harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. Volume: 33, Issue: 4, August 2018. Page(s): 1818 – 1824.

26 Соколов С.Е., Долгополов А.Г. Управляемые реакторы. Обзор технологий. Новости электротехники. Журнал №3 (75) 2012 год.

27 ZHANG KEJU, WANG XIN, AND BING HE, Research on Reactive Power Compensation Based on Magnetic Saturation Controllable Reactor, IEEE Access VOLUME 10, 2022.

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

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

30 TONG BEN, FANGYUAN CHEN, LONG CHEN, AHMED ABU-SIADA, LIBING JING AND RONGGE YAN, Electromagnetic Vibration Analysis of Magnetically Controlled Reactor Considering DC Magnetic Flux, IEEE Access VOLUME 8, 2020.

31 Yifan Wang and Guozhu Chen, A multi-valve controlled saturable reactor and its harmonic optimization, COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical, July 2014.

32 Boris Bazilev, Victor Bespalov, Svetlana Dyagileva, Petr Makarov, Maria Makarova, and 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.

33 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, December 2013.

34 Dale S.L. Dolan, P.W. Lehn, Analysis of a Virtual Air Gap Variable Reactor, IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference.

35 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, Volume 129, July 2021.

36 Zhou Li, Kashif Mehmood, Kaihua Xie, Magnetically controllable reactor based multi-FACTS coordination control strategy, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Volume 133, December 2021.

37 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, pp 155-159 April 2020.

38 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 Vols 960-961 (2014) pp 1258-1263

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

40 Li Ren, Ying Xu, Fengshun Jiao, Hongda Dong, Shifeng Shen, Jingdong Li, Meng Song, Jing Shi, and Yuejin Tang. Evaluation of Three Designs for a 35-kV Class Superconducting Reactor. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 24, NO. 4, AUGUST 2014.

41 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, Vols. 732-733, pp 1090-1094.

42 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.

43 Zuoshuai Wang, Yuejin Tang, Li Ren, Sinian Yan, Zhangwei Yang, Ying Xu, and Chi Zhang, Development of a New Type of HTS Controllable Reactor With Orthogonally Configured Core, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 27, NO. 4, JUNE 2017.

44 Yu Zhang, Jingdong Li, Zuoshuai Wang, Li Ren, Shuqiang Guo, Ying Xu, Yuejin Tang, Wei Wang, Ziheng Hu, and Bin Zhang, Study on AC Loss Characteristics in HTS Windings of a HTS Controllable Reactor With Orthogonally

Configured Core, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 29, NO. 5, AUGUST 2019.

45 Zuoshuai Wang , Yuejin Tang, Sinian Yan , Li Ren , Kang Gong, Lu Chen, Yu Zhang, and 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, VOL. 28, NO. 3, APRIL 2018.

46 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 г.

47 Соколов С.Е. Трубанов В.А. Трехфазный управляемый насыщающийся реактор. АС СССР №1394247 А1. Опубл. БИ № 17 от 07.05.88.

48 Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сборник статей под ред. д.т.н., профессора Брянцева А.М. М.6 Знак. 2010 г.

49 A review of magnetically controlled shunt reactor for power quality improvement with renewable energy applications. Mehmet Tümay, Tuğçe Demirdelen, Selva Bal, Rahmi İlker Kayaalp, Burcu Doğru, Mahmut Aksoy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 77 (2017) 215 - 228.

50 Mathematical Model and Simulation of an Improved Magnetically Controlled MCR, Yakun Li, Teng Li, Yonggang Ma and Wei Zhang, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016 L. Jia et al. (eds.), Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation.

51 Leakage Inductance Calculation and Simulation Research of Extra-high Voltage Magnetically Controlled Shunt MCR, Liang Yan-ping, Zhang Fang, Zhang Hai-ting, An Zhen; 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China, 26-28 June 2010. Electronic ISBN:978-1-4244-7739-5, Print ISBN:978-1-4244-7737-1.

52 Modeling and Harmonic Optimization of a Two-Stage Saturable Magnetically Controlled MCR for an Arc Suppression Coil, Xuxuan Chen, Member, IEEE, Baichao Chen, Cuihua Tian, Jiaxin Yuan, Member, IEEE, and Yaozhong Liu, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 59, NO. 7, JULY 2012.

53 Protection scheme for turn-to-turn faults of magnetically controlled shunt MCR based on waveform similarity comparison, Tao Zheng,* , Xiaoxiao Liu , Junqi Wei, M. Asghar Khan , Xiaoli Wang, Electric Power Systems Research, Volume 177, December 2019, 105980.

54 Modeling and impacts analysis of energization transient of EHV/UHV magnetically controlled shunt MCR, Tao Zheng,| Ting Huang, Fenfen Zhang, Yanjie Zhao, Lianguang Liu, July 2017International Transactions on Electrical Energy Systems 27(7):e2330,

55 Mingxing Tian, Qingfu Li and Qunfeng Li, A Controllable Reactor of Transformer Type, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 4, OCTOBER 2004.

56 Research of Magnetically Controlled MCR Simulation Model and its

Experiments, 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5, 2012, Harbin, China, ZHAO Shi-shuo, YIN Zhong-dong, Li Peng.

57 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.

58 Detailed Simulation of SVC Transient Performance Using PSCAD, P.K. Muttik, P.Wang, M.W.H. Minchin. PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409), IEEE.

59 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 July 18-20, 2013.

60 Modeling and characteristics research on EHV magnetically controlled MCR, Yao Yao, Baichao Chen, Cuihua Tian, 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Print ISBN:978-981-05-9423-7, Date of Conference: 3-6 Dec. 2007, Singapore.

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

62 A. R. Luchko, T. V. Popova, Simulation modeling of electromagnetic processes in magnetically coupled electrical circuits. "Electrical Engineering and Power Engineering" №1, 2009 ISSN 1607–6761

63 Luchko A.R., Ebadian M. Principles of mathematical modeling of dynamic processes in bias-controlled shunt MCRs in SimPowerSystems (Matlab)// Electricity, 2008. — N 3. — С. 70–75. — ISSN 0013-5380.

64 TAO ZHENG, KAI YU, Research on the Stimulation Modeling of Magnetically Controlled Shunt MCR, 2018 international conference on power system technology.

65 Ориентиры развития Казахстанской экономики: новые экономические вызовы. Магруппова З.М., Абзалбек Г.А., Гарцуева Е.В. Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2022. Т. 16, № 1. С. 178–182

66 Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» 1 сентября 2023 года. Вторая сессия Парламента VIII созыва.

67 Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 24 марта 2022 года № 104. Об утверждении Энергетического баланса Республики Казахстан до 2035 года (с изменениями от 30.01.2023 г.).

68 О концепции по переходу Республики Казахстан к «Зеленой экономике». Указ Президента Республики Казахстан от 30 мая 2013 года № 577.

69 Об утверждении Программы развития внутристрановой ценности и экспортоориентированных производств. Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 июня 2022 года № 452.

70 The 500 kV MCSR Modeling and Steady-state Characteristics Analysis.

Liang Yan-ping, Zhang Yue, Zhang Hai-ting, An Zhen. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. ISBN:978-1-4577-1043-8.

ЗАДАНИЕ 1
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 ярем – $0,26 \text{ м}^2$.
 Обмоточные данные приведены на рисунке 1

Напряжение, В	Слоев	Витков в слое	Всего витков	Провод
36	2	13	26	ПБС-2x7,5
42	2	15,5	31	ПБС-2,24x5
127	2	47	93	ПЭТВ $\phi 2,12$
220	2	80	160	ПЭТВ $\phi 15$
380	3	92	275	ПЭТВ $\phi 112$

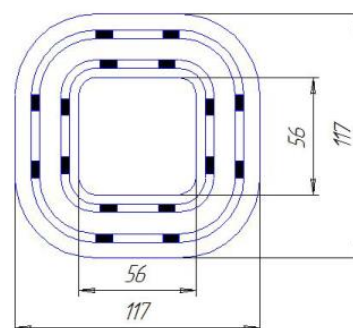


Рисунок 1

Для модели управляемого реактора необходимо изготовить три трехстержневых магнитопровода с прямым стыком согласно рисунка 2, с сохранением величины индукции, высоты и сечения крайних стержней (1,2) и с увеличением сечения ярем 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 2.

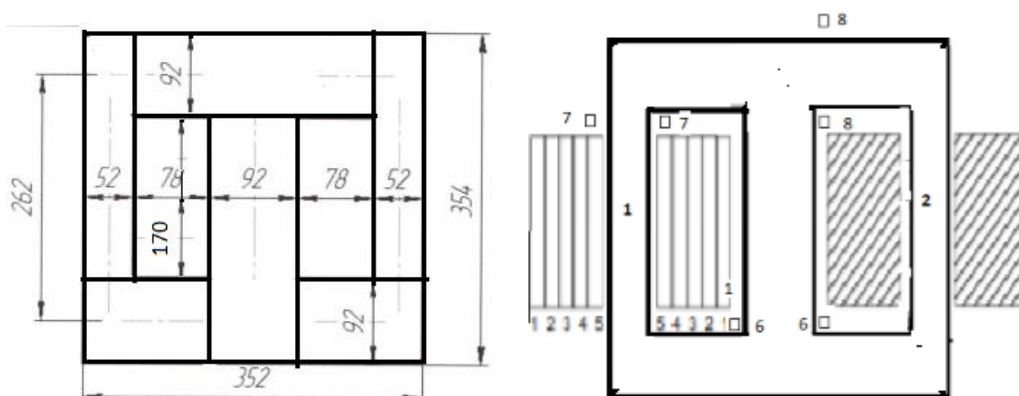


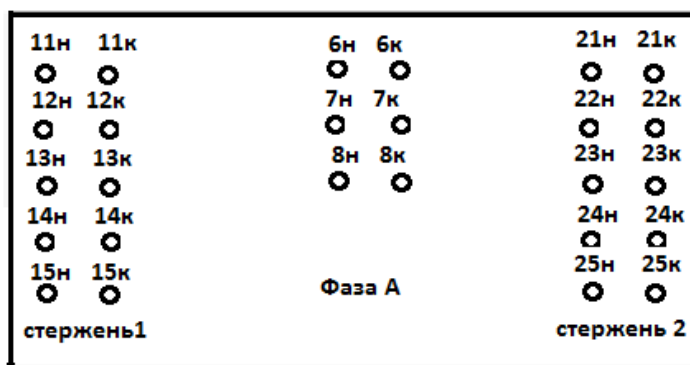
Рисунок 2

- 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 3.

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



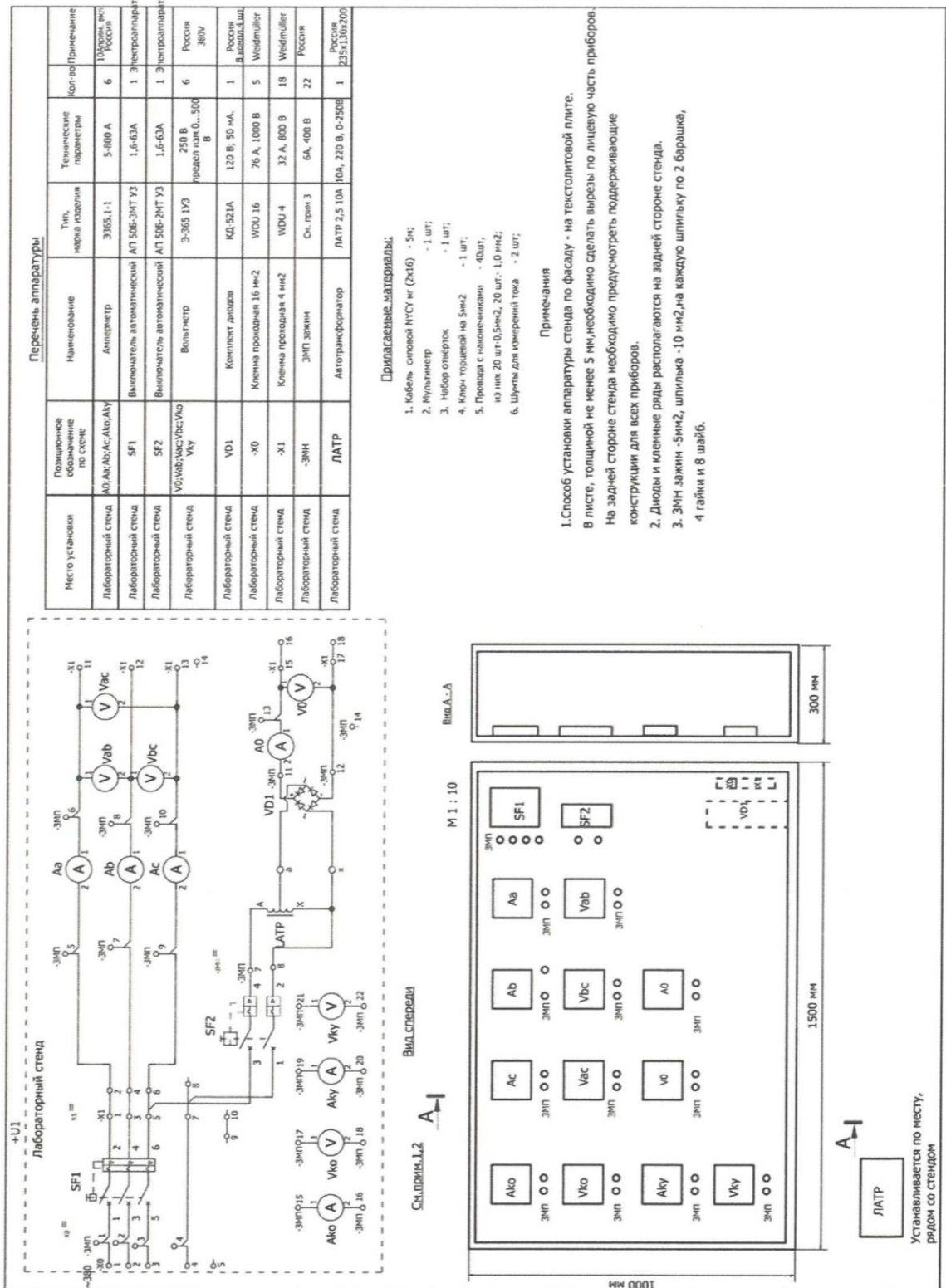
Маркировка выводов обмоток:

- 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 3

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

Схема и размещение оборудования испытательного стенда



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)					
	Обмотки	Измеренные значения, Мом T= __12__ °C				
1.Измерение сопротивления изоляции	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
	Стержень 2	21Н-21К	15Н-15К	10,587	+0,303	10,555
			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
21Н-21К		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 <u>12</u> °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	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-0,45м 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 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	1,7193	-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__ °С	Стержень магнитопровода		Отводы обмоток	Сопротивление, Ом
		Стержень 1		11Н-11К
			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	Гопышев К.Х.	<i>Гопышев</i>	
Начальник (мастер) испытательной лаборатории	Атеев Т.Р.	<i>Атеев</i>	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)					
	Обмотки	Измеренные значения, Мом T= __12__°C				
1.Измерение сопротивления изоляции	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	1,7196	-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	

Таблица Г.1 – Данные кривой намагничивания стали

№	B, Тл	H, А/м	VA, VA/кг	P, Вт/кг	F, Гц
1	0,1	5,8	0,011	0,0045	50
2	0,15	7,94	0,024	0,0097	50
3	0,2	9,8	0,04	0,017	50
4	0,3	13	0,08	0,036	50
5	0,4	15,5	0,128	0,063	50
6	0,5	17,6	0,18	0,096	50
7	0,6	19,4	0,24	0,135	50
8	0,7	21	0,3	0,18	50
9	0,8	22,5	0,37	0,231	50
10	0,9	23,9	0,44	0,288	50
11	1	25,2	0,52	0,35	50
12	1,1	26,5	0,6	0,42	50
13	1,2	28	0,67	0,49	50
14	1,3	30	0,76	0,57	50
15	1,4	32,7	0,89	0,66	50
16	1,5	37,8	1,05	0,77	50
17	1,6	48,4	1,3	0,9	50
18	1,7	82	1,79	1,07	50
19	1,75	125	2,44	1,19	50
20	1,8	220	3,98	1,38	50
21	1,825	321	5,63	1,49	50
22	1,85	475	8,1	1,61	50
23	1,875	707	12	1,76	50
24	1,9	1060	18,5	1,93	50
25	1,82	1485	26,3	2,1	50
26	1,94	2119	37,8	2,3	50
27	1,96	3269	57	2,52	50

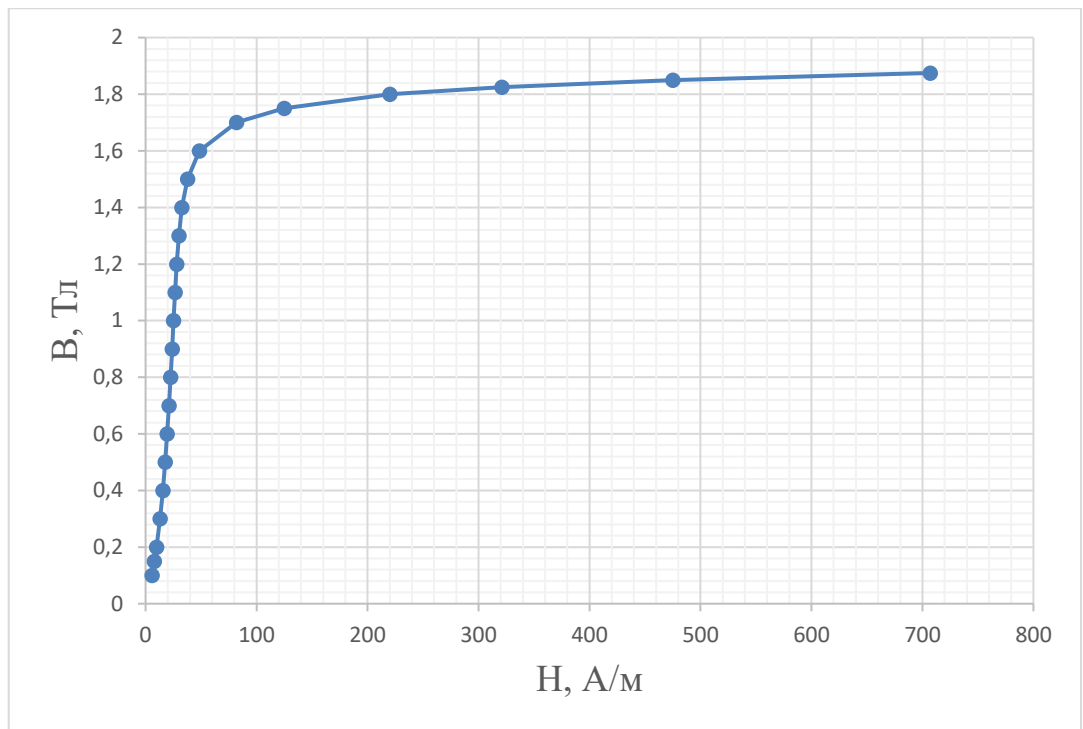


Рисунок Г.1 – Кривая намагничивания стали

Таблица Д.1 – Сводная таблица описание 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 - 11115000/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

	<p>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</p>		<p>Напряжение одного витка ОУ, В – 44,11 Кол-во витков СО 1505 Кол-во витков КО 137-412 Кол-во витков ОУ 238</p>
5	<p>сечение стержня - 0,127079 м² сечение ярма – 0,24907 м² 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</p>	11	<p>сечение стержня - 0,150184 м² сечение ярма – 0,30938 м² 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</p>
6	<p>сечение стержня - 0,132855 м² сечение ярма – 0,26040 м² 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</p>		

Код Matlab

```

clear
clc
close all
Q = 25e6;
Uco = 115000;
Uou = 5500;
S = 0.150184;
Sy = 0.30938;
Vco = 1.72;
Vou = 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 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

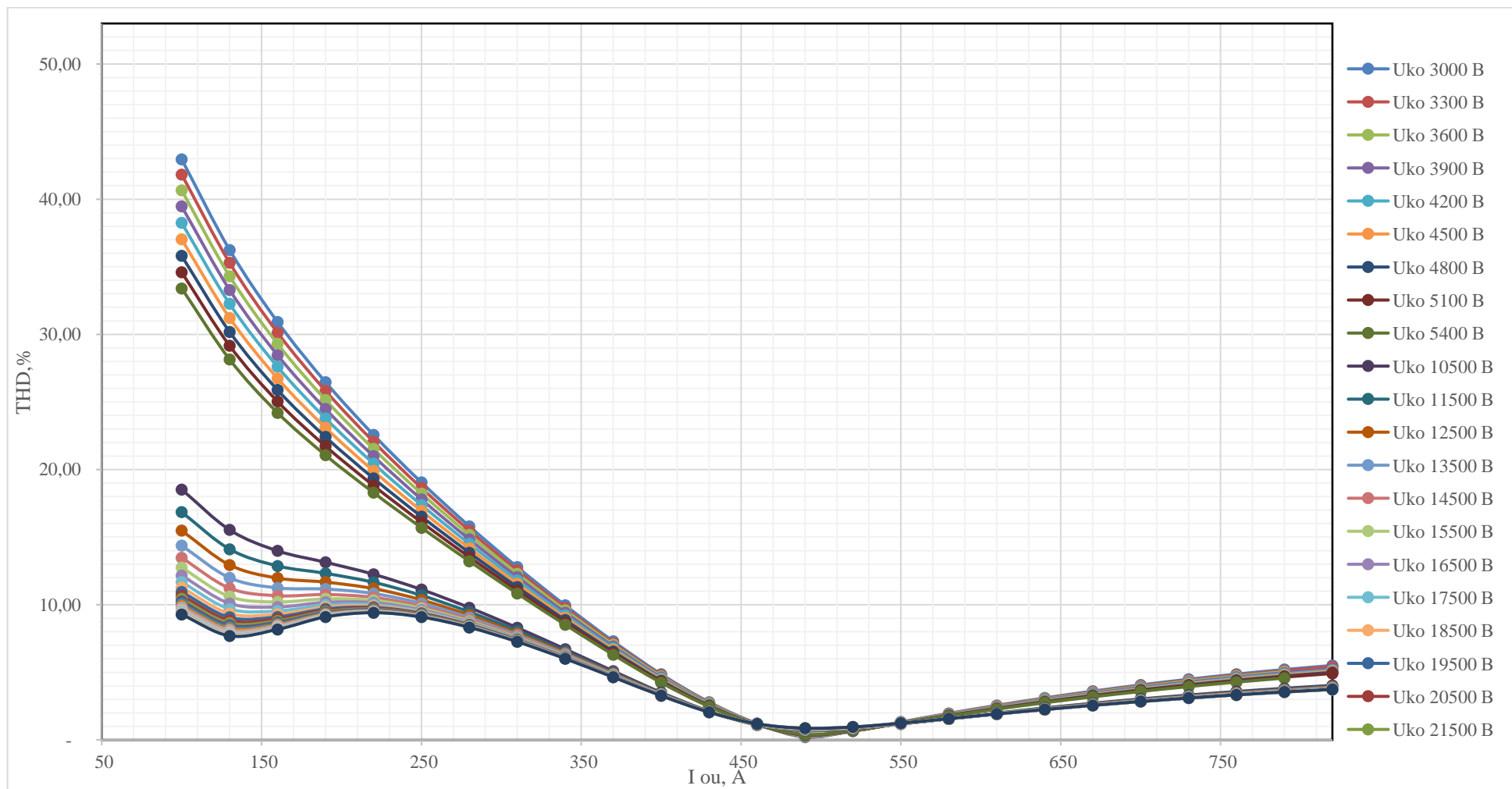


Рисунок Д.1 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} Стержня - 0,103973 м² Сярем - 0,20379 м²

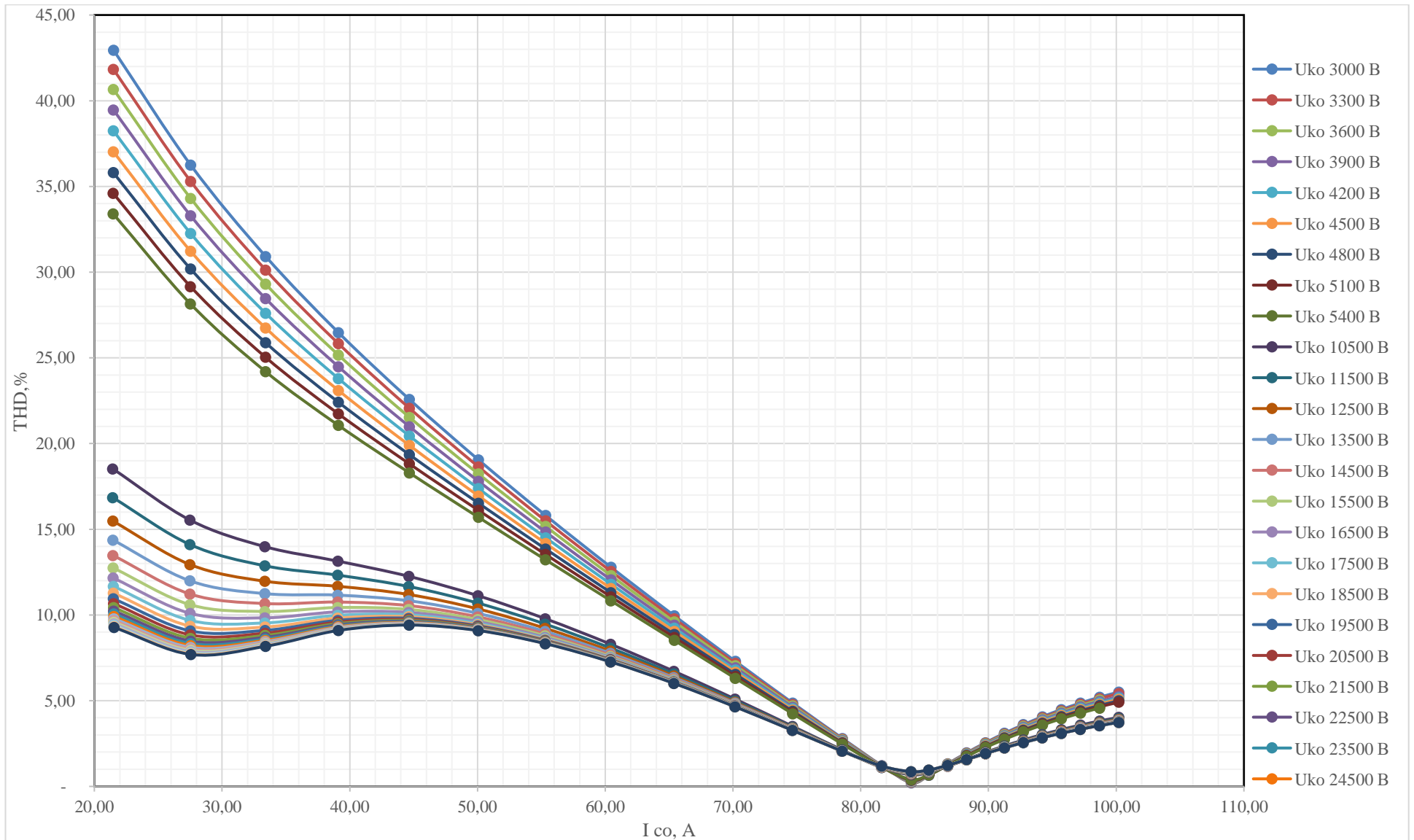


Рисунок Д.2 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,103973 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,20379 \text{ м}^2$

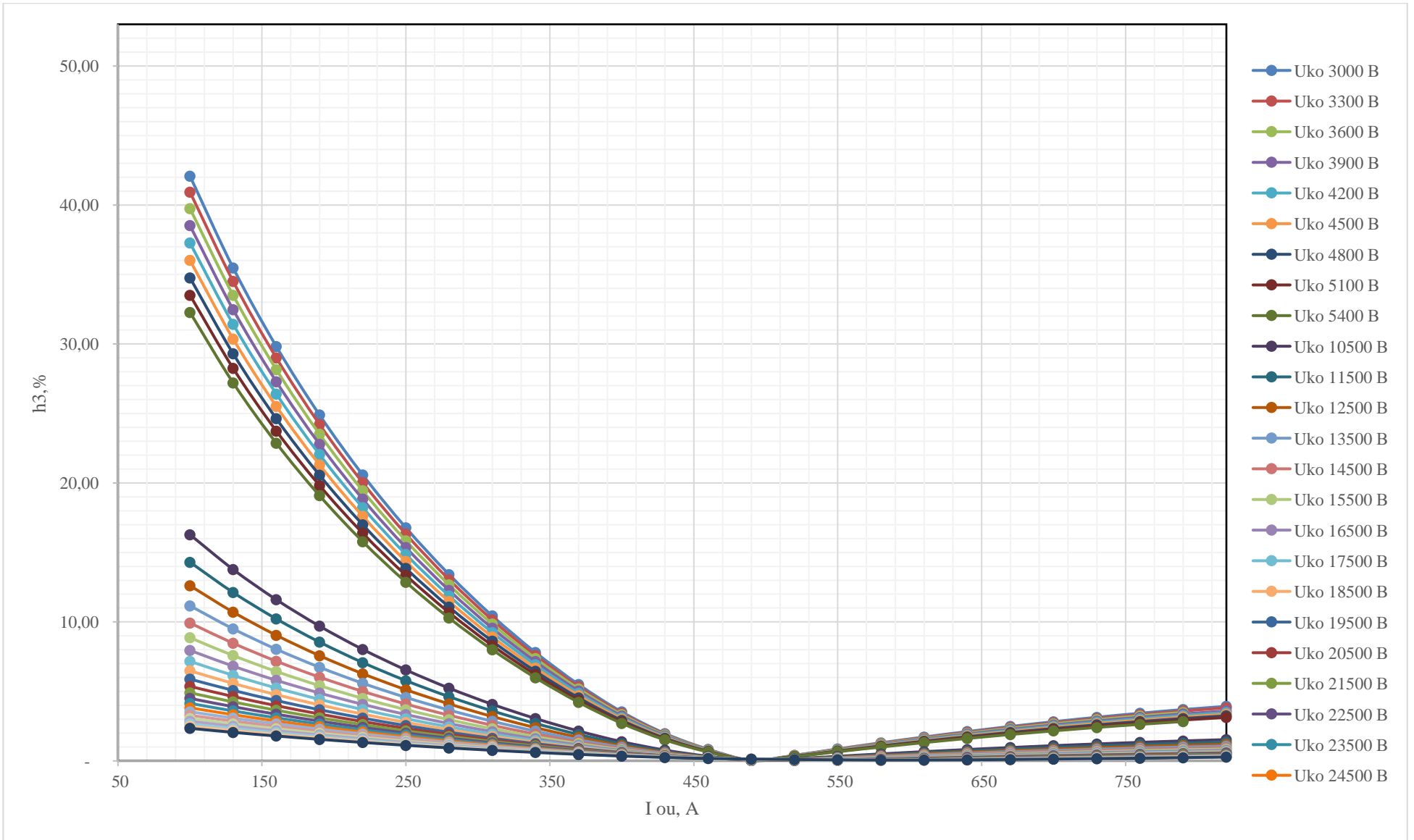


Рисунок Д.3 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,103973 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,20379 \text{ м}^2$

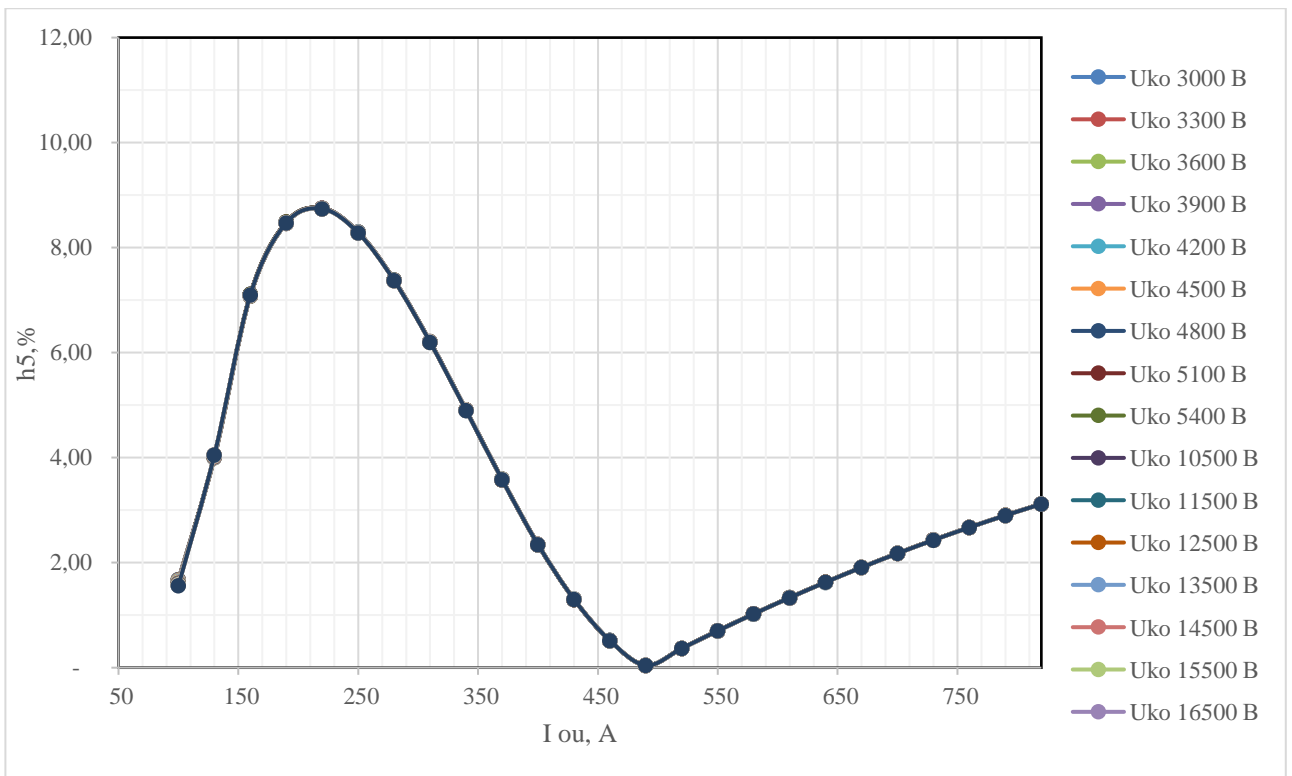


Рисунок Д.4 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{стержня} - 0,103973 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,20379 \text{ м}^2$

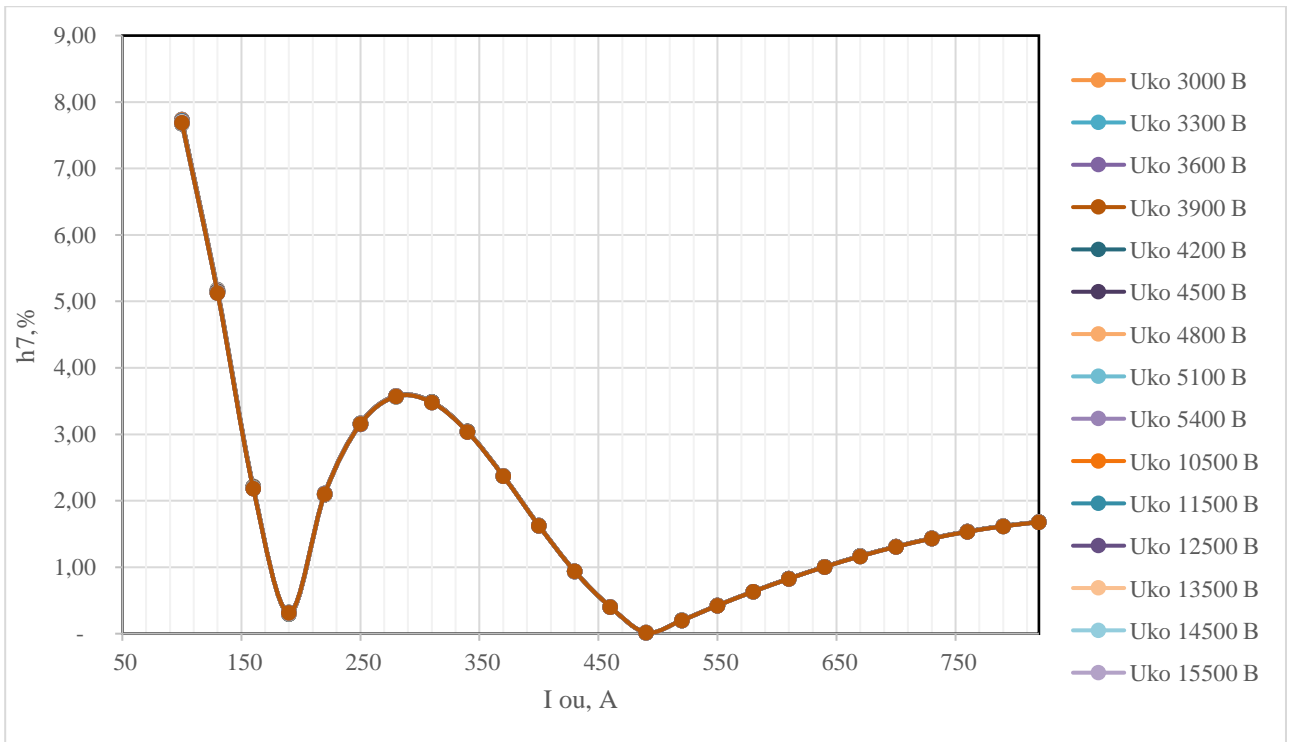


Рисунок Д.5 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,103973 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,20379 \text{ м}^2$

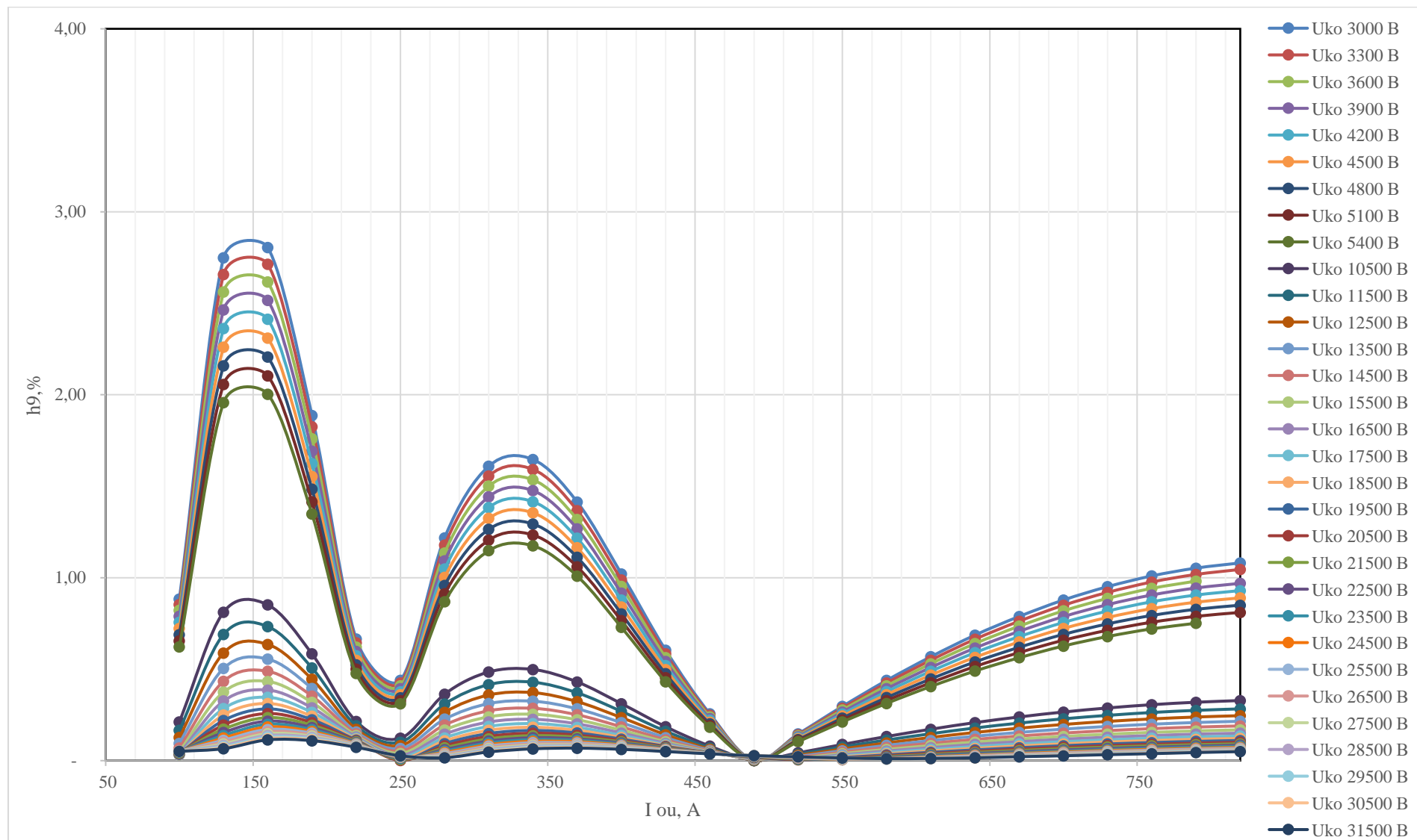


Рисунок Д.6 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,103973 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,20379 \text{ м}^2$

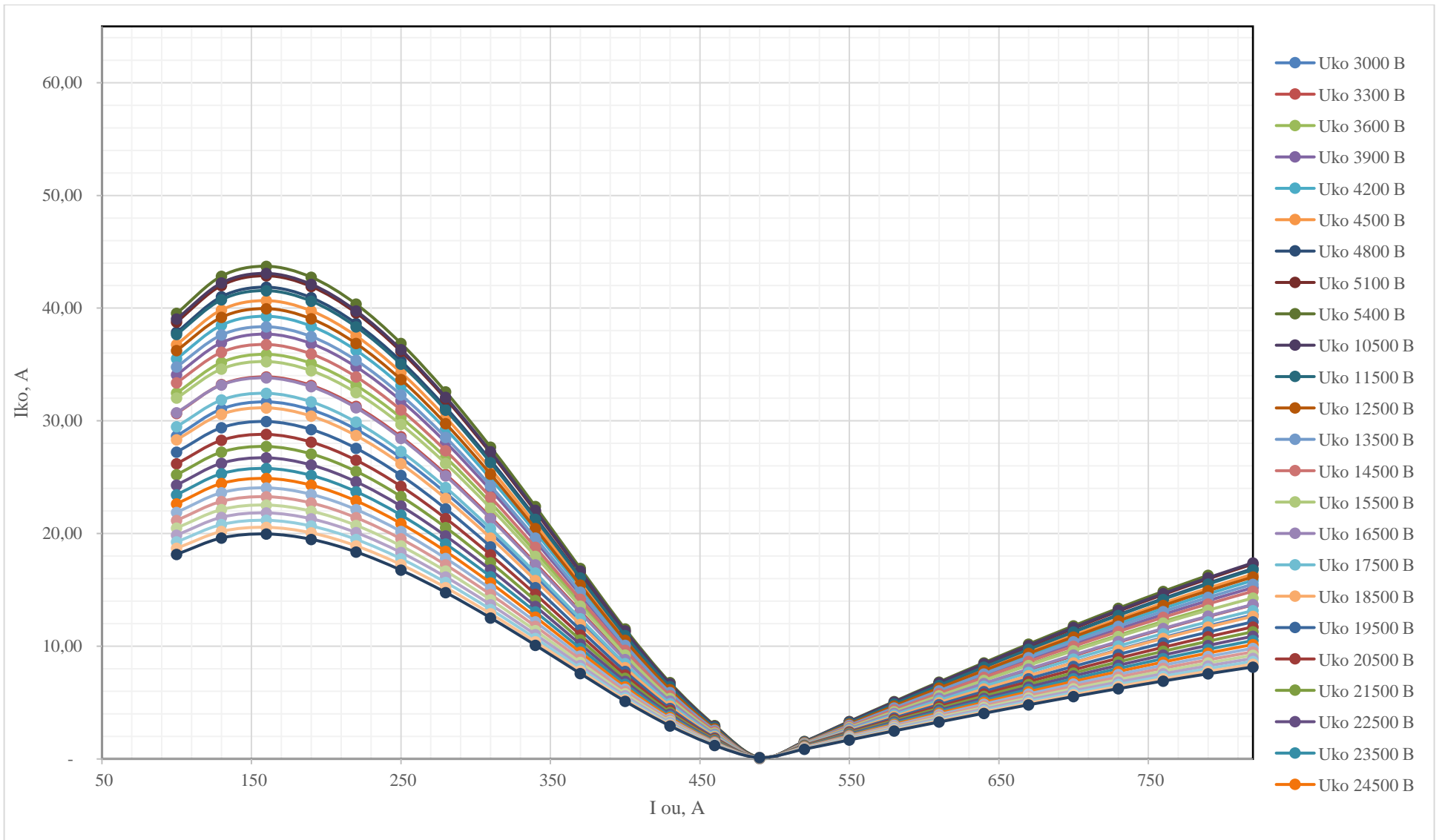


Рисунок Д.7 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,103973 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,20379 \text{ м}^2$

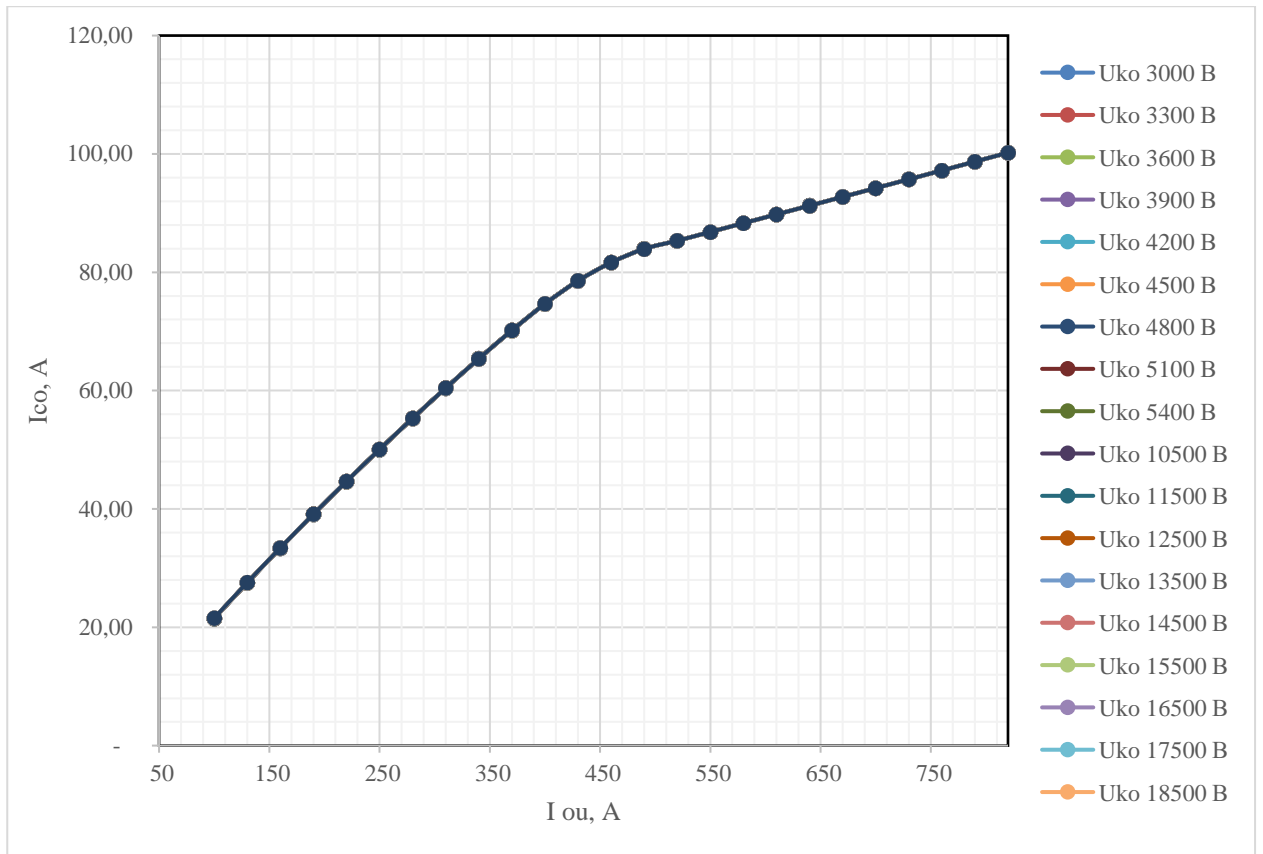


Рисунок Д.8 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,103973 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,20379 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,24907 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

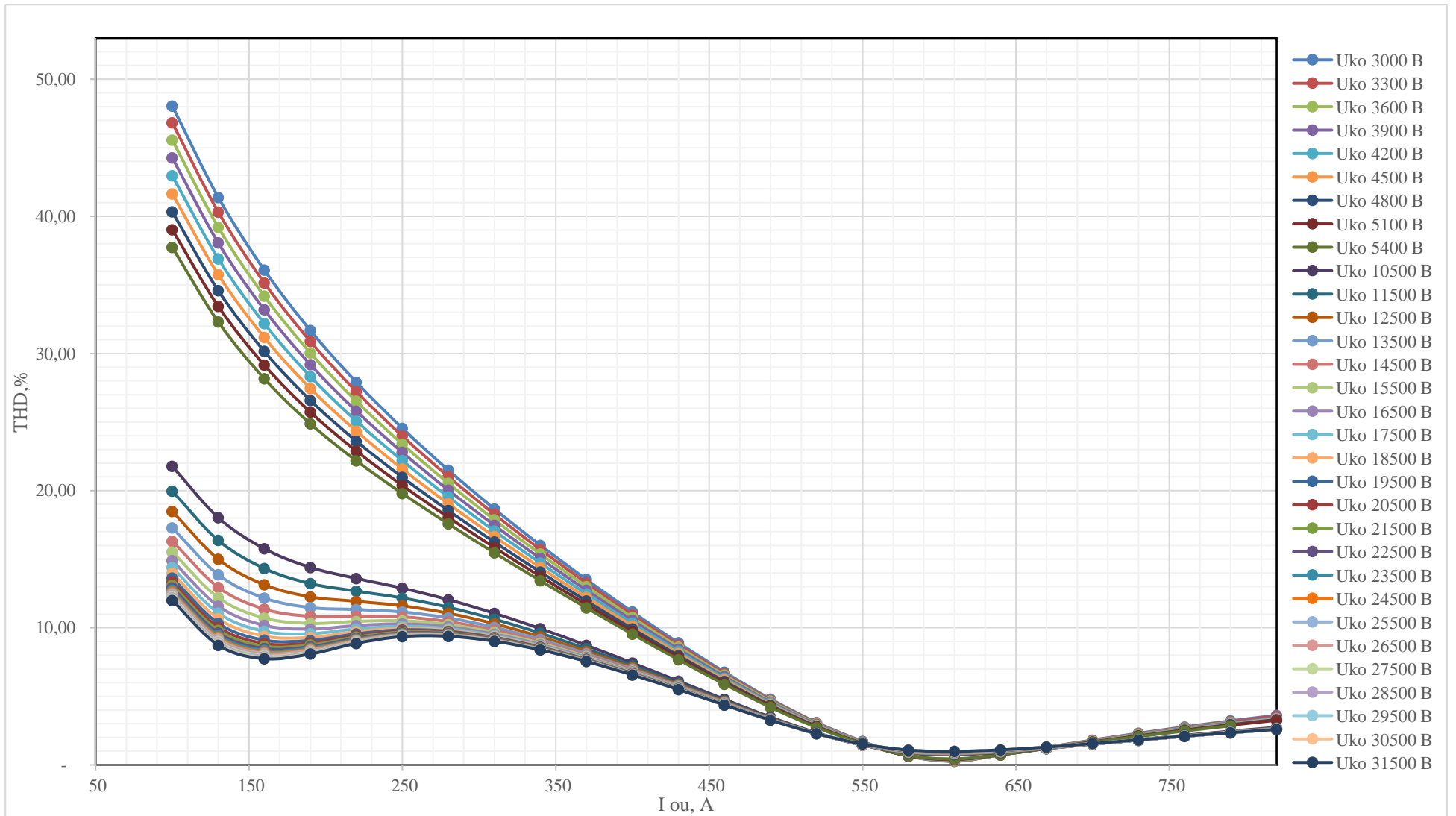
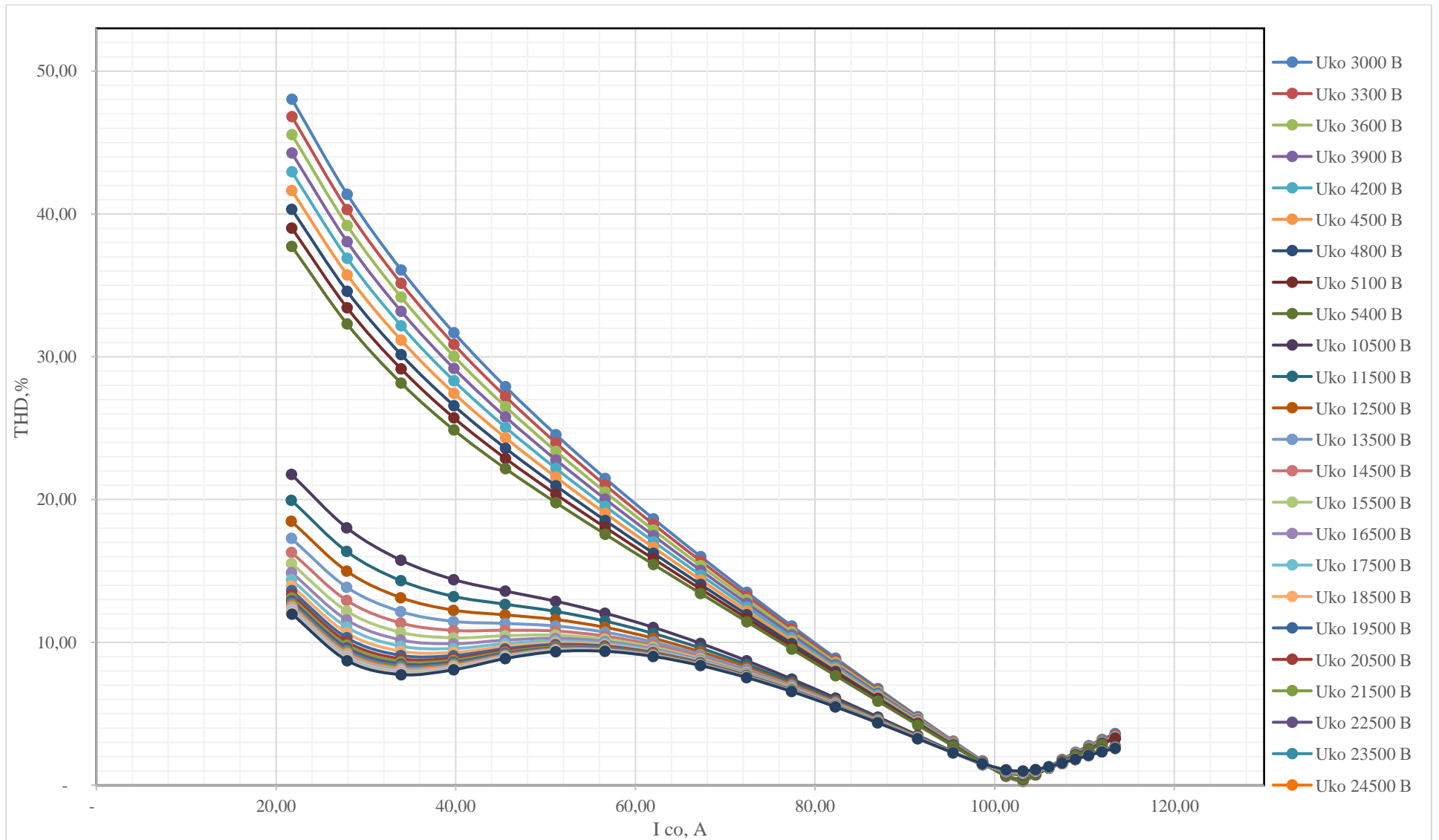


Рисунок Д.9 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,127079 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,24907 \text{ м}^2$



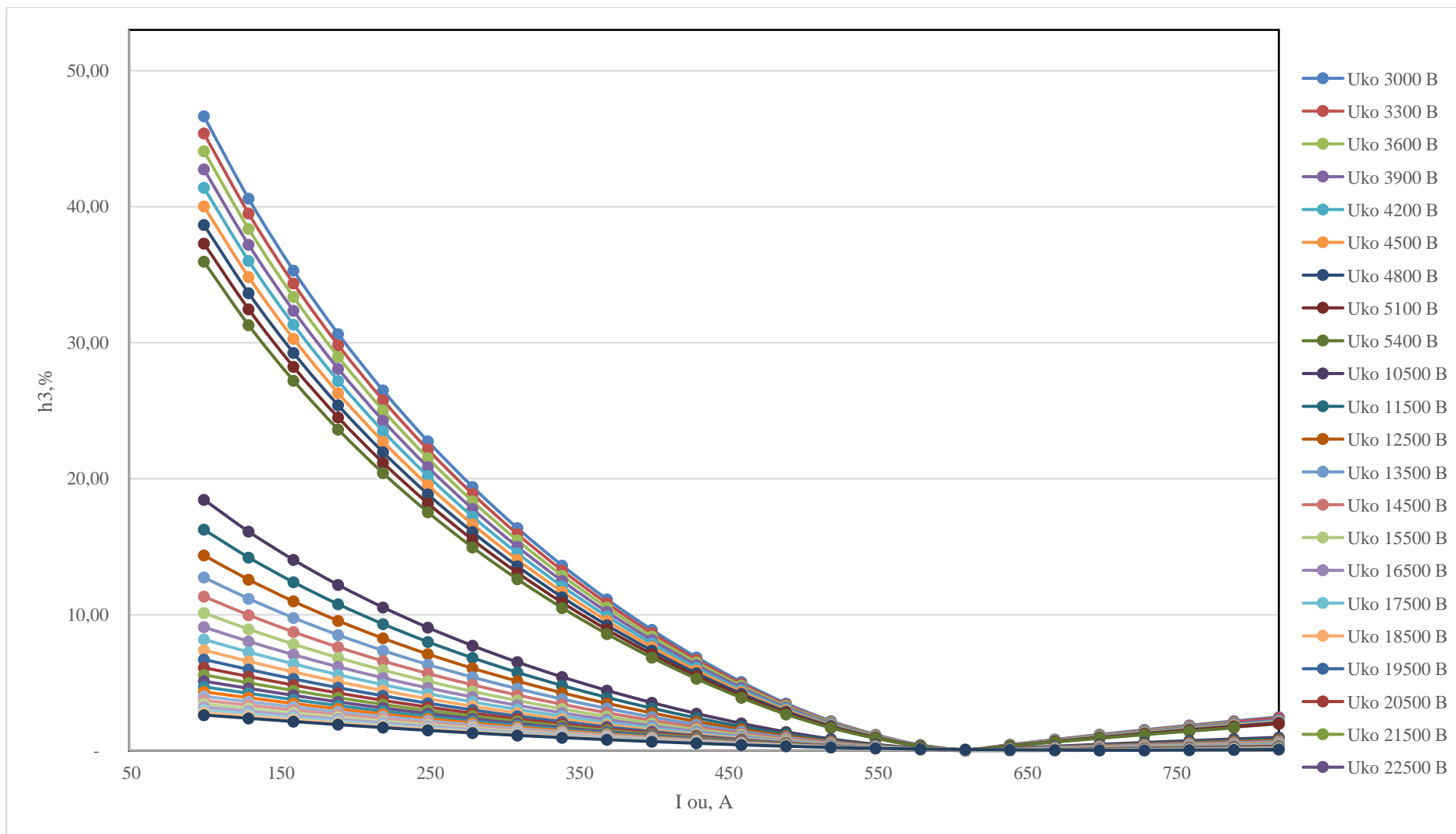


Рисунок Д.11 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{\text{стержня}} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,24907 \text{ м}^2$

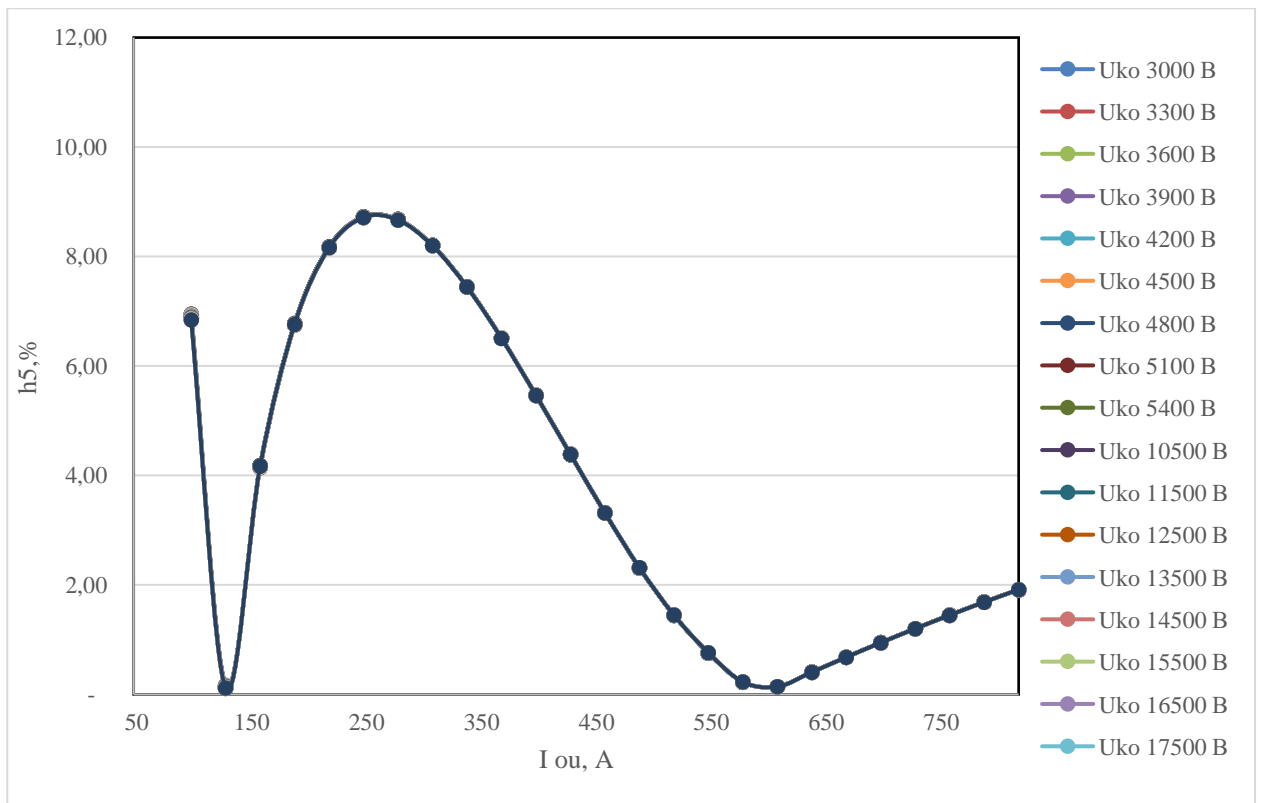


Рисунок Д.12 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{стержня} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,24907 \text{ м}^2$

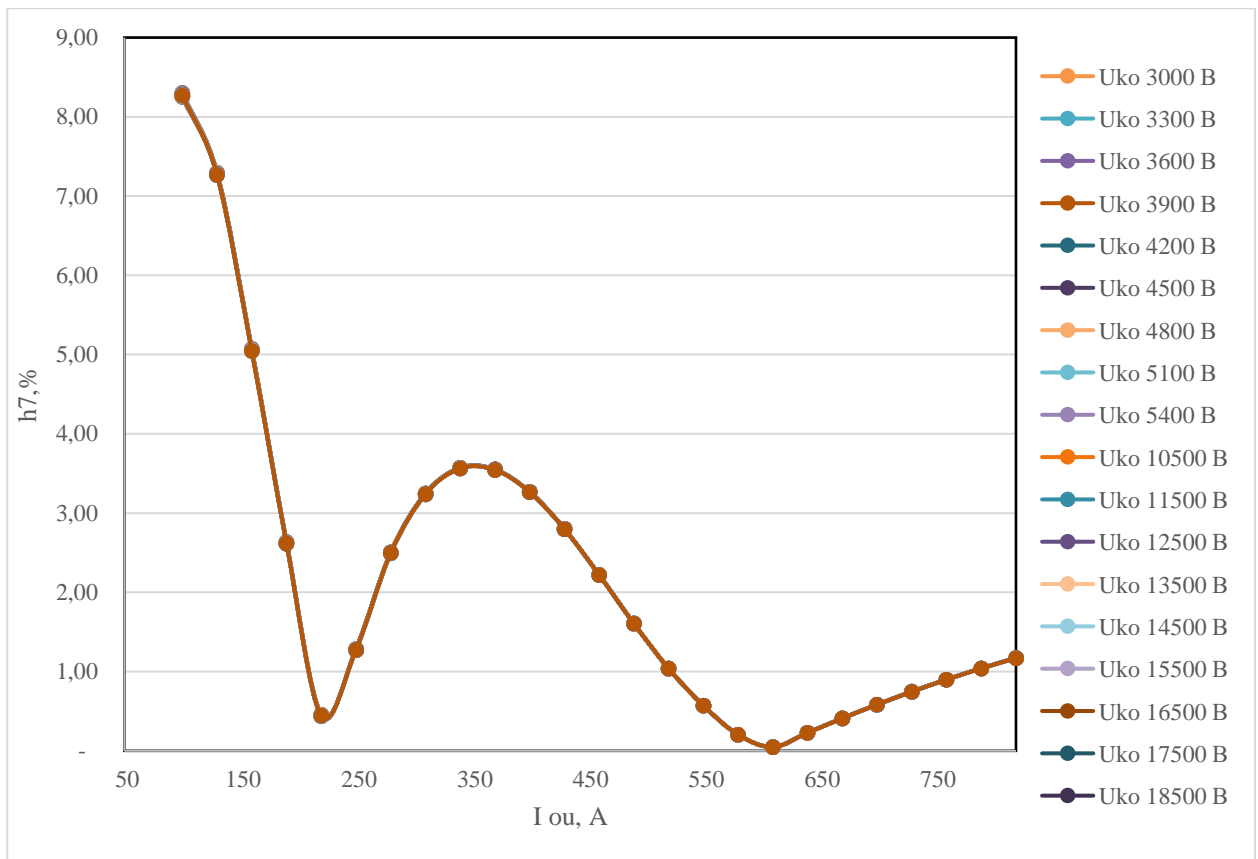


Рисунок Д.13 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,24907 \text{ м}^2$

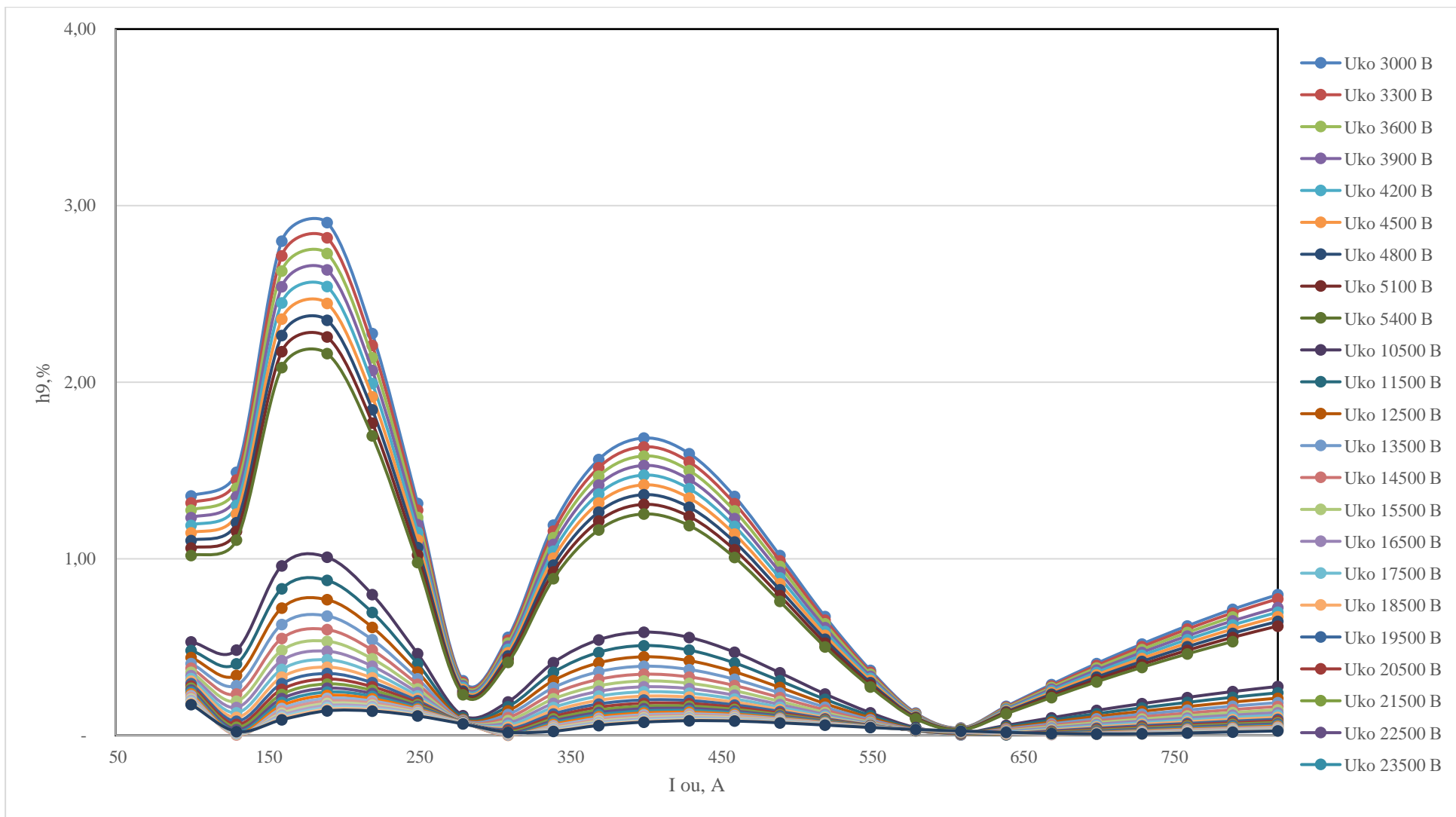


Рисунок Д.14 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{ярм} - 0,24907 \text{ м}^2$

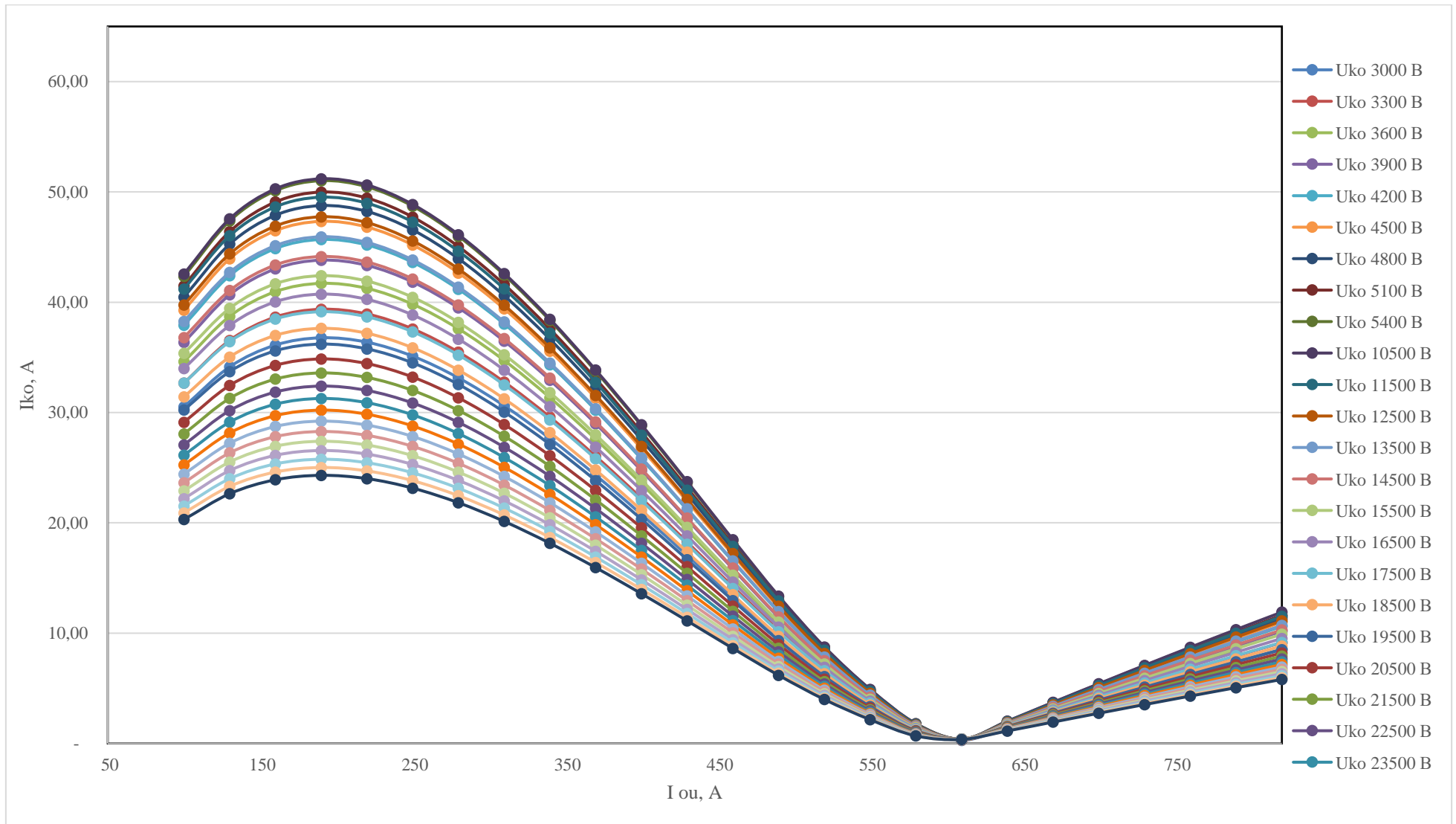


Рисунок Д.15 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,127079 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,24907 \text{ м}^2$

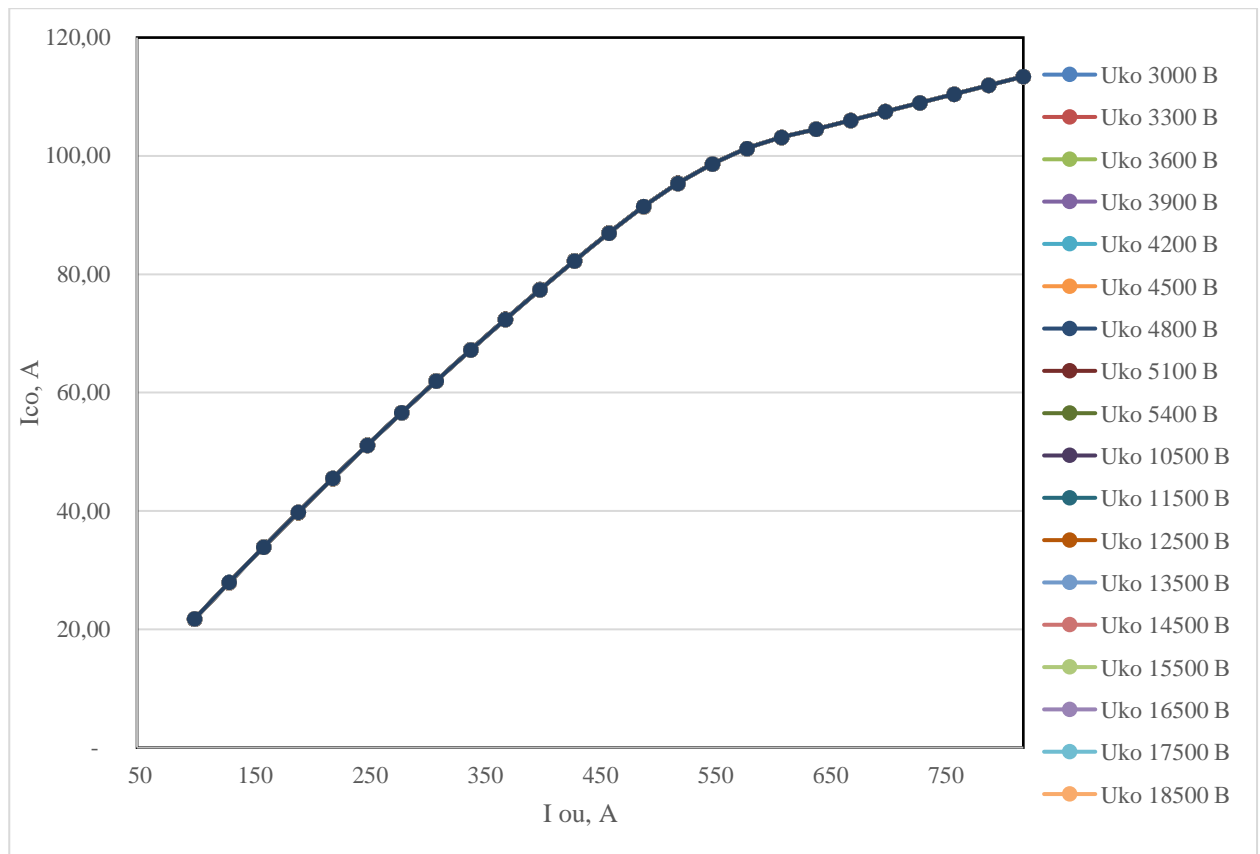


Рисунок Д.16 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,127079 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,24907 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

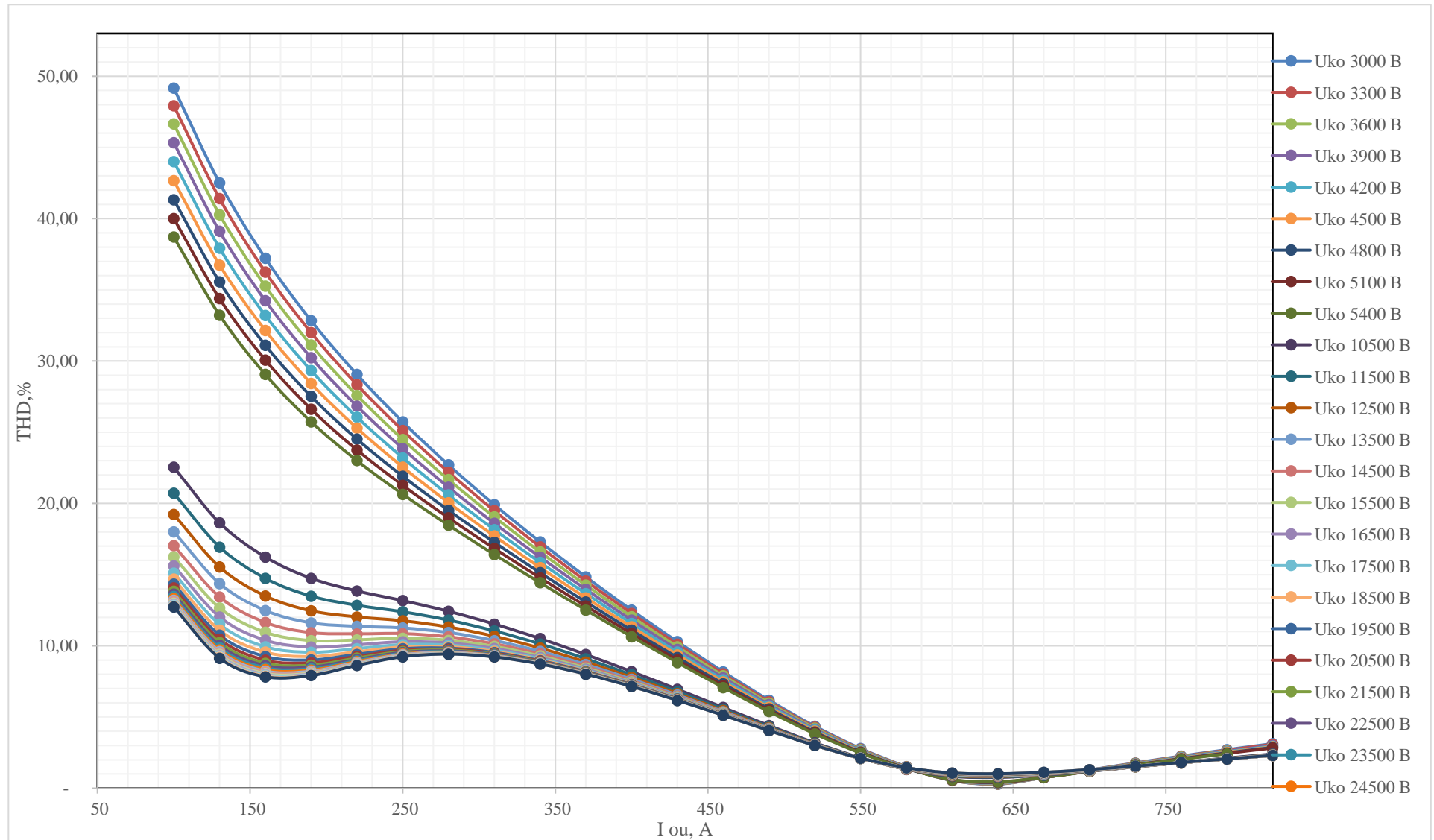


Рисунок Д.17 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26040 \text{ м}^2$

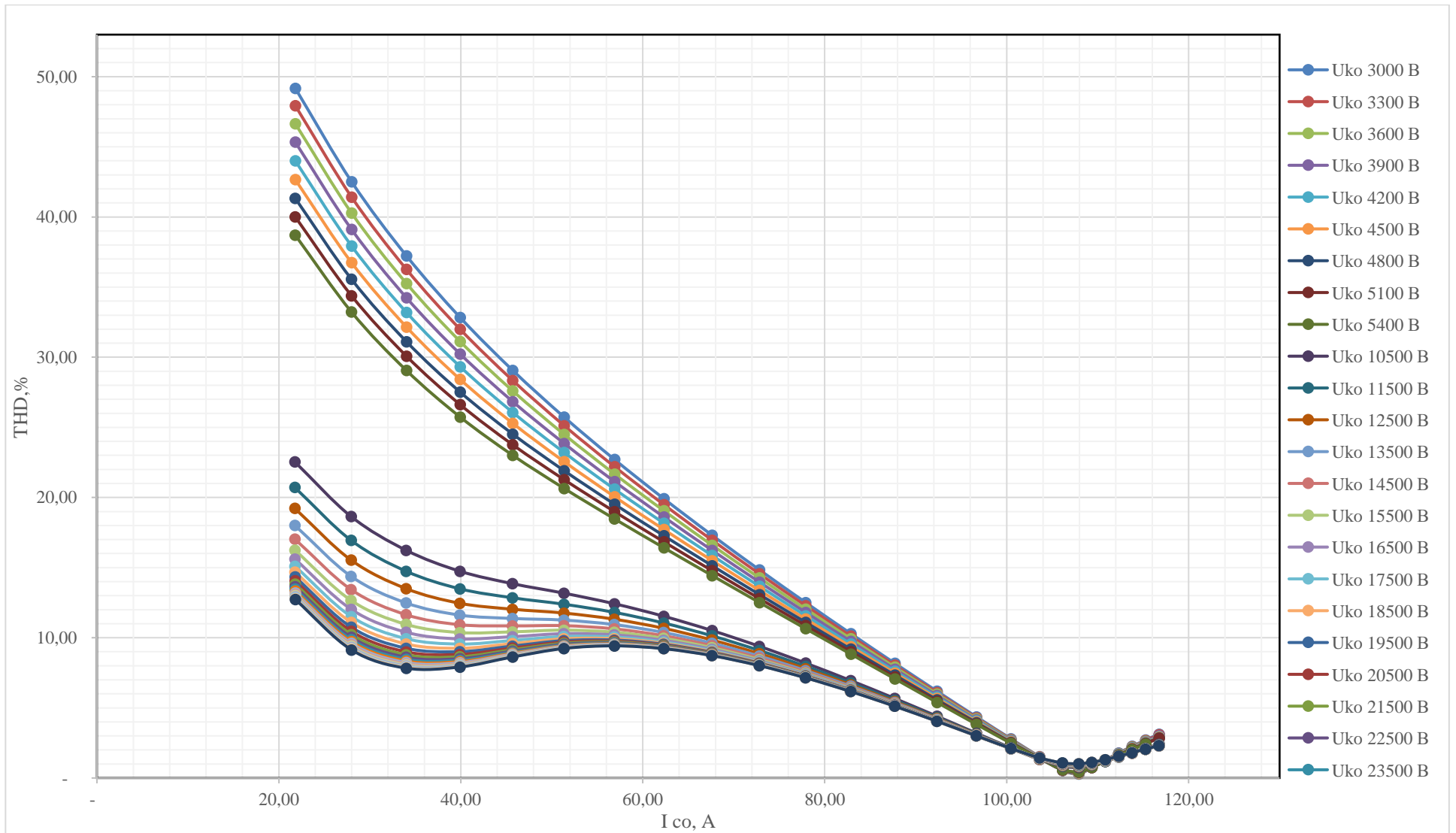


Рисунок Д.18 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

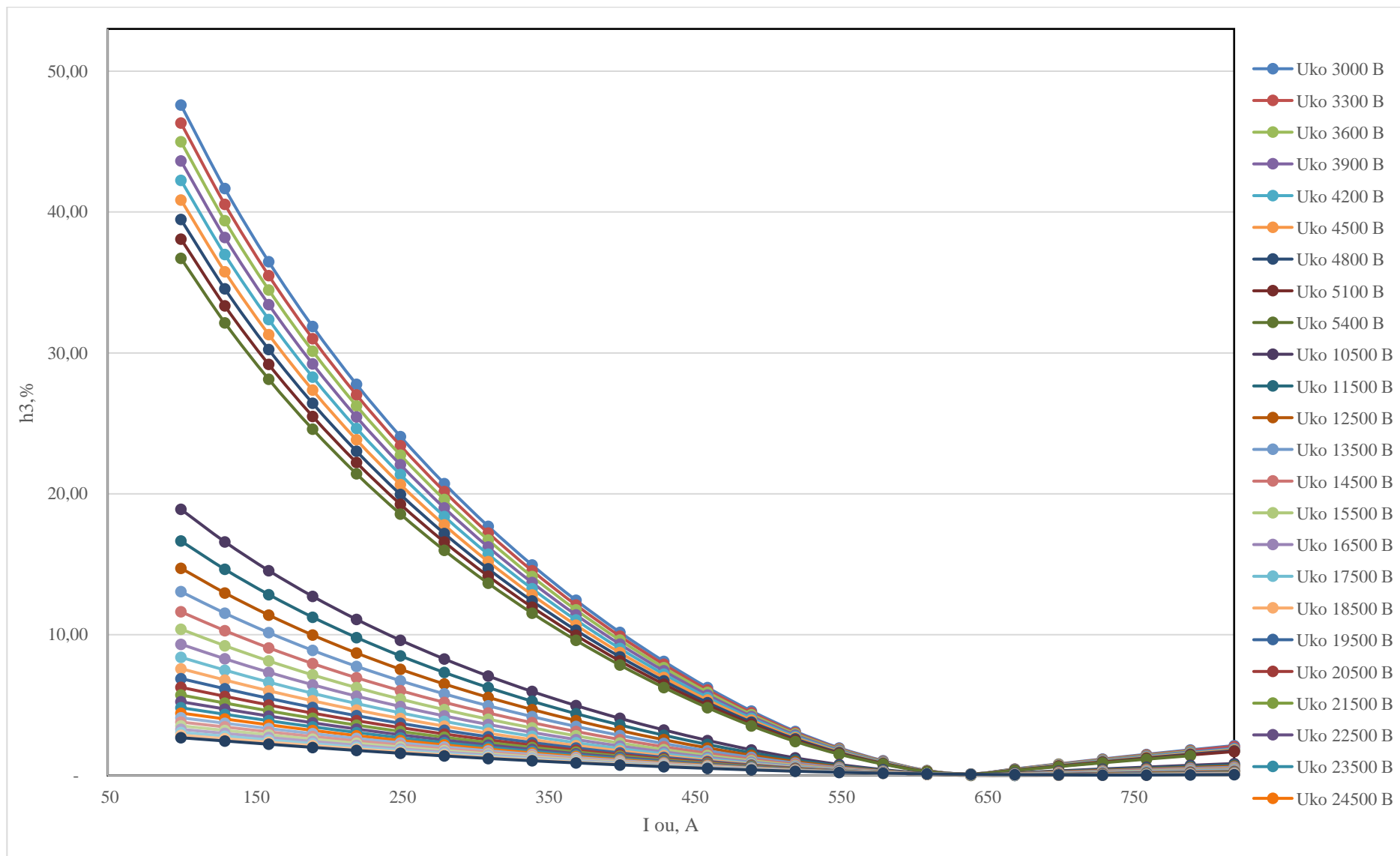


Рисунок Д.19 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,132855 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,26040 \text{ м}^2$

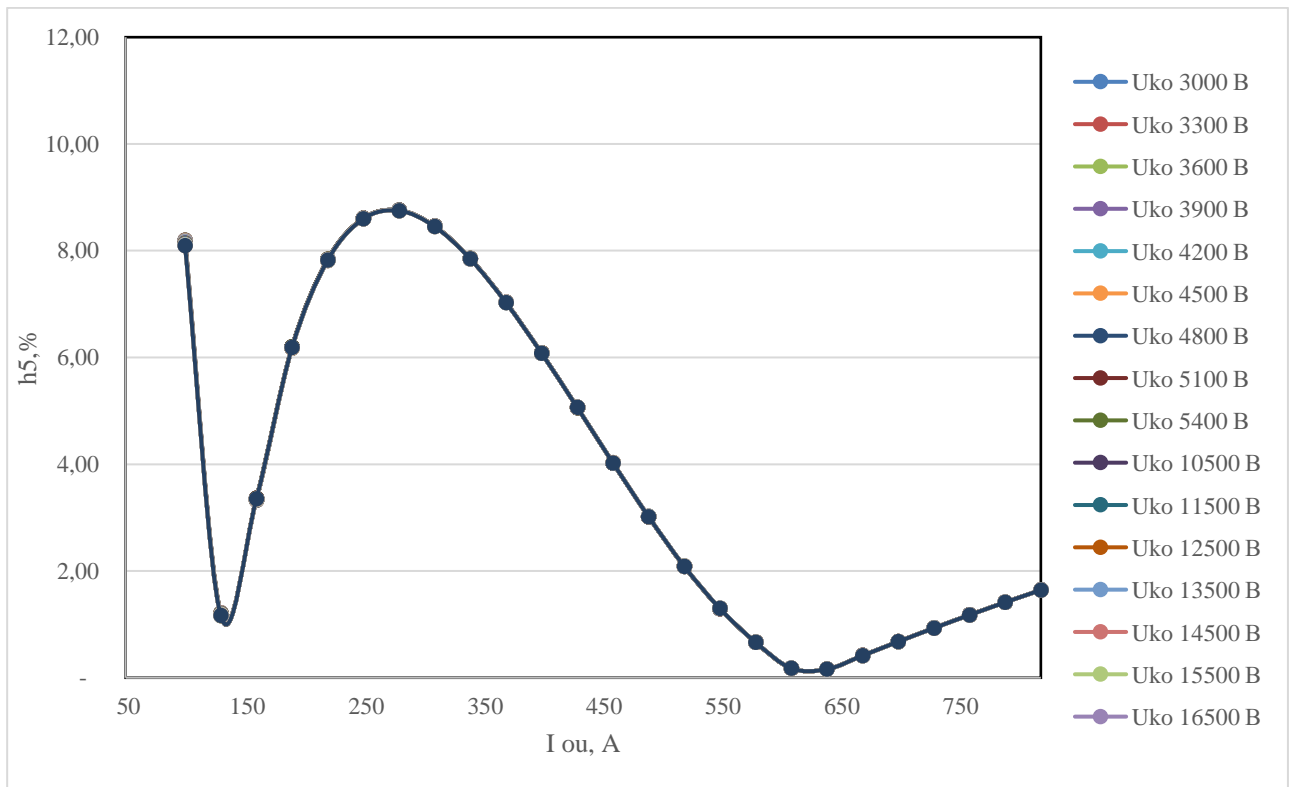


Рисунок Д.20 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

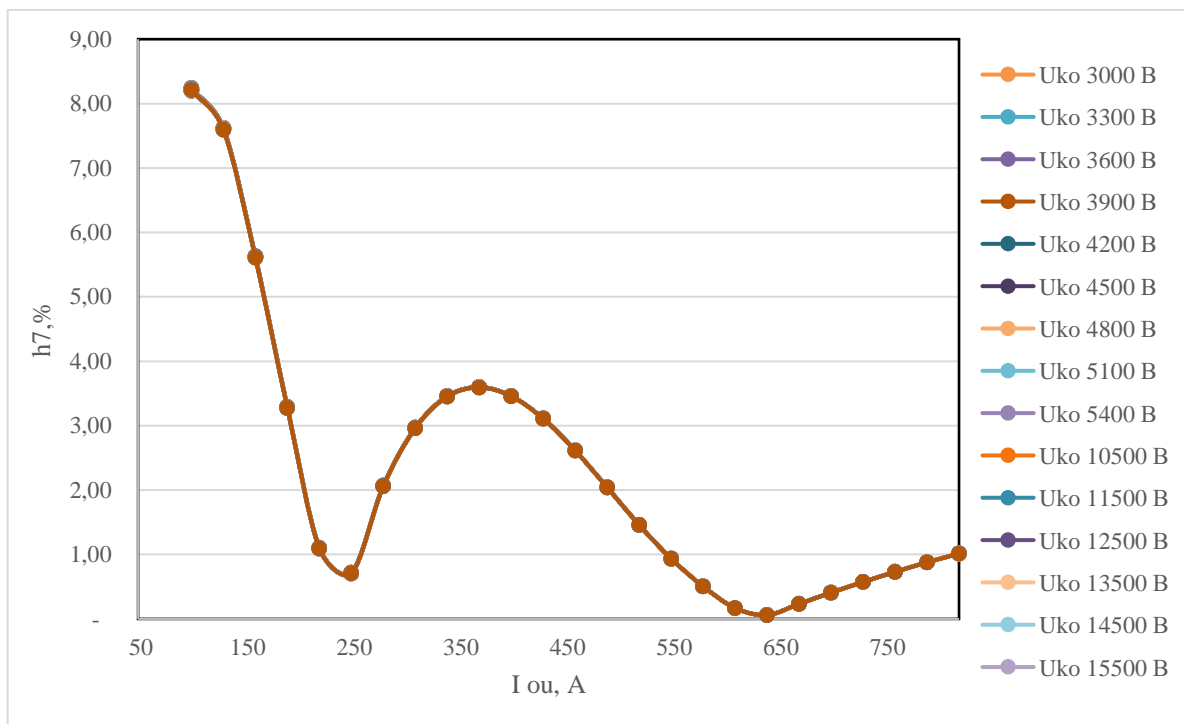


Рисунок Д.21 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

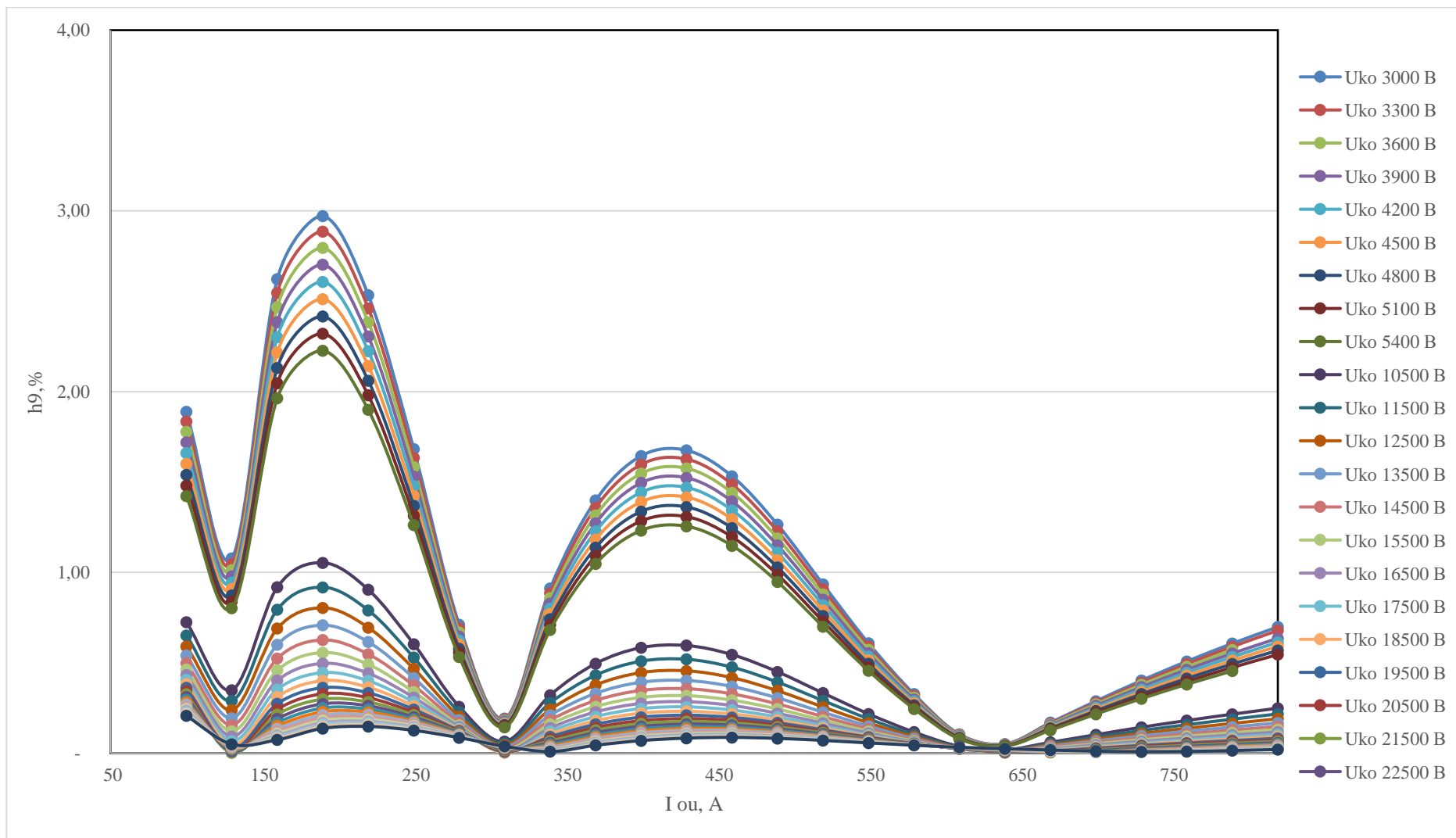


Рисунок Д.22 - График изменения 9-ой гармоника тока сетевой обмотки $I_{co} S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2 S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

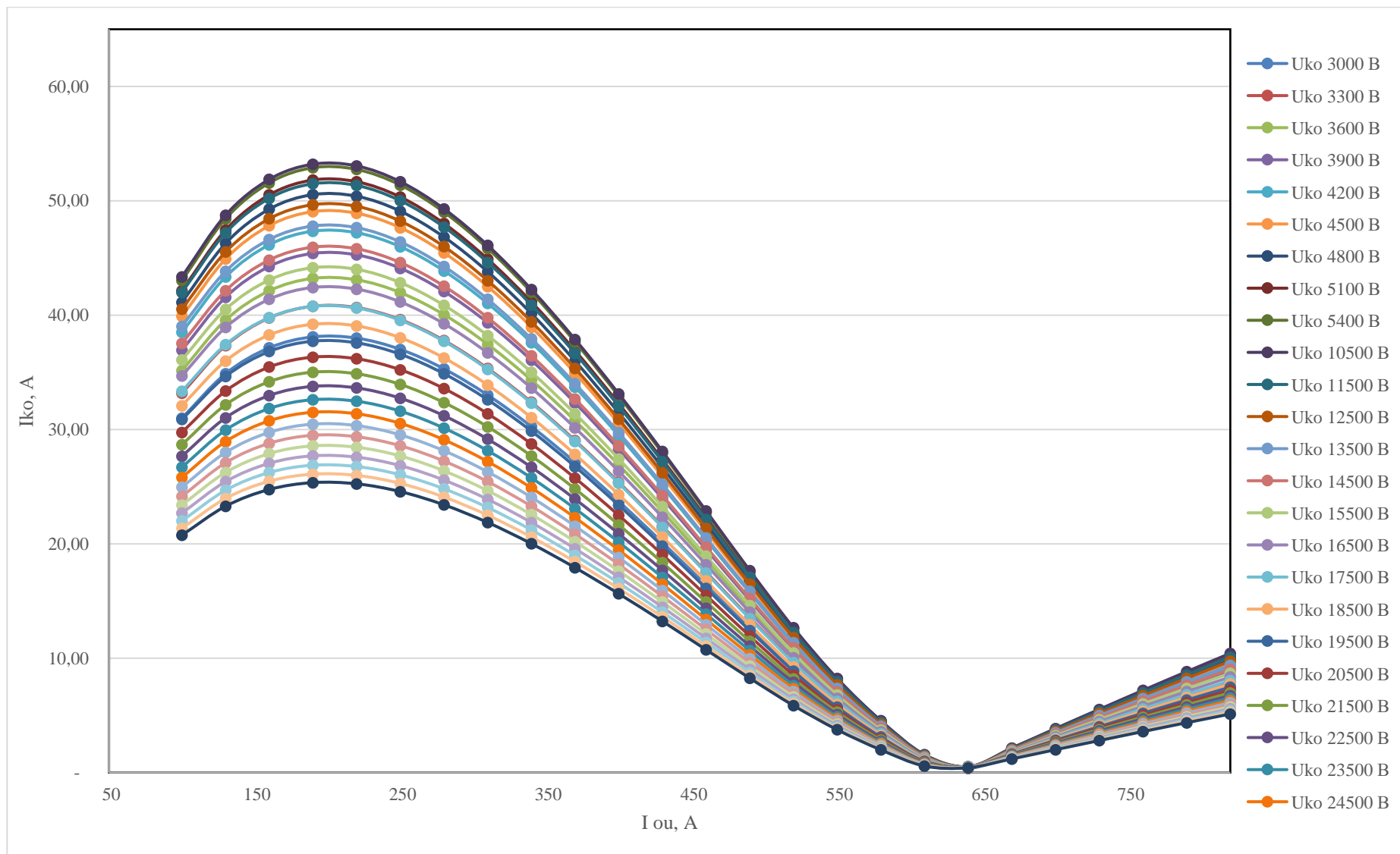


Рисунок Д.23 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,132855 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26040 \text{ м}^2$

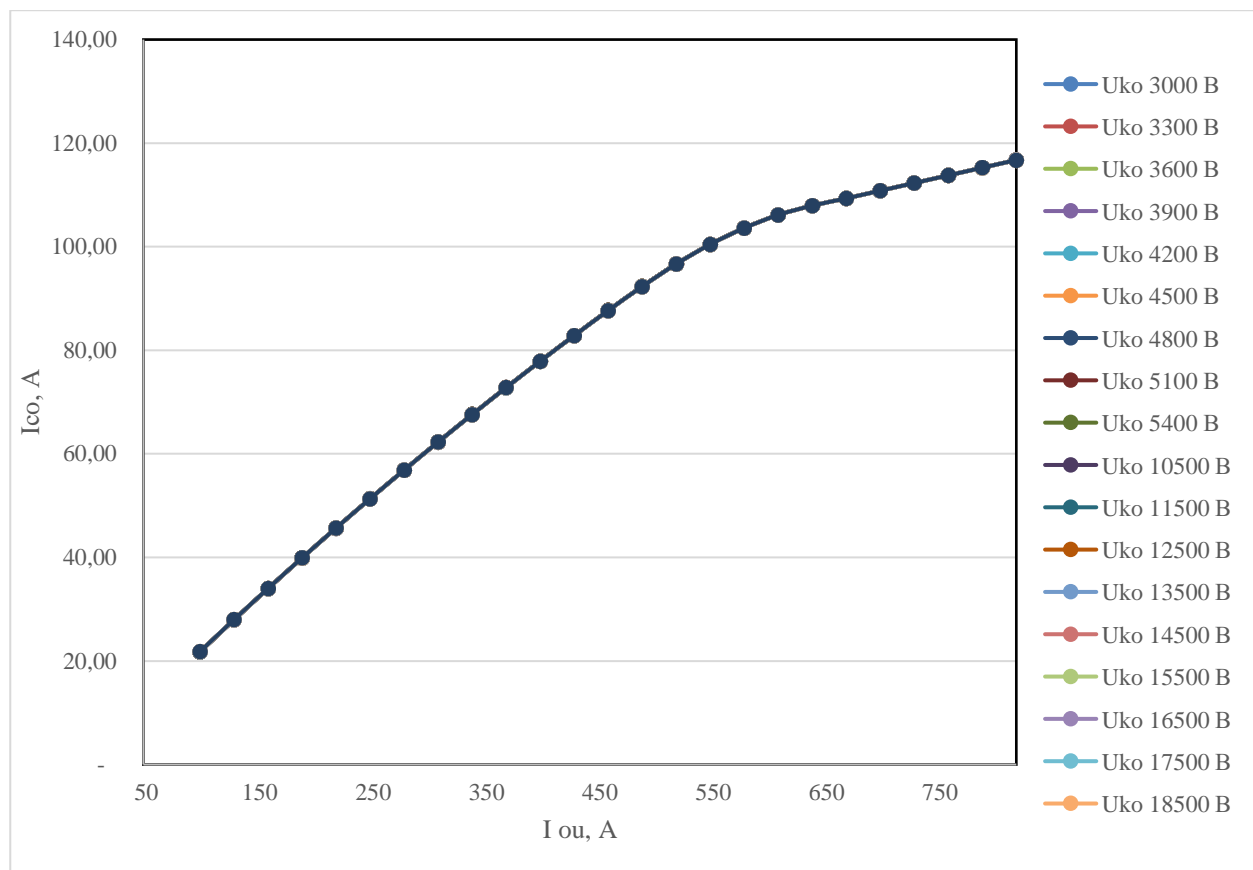


Рисунок Д.24 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,132855 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,26040 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27172 \text{ м}^2$. Напряжение компенсационной обмотки 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

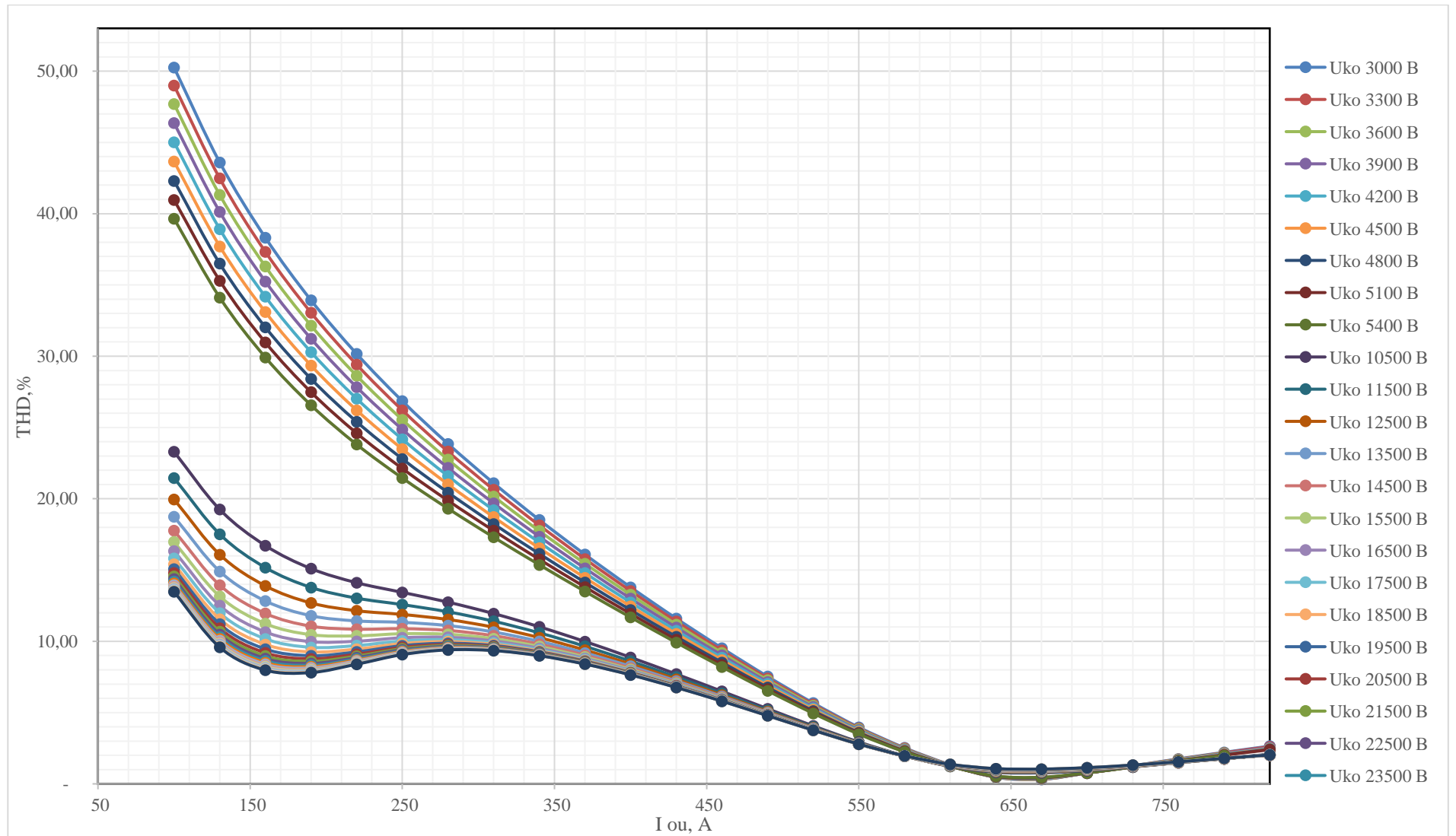


Рисунок Д.25 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

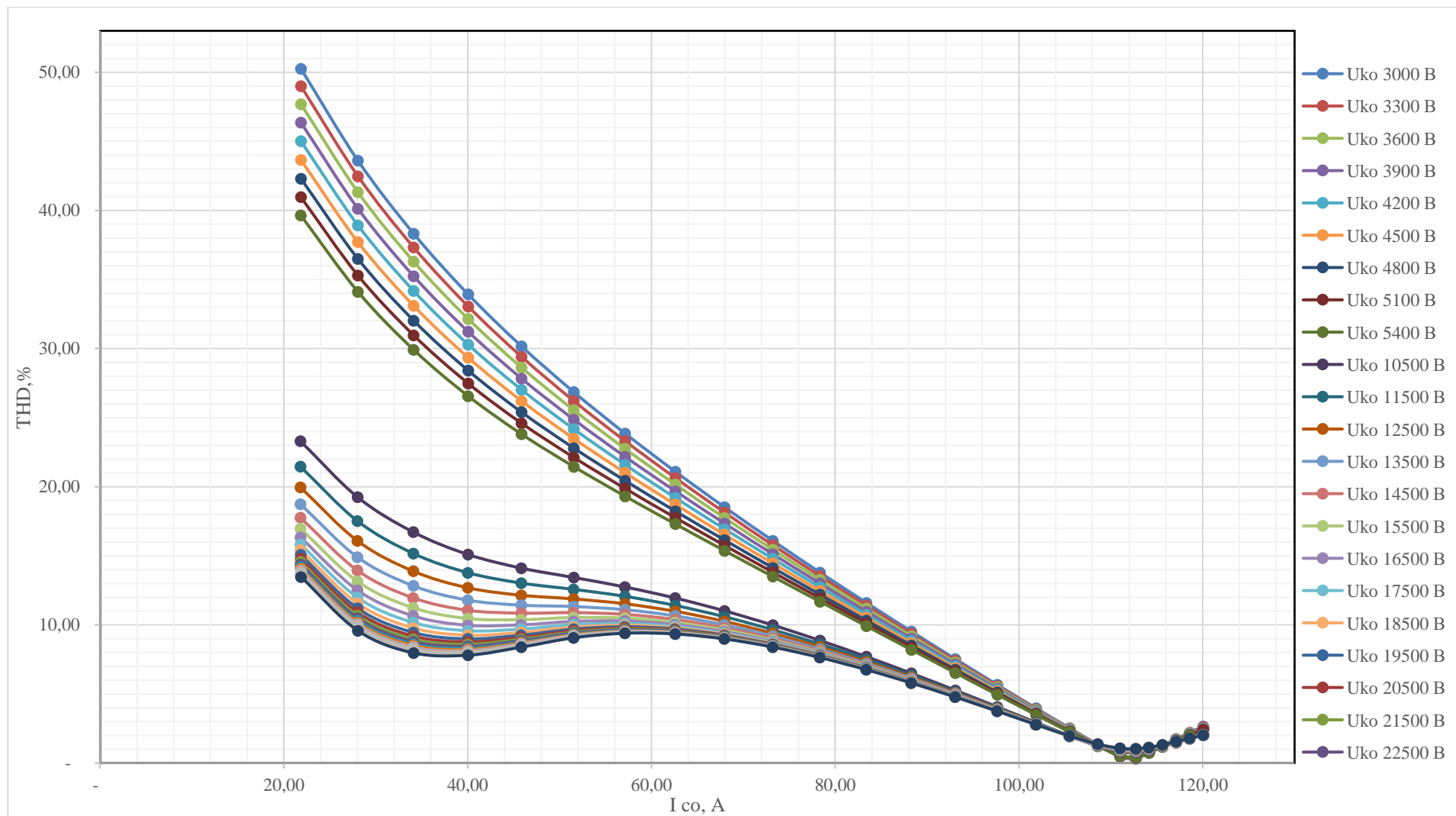


Рисунок Д.26 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27172 \text{ м}^2$

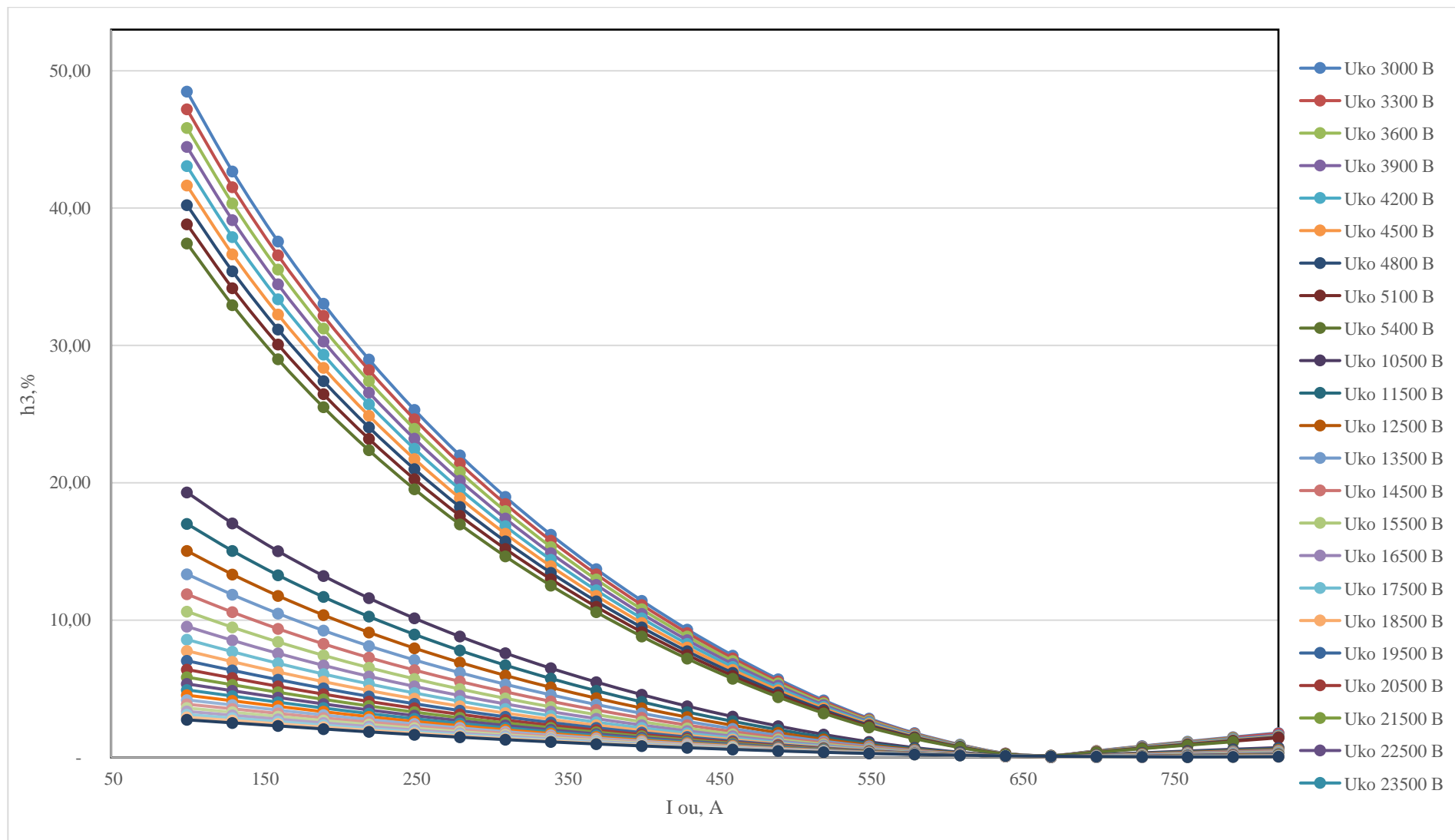


Рисунок Д.27 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

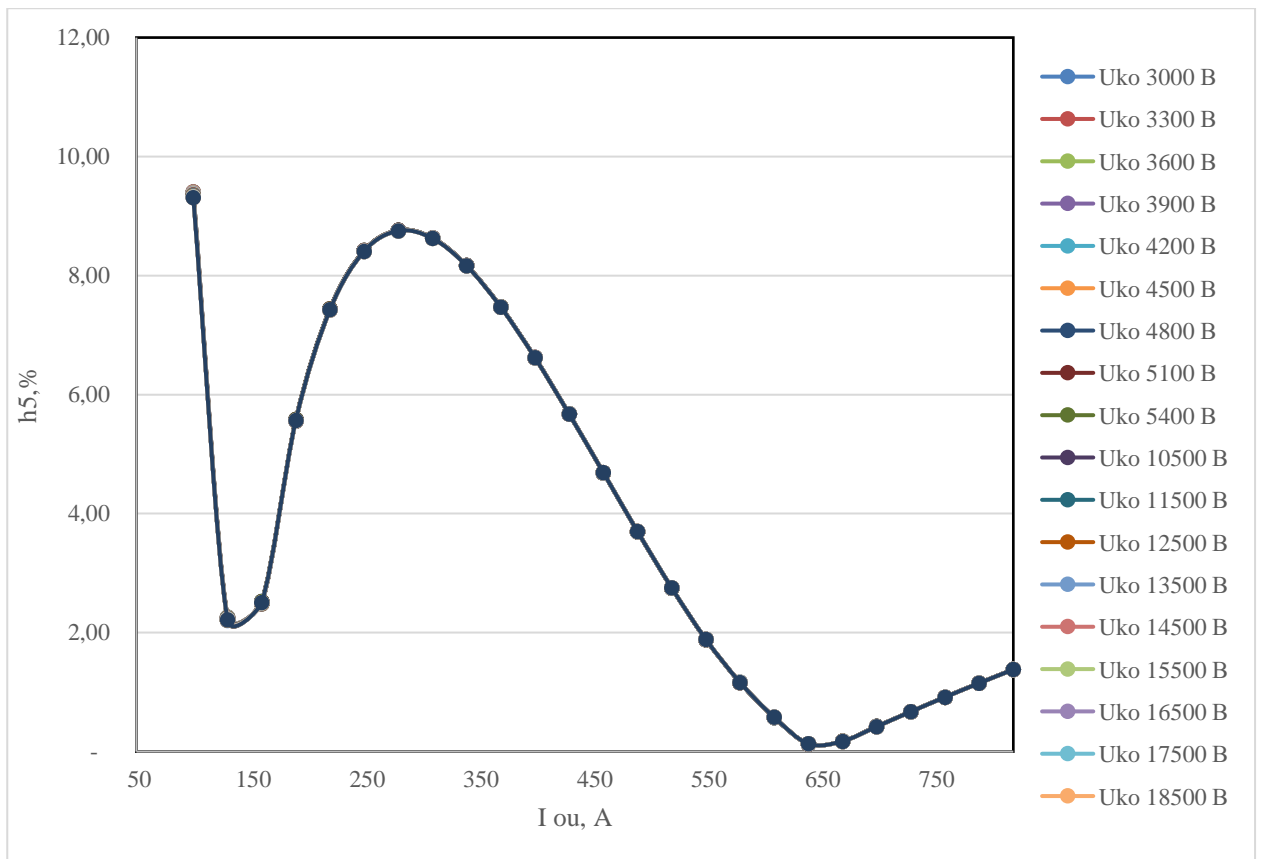


Рисунок Д.28 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

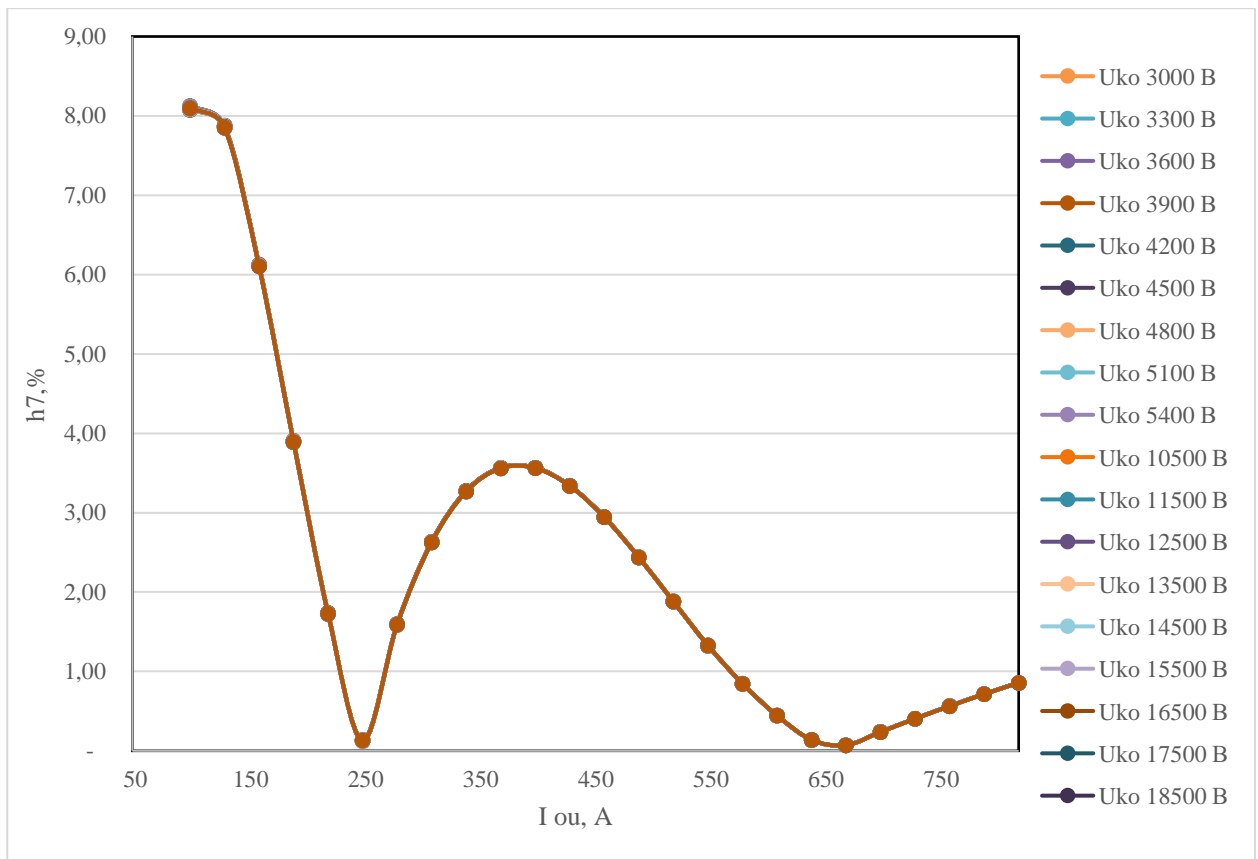


Рисунок Д.29 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

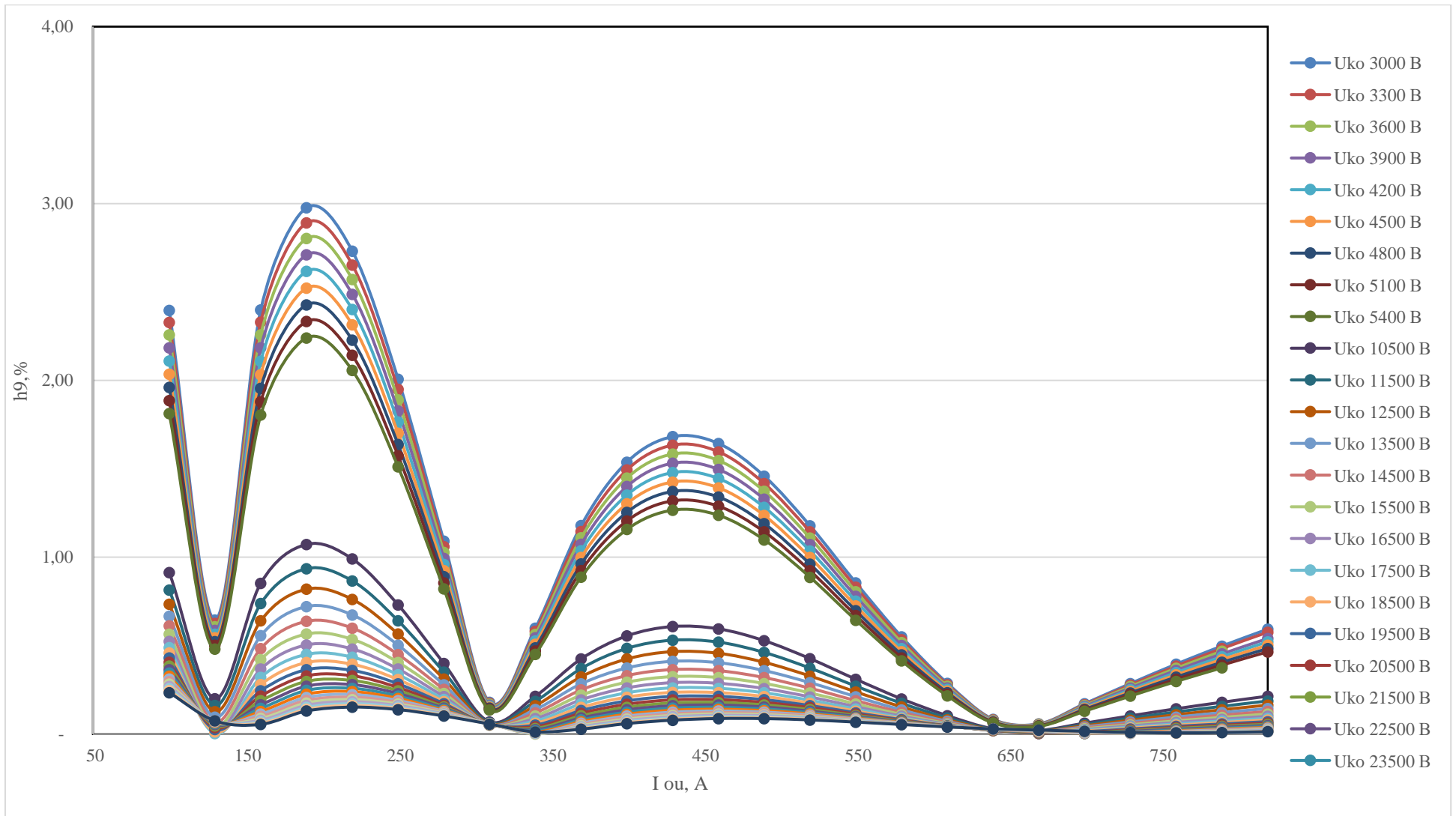


Рисунок Д.30 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

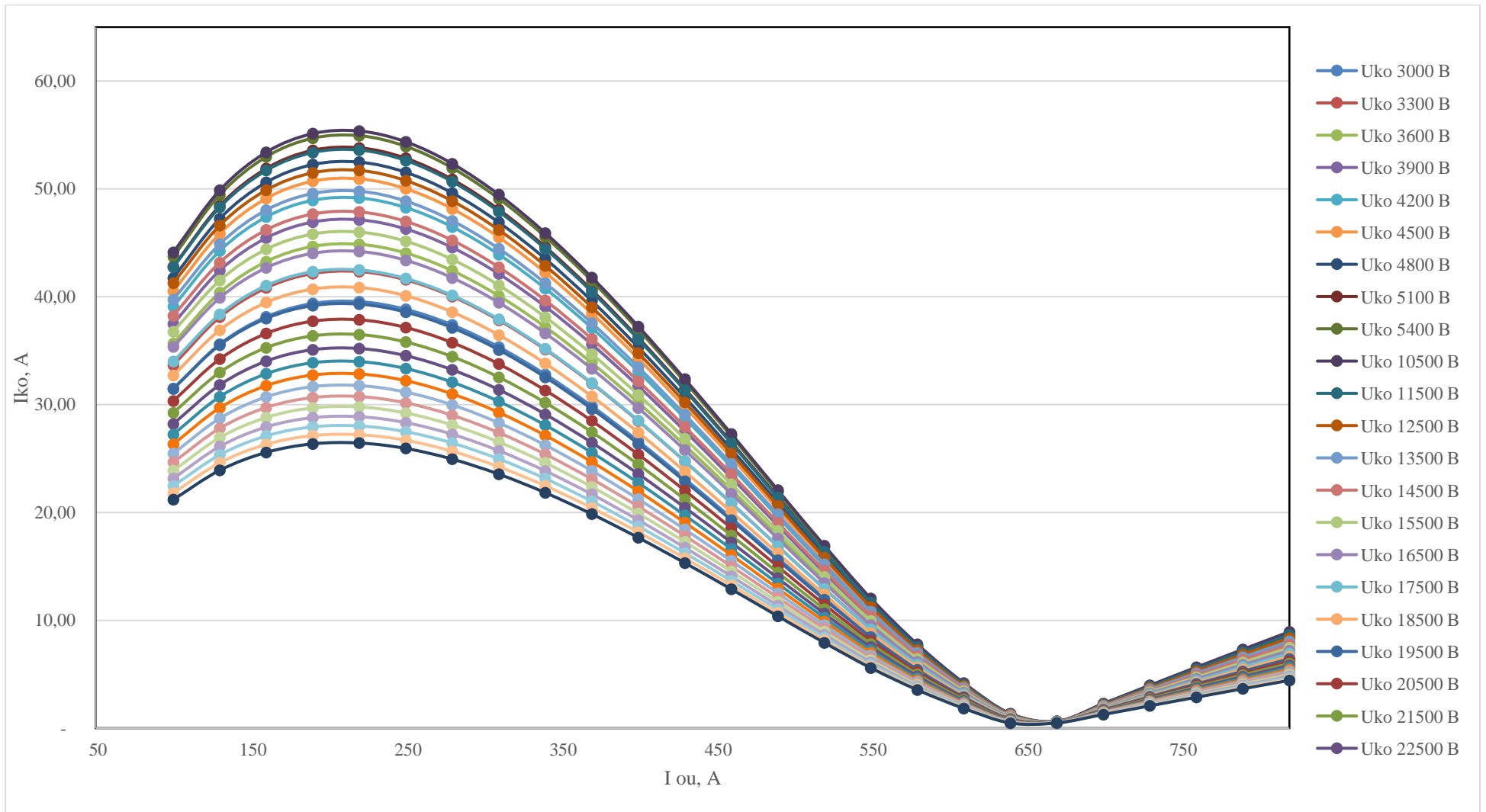


Рисунок Д.31 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} $S_{стержня} - 0,138631 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27172 \text{ м}^2$

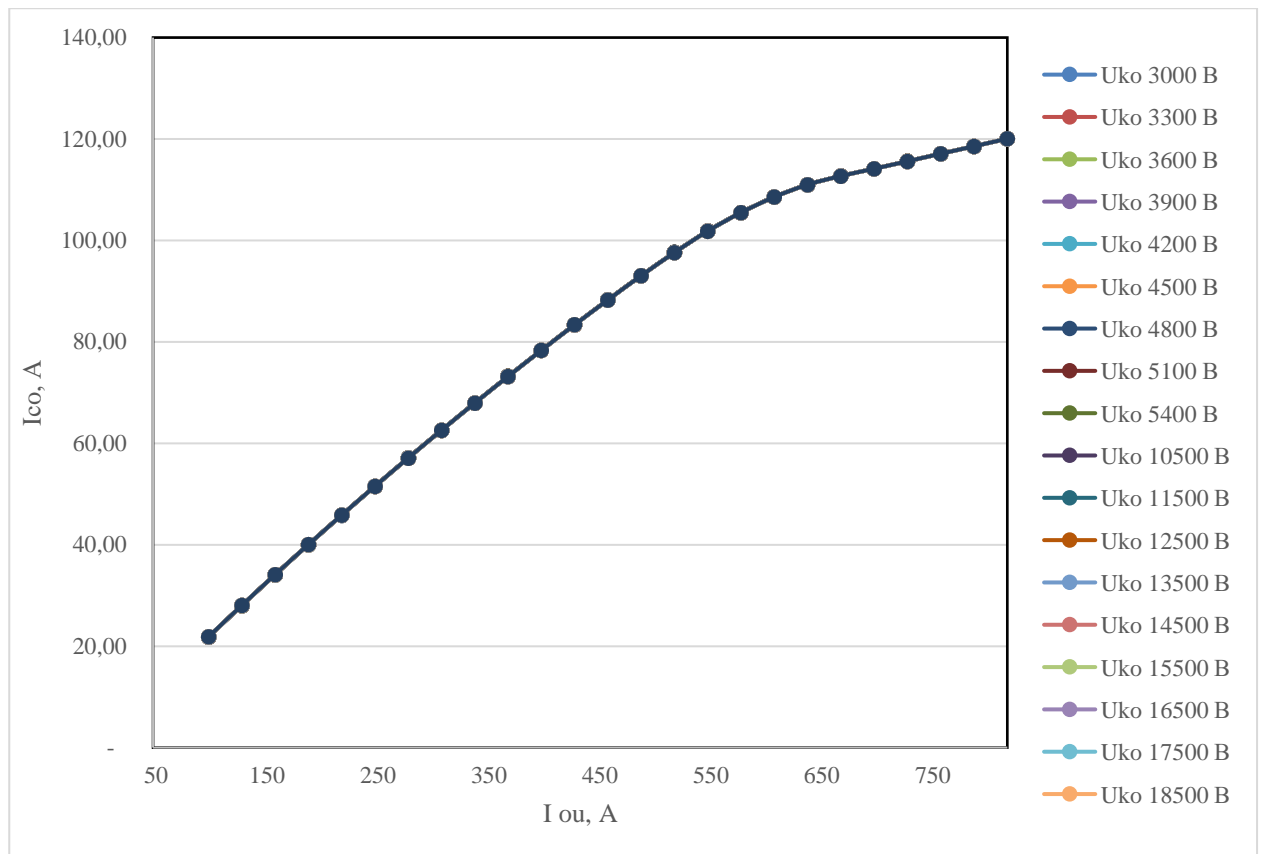


Рисунок Д.32 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,138631 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,27172 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,28304 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

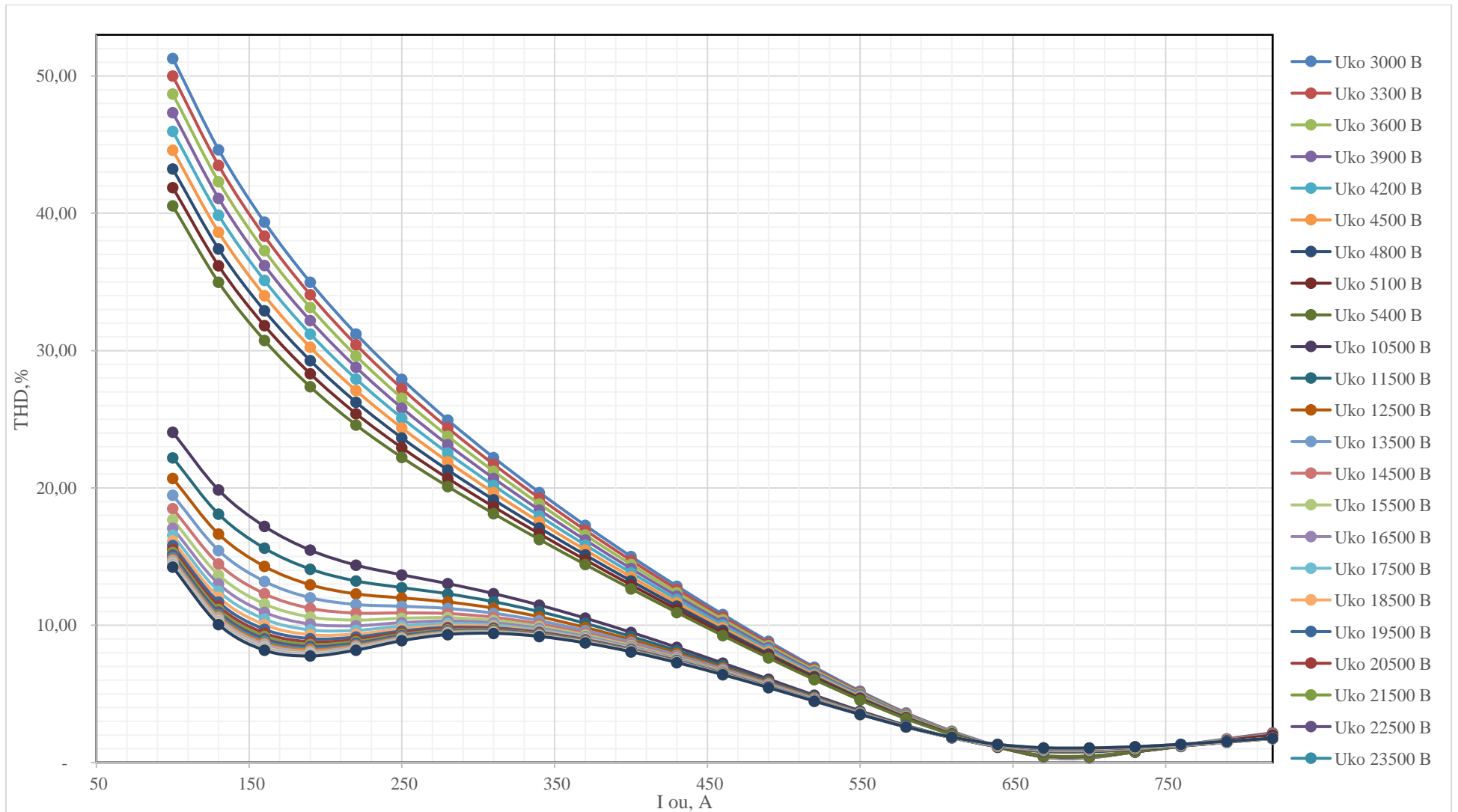


Рисунок Д.33 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

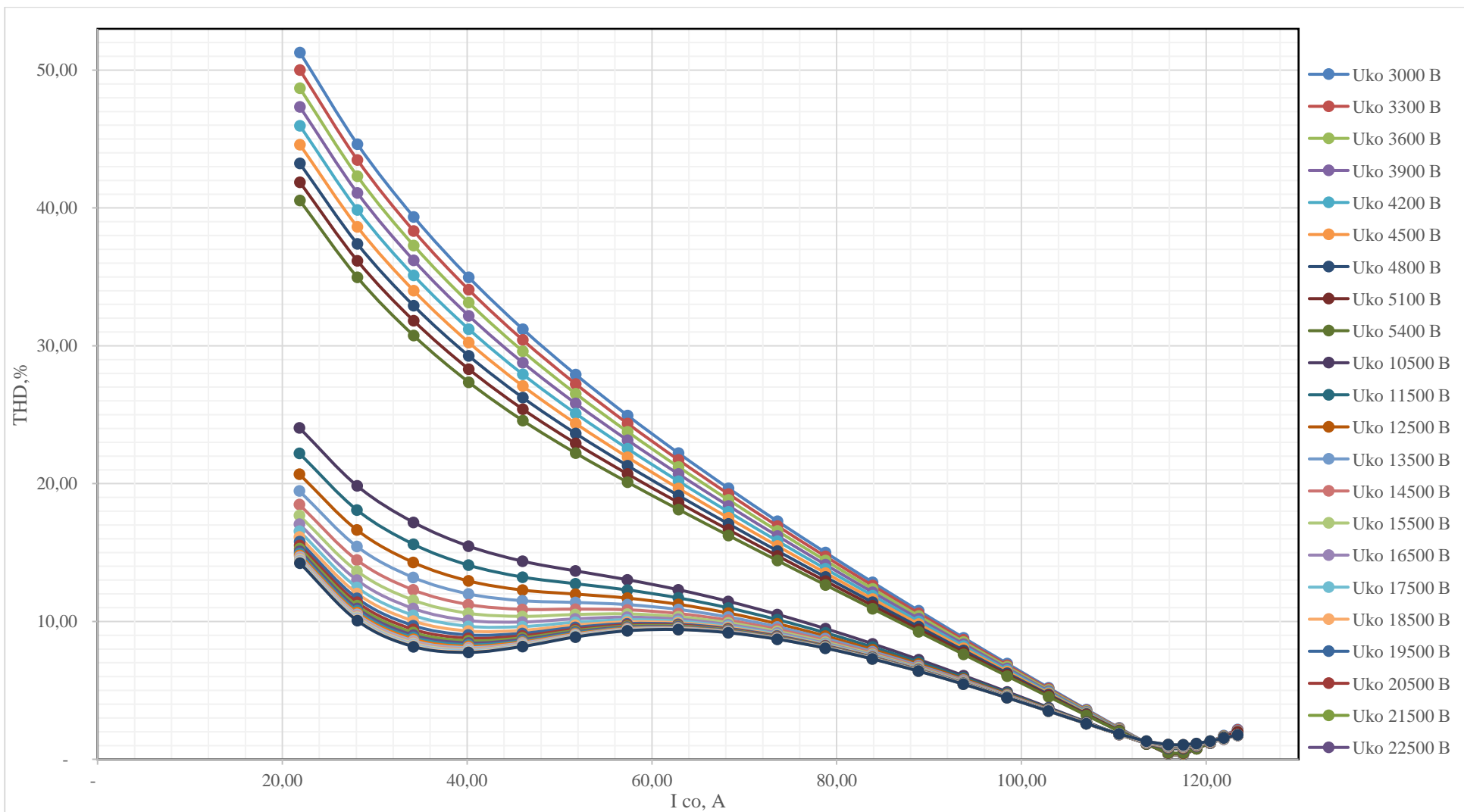


Рисунок Д.34 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

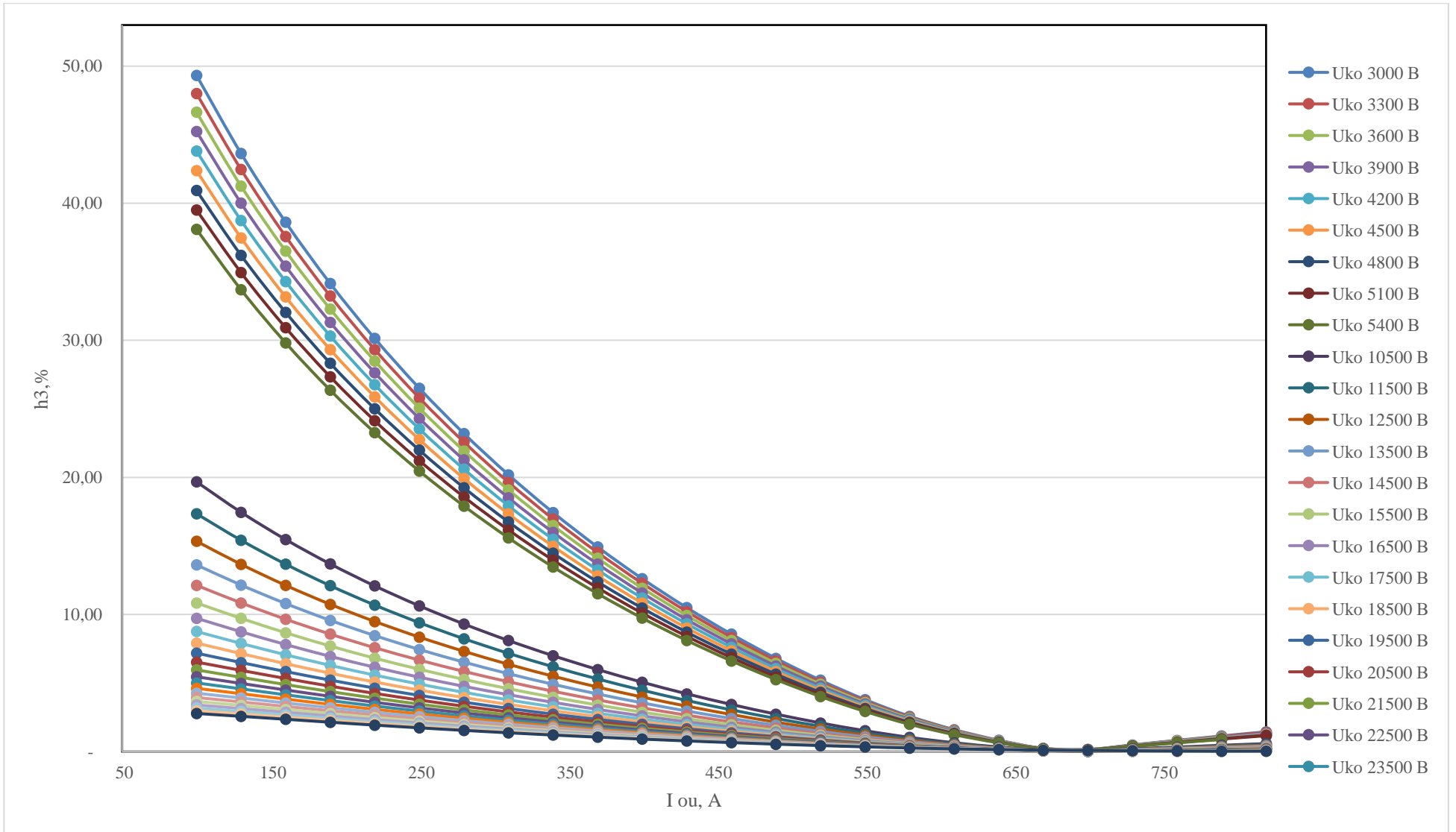


Рисунок Д.35 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

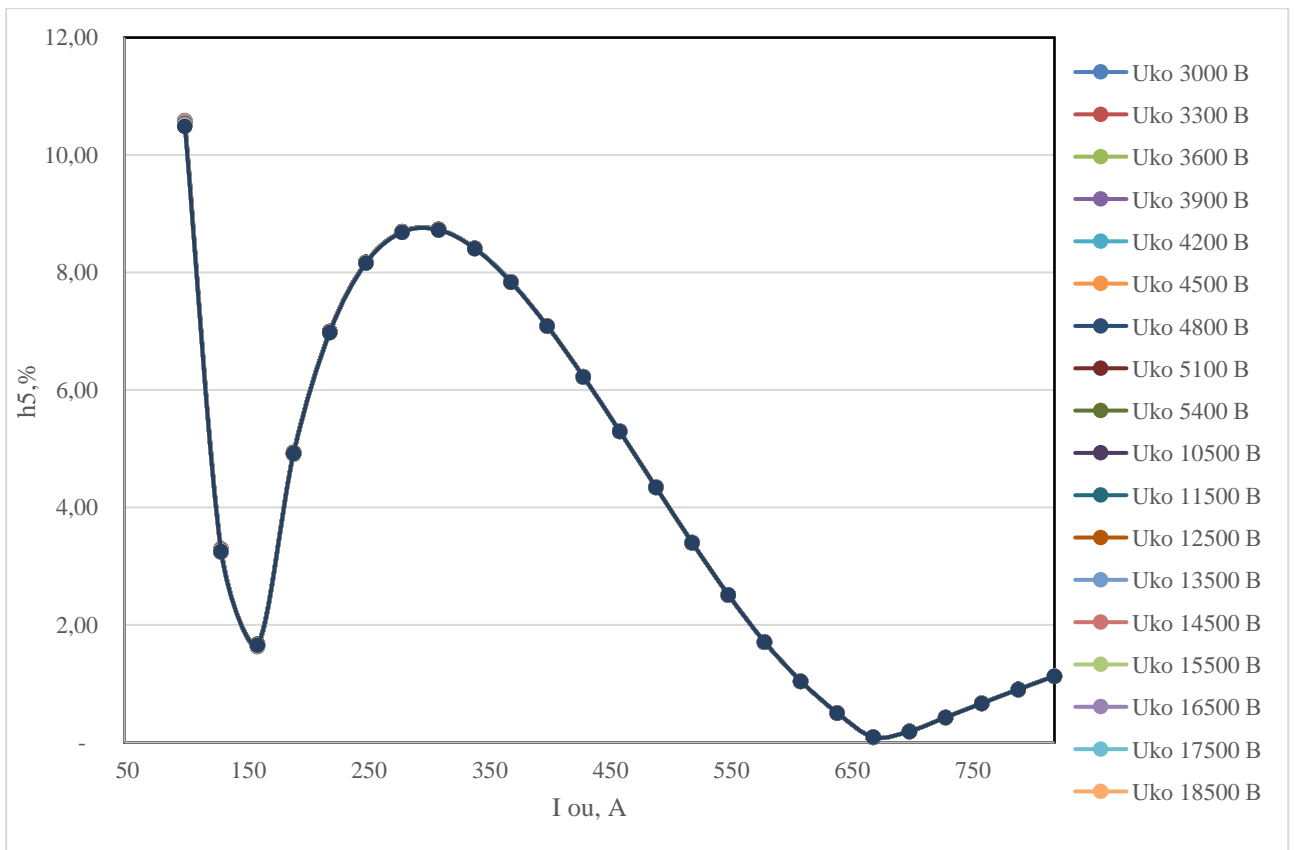


Рисунок Д.36 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{\text{со}}$
 $S_{\text{стержня}} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,28304 \text{ м}^2$

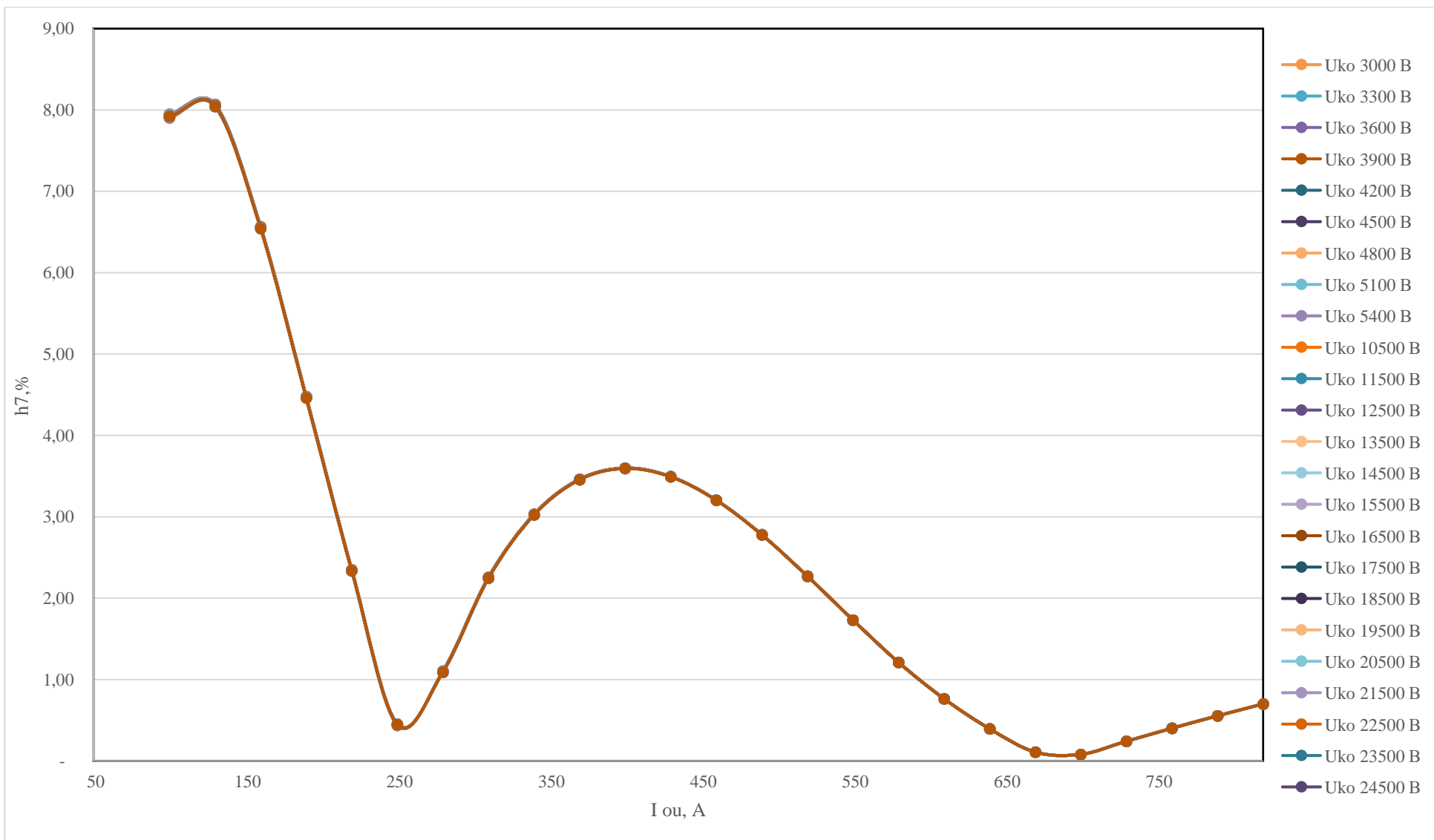


Рисунок Д.37 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

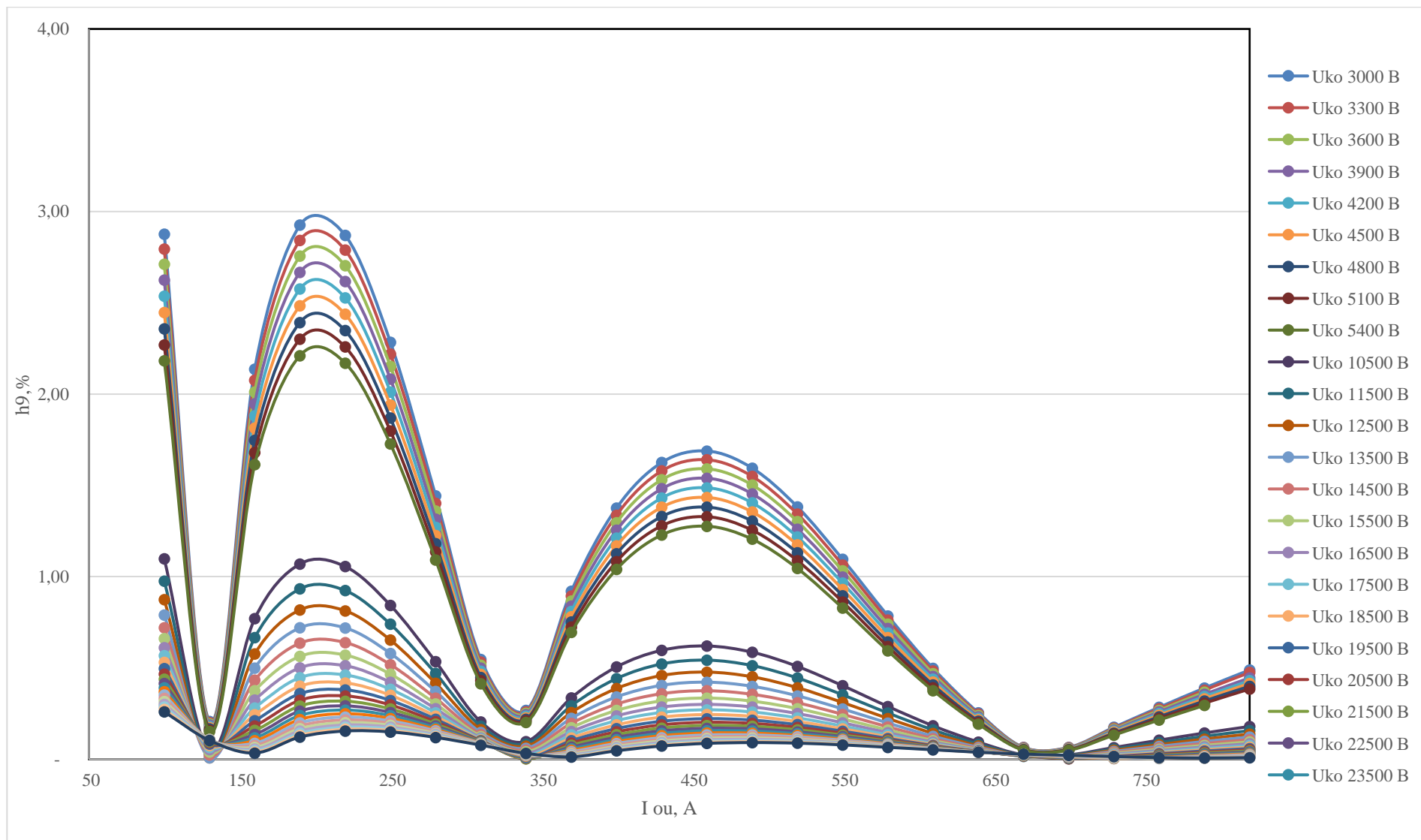


Рисунок Д.38 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{co} S_{\text{стержня}} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,28304 \text{ м}^2$

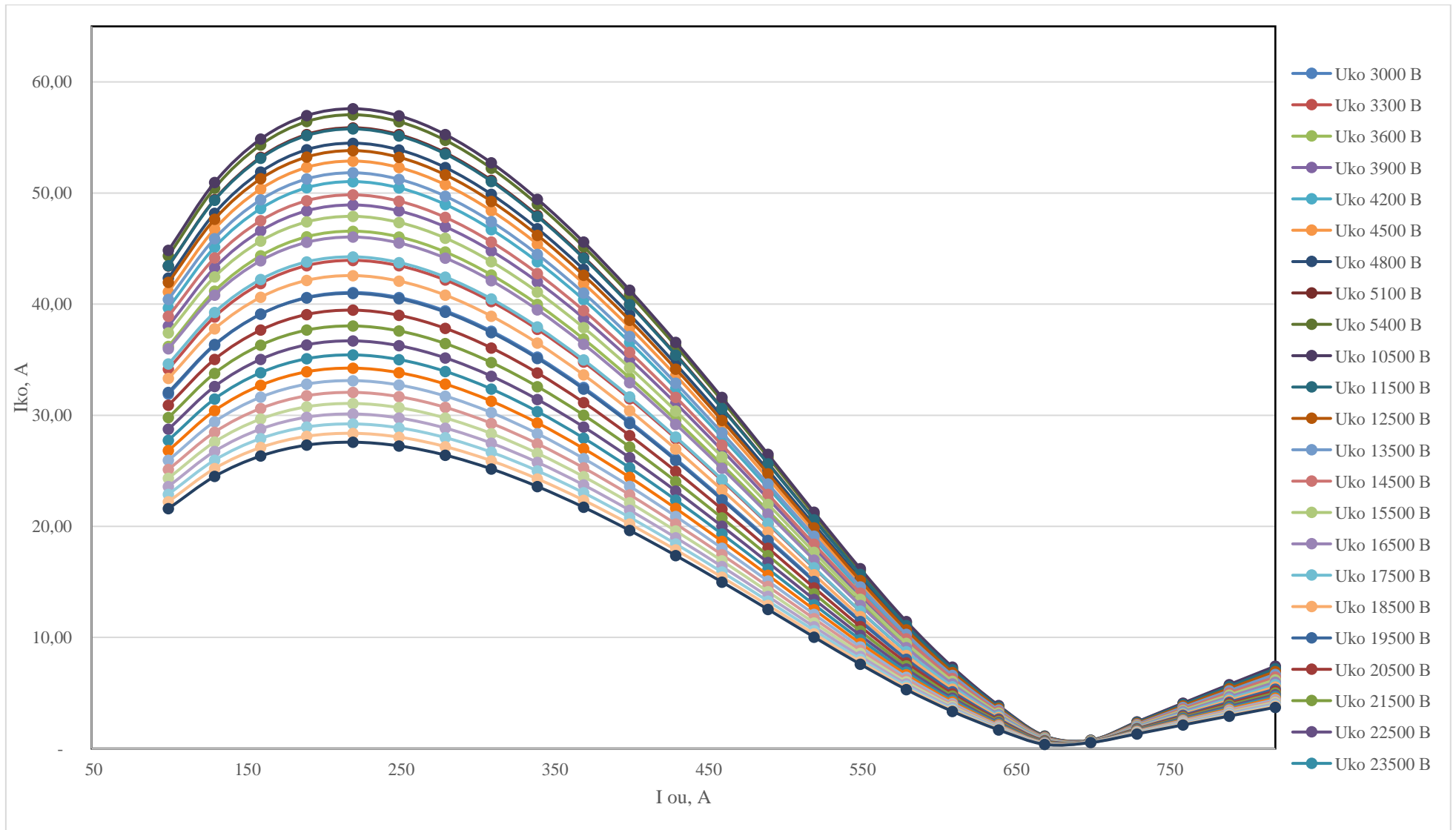


Рисунок Д.39 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

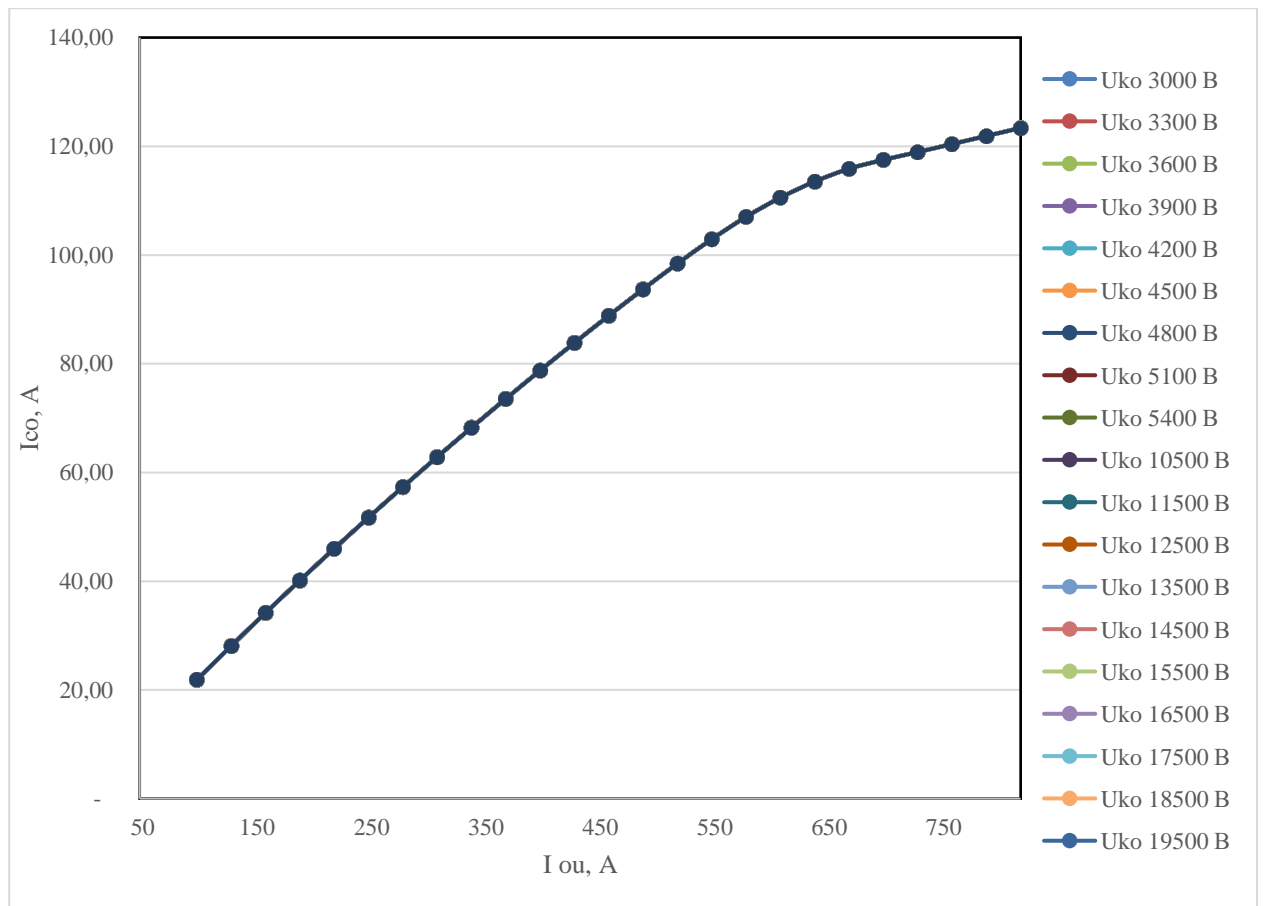


Рисунок Д.40 - График изменения тока сетевой обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,144408 \text{ м}^2$
 $S_{ярем} - 0,28304 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 3000 В – 5400 В, 10500 В – 31500 В.

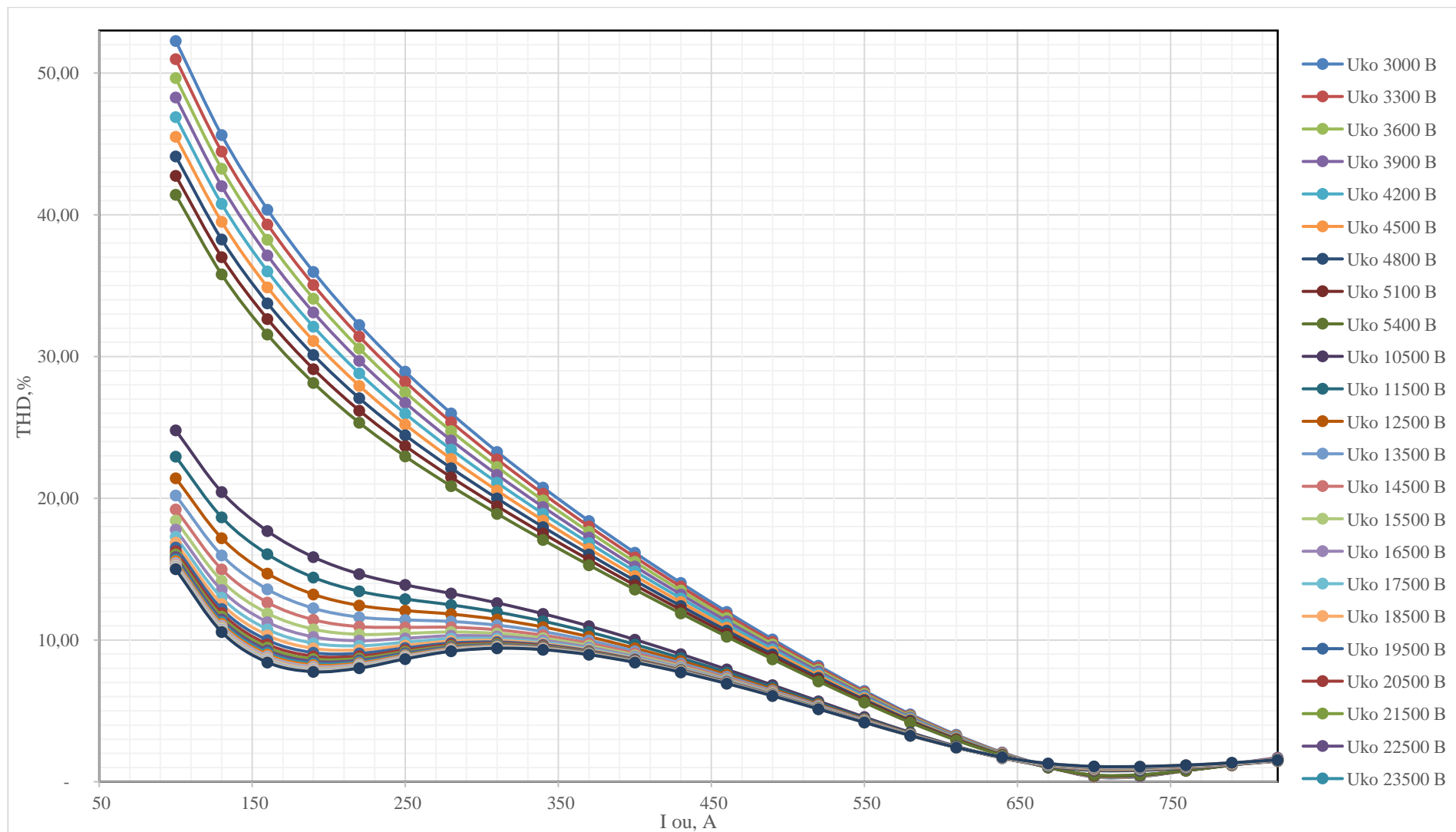


Рисунок Д.41 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2 S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$

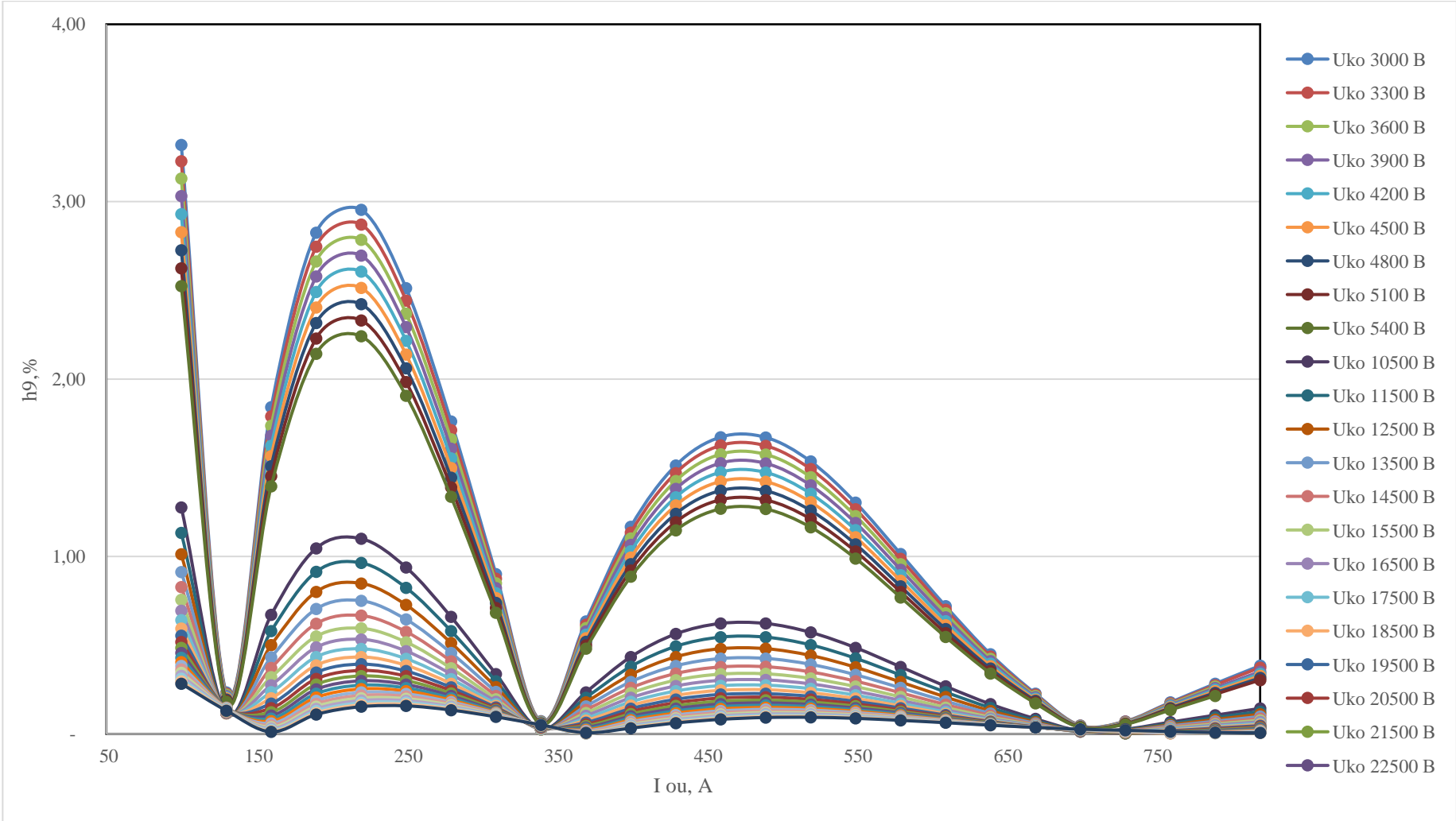


Рисунок Д.42 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки $I_{со}$ $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,29436 \text{ м}^2$

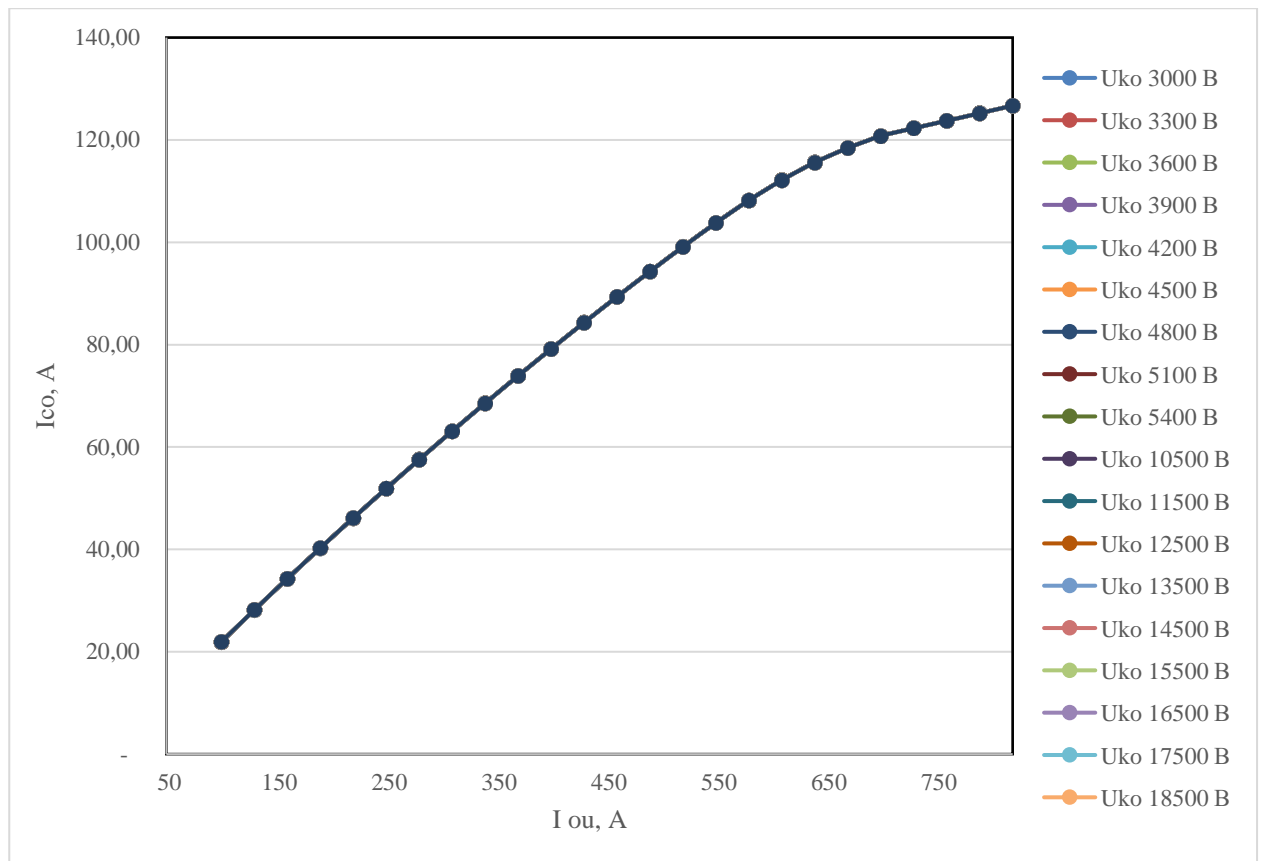


Рисунок Д.43 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,29436 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26432 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 10500 В – 31500 В.

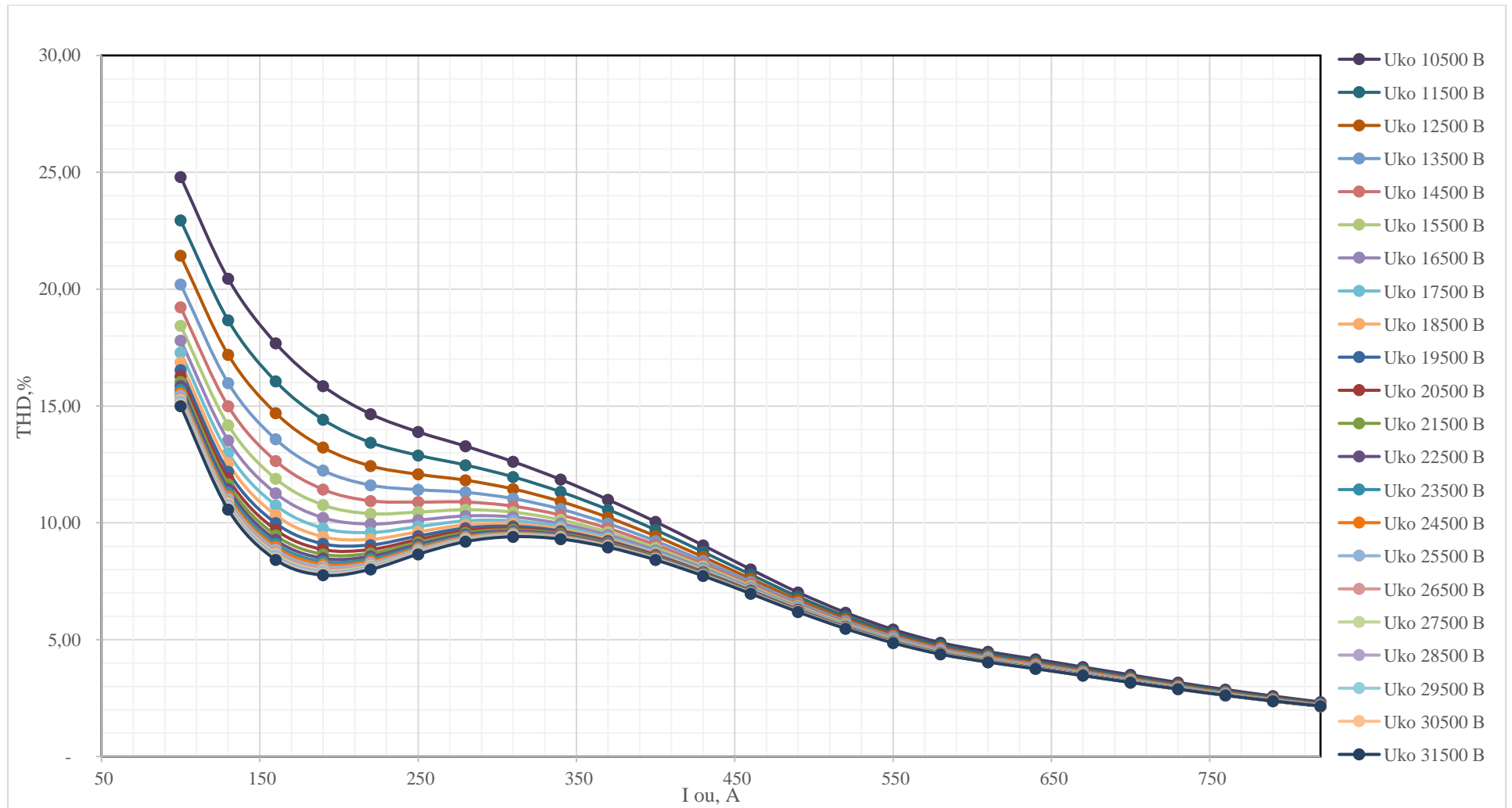


Рисунок Д.44 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

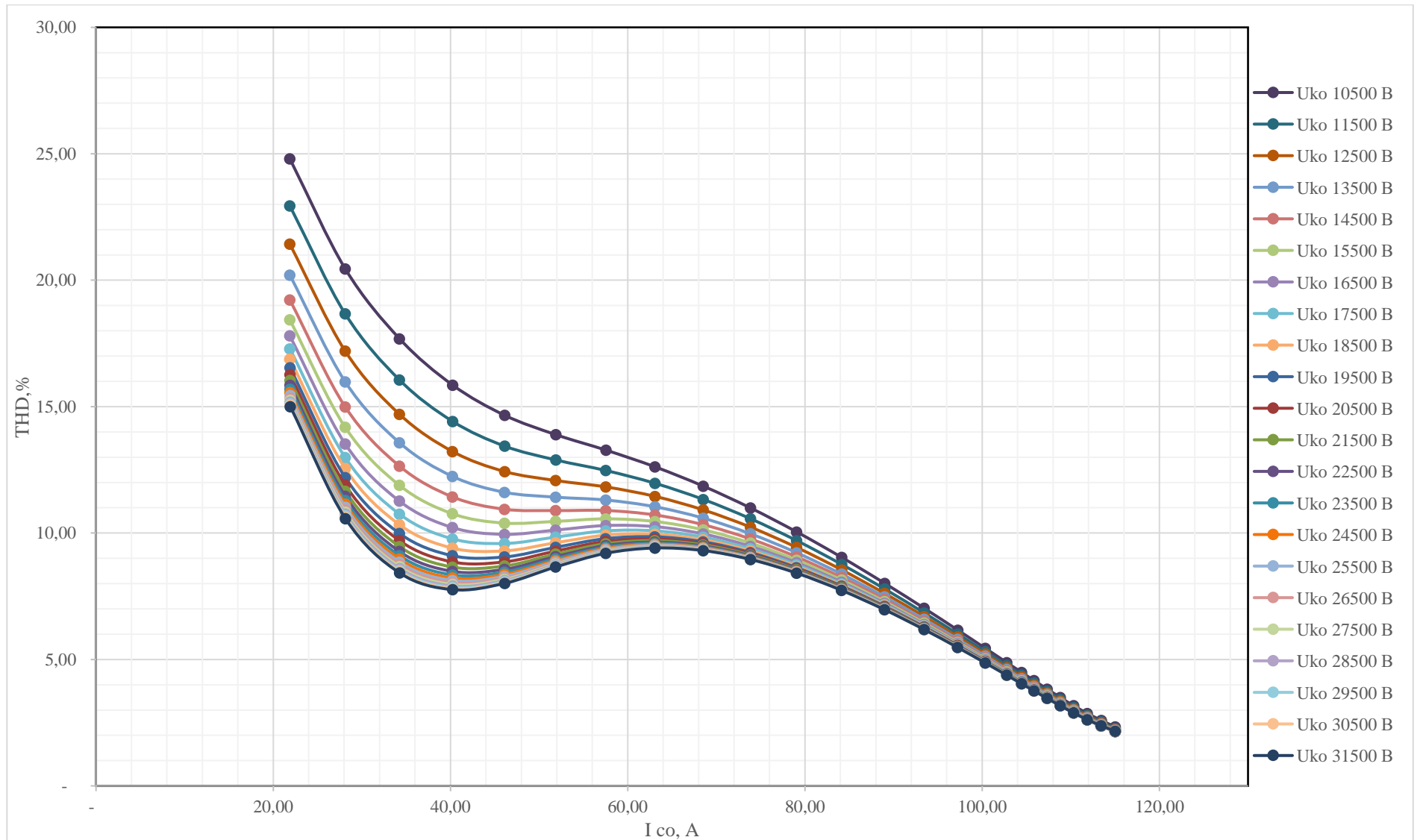


Рисунок Д.45 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

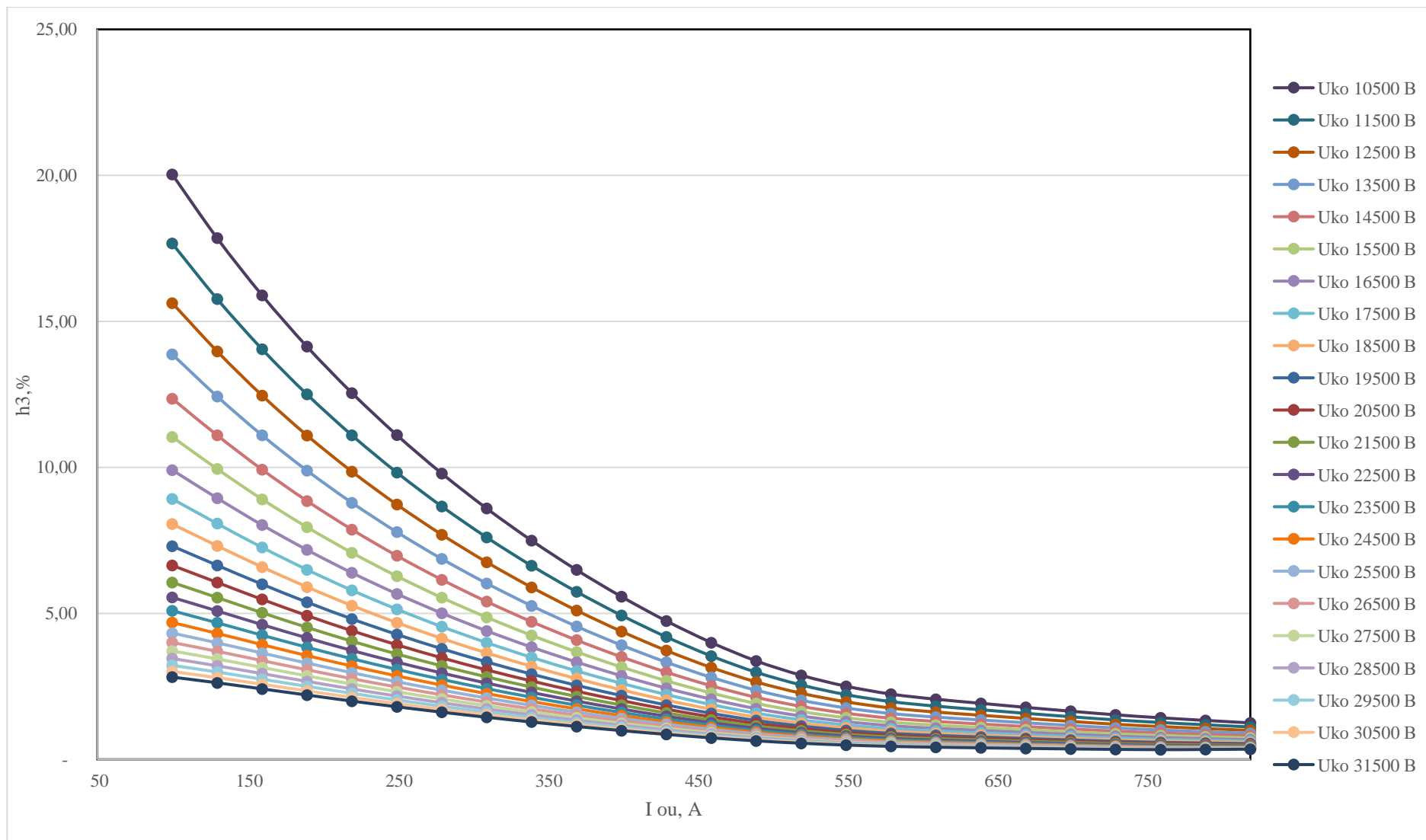


Рисунок Д.46 - График изменения 3-ей гармоника тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

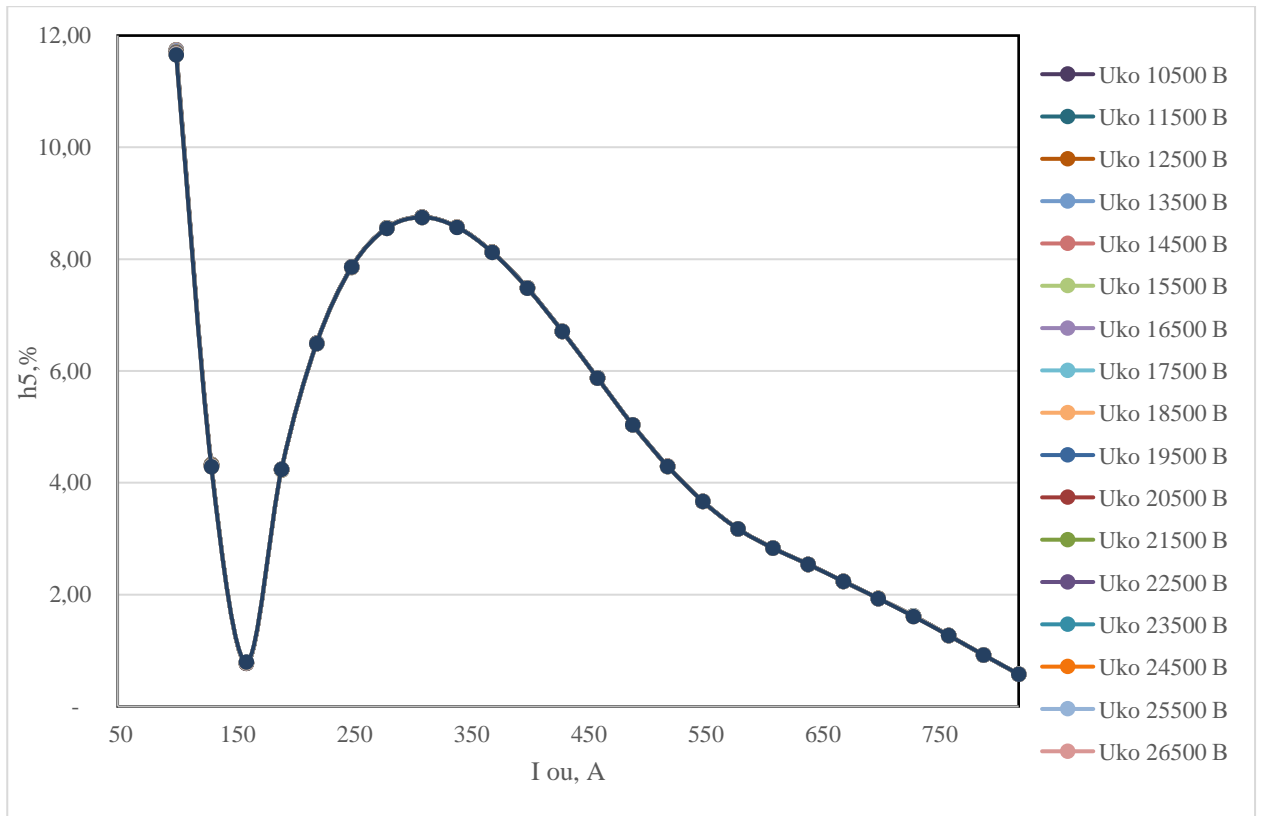


Рисунок Д.47 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

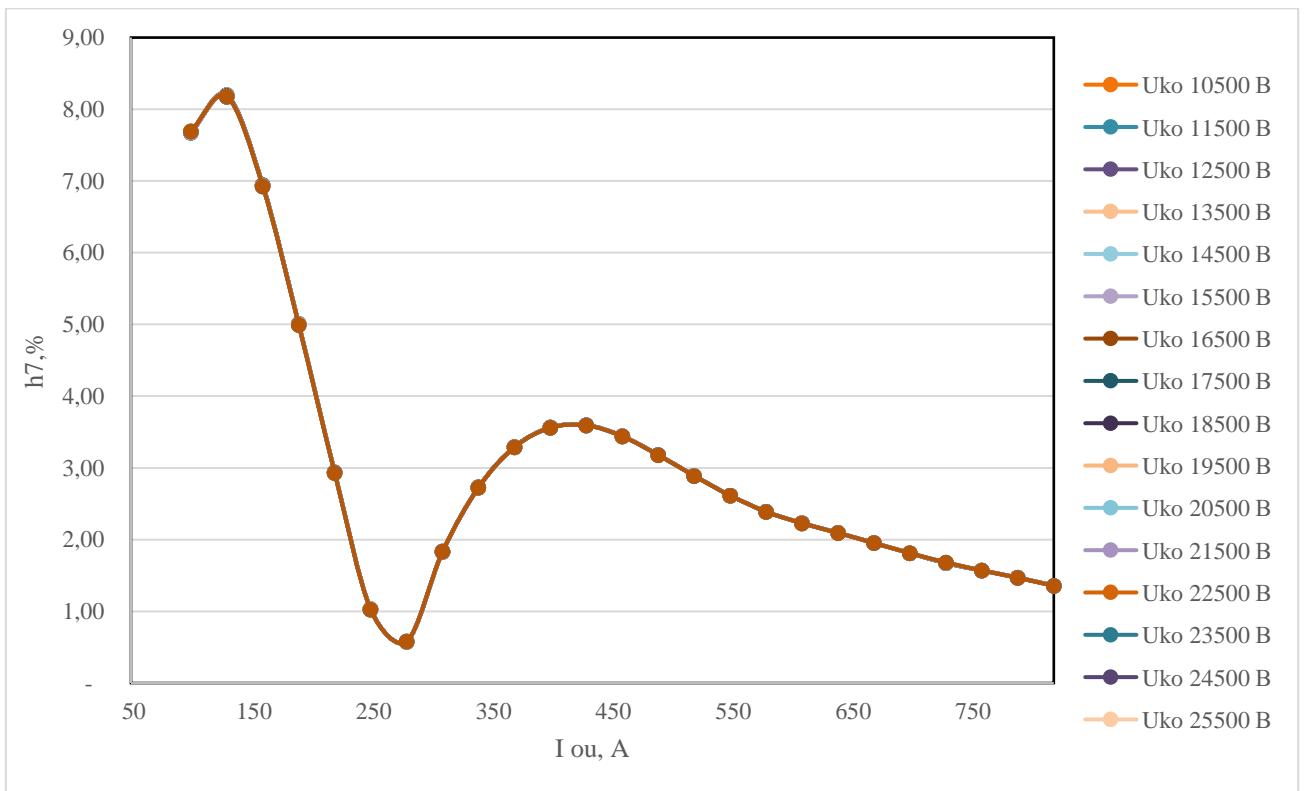


Рисунок Д.48 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,26432 \text{ м}^2$

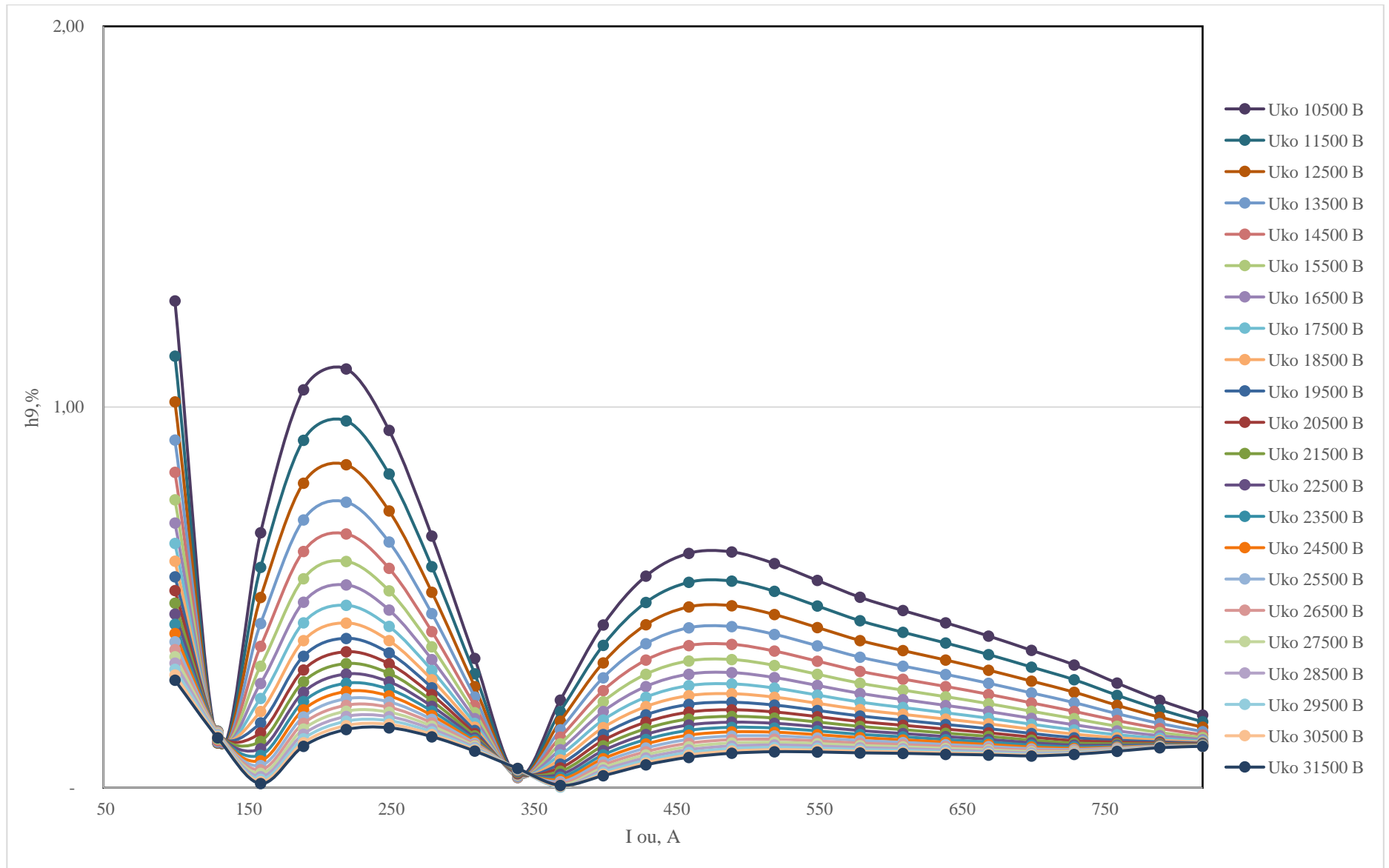


Рисунок Д.49 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

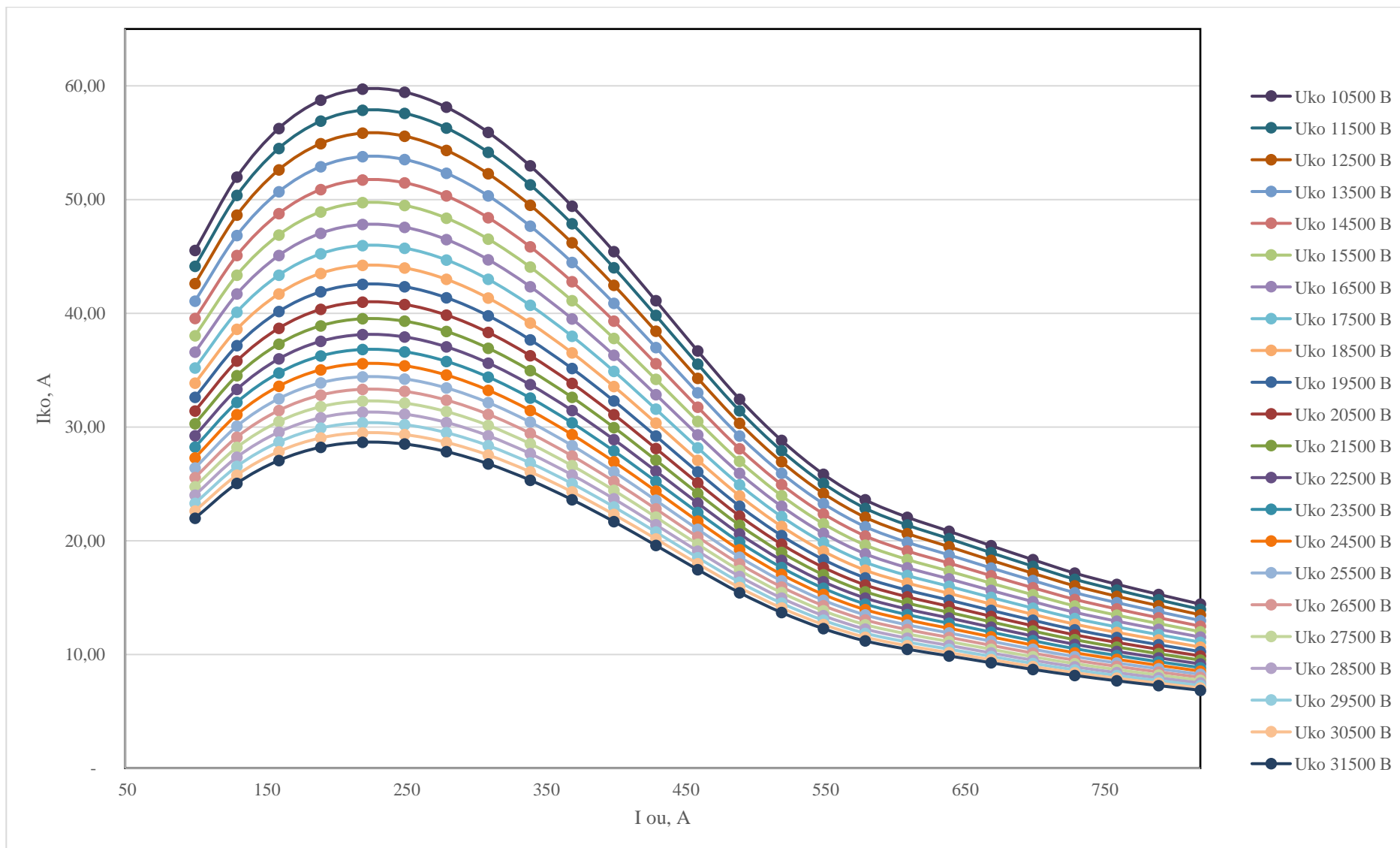


Рисунок Д.50 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{ko} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,26432 \text{ м}^2$

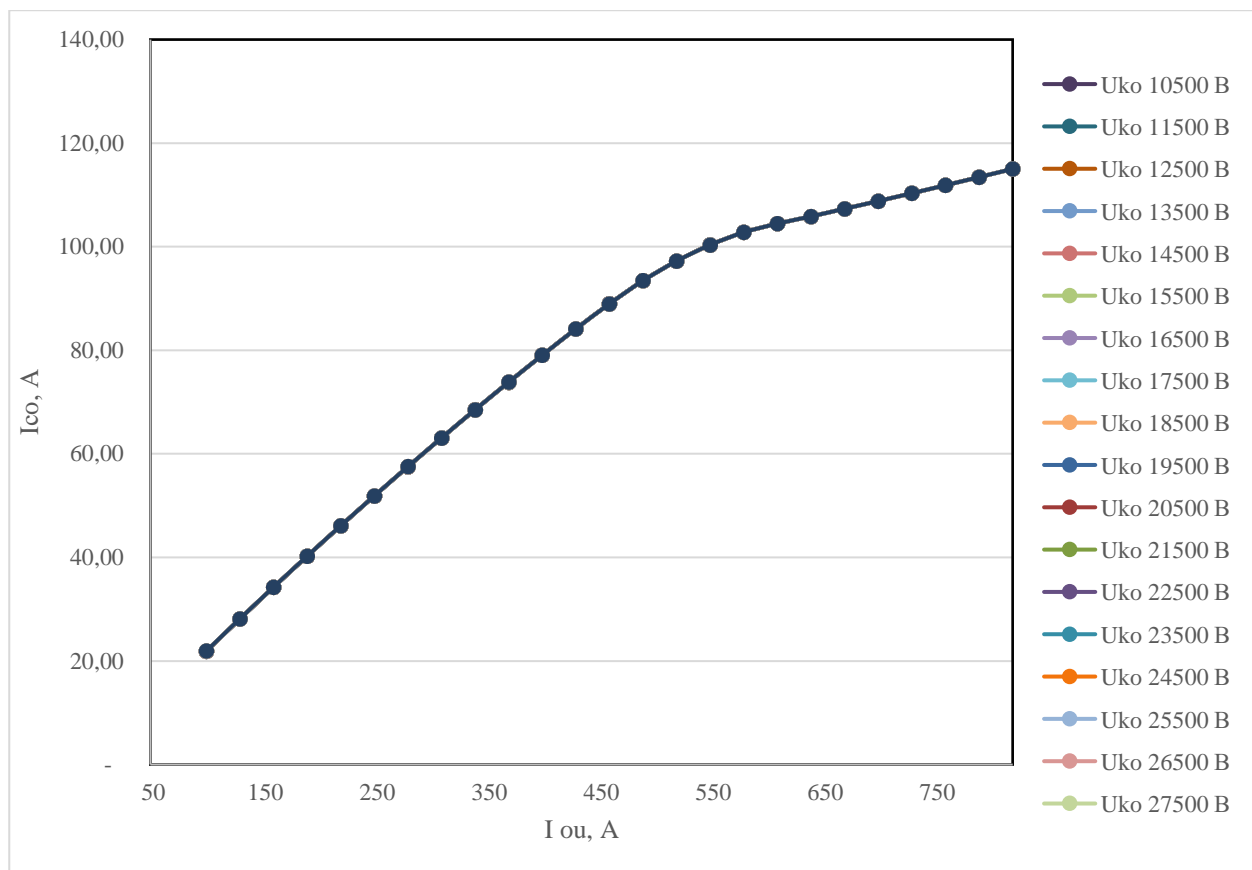


Рисунок Д.51 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,26432 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 10500 В – 31500 В.

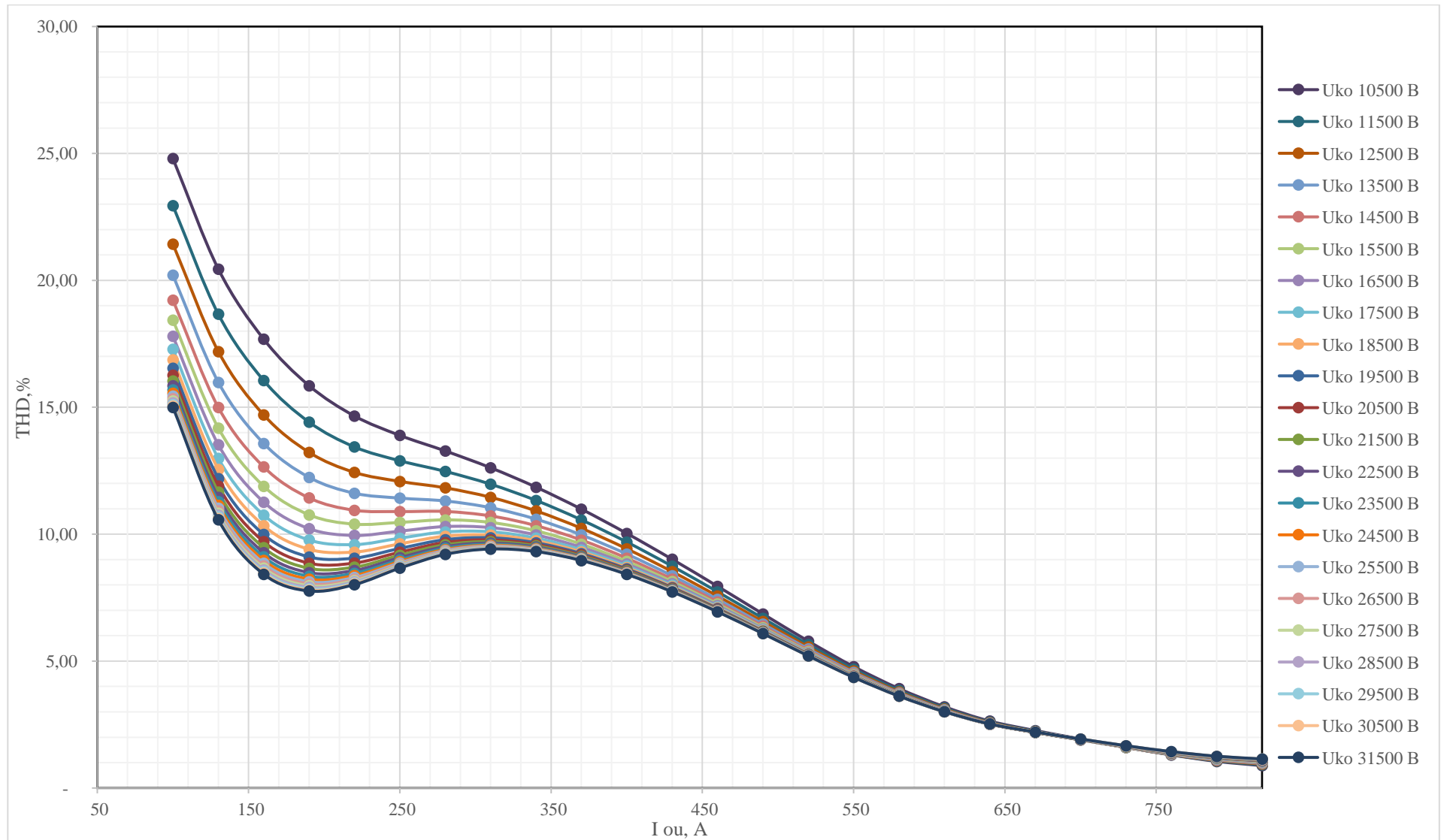


Рисунок Д.52 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2 S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$

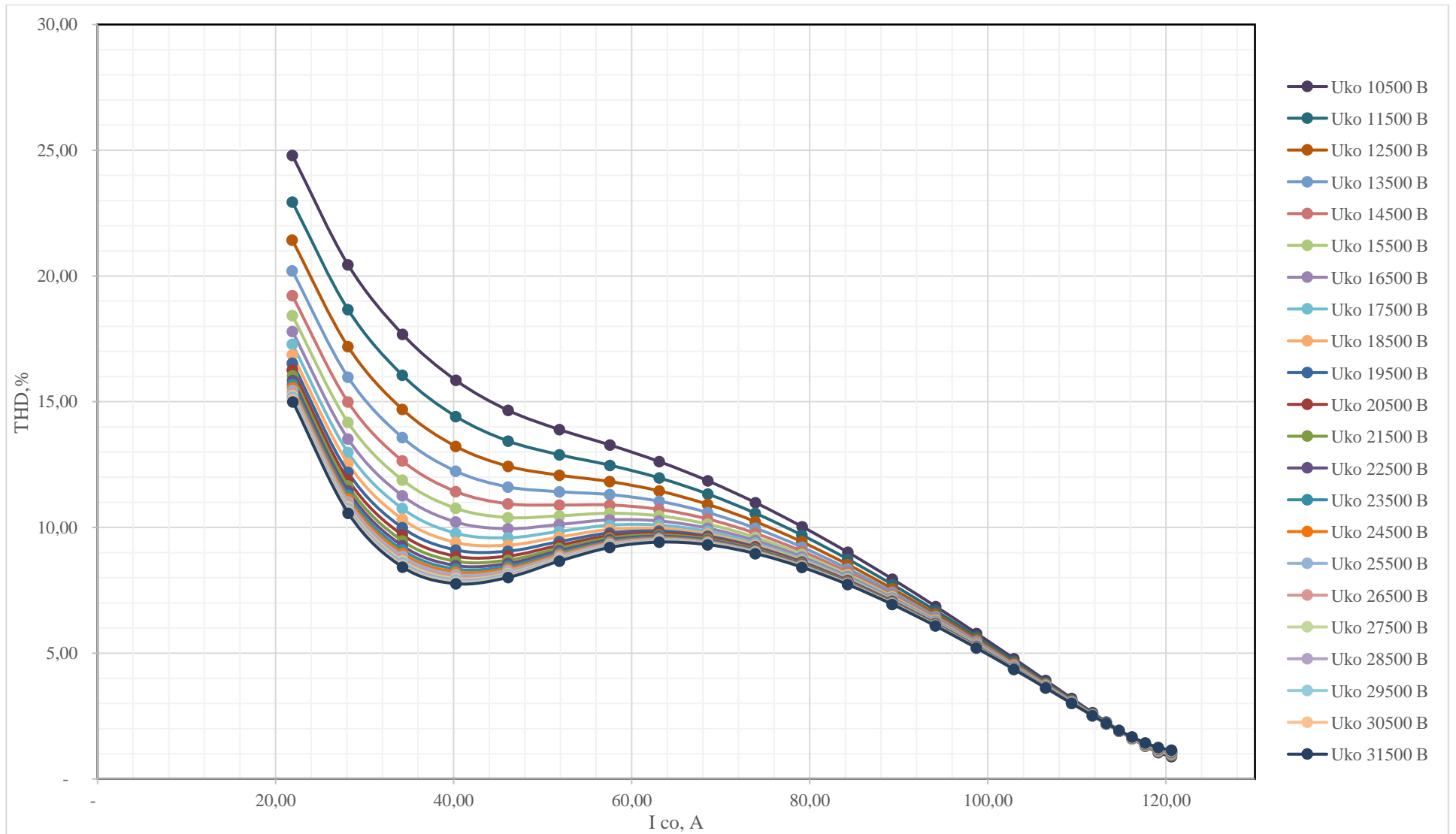


Рисунок Д.53 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$

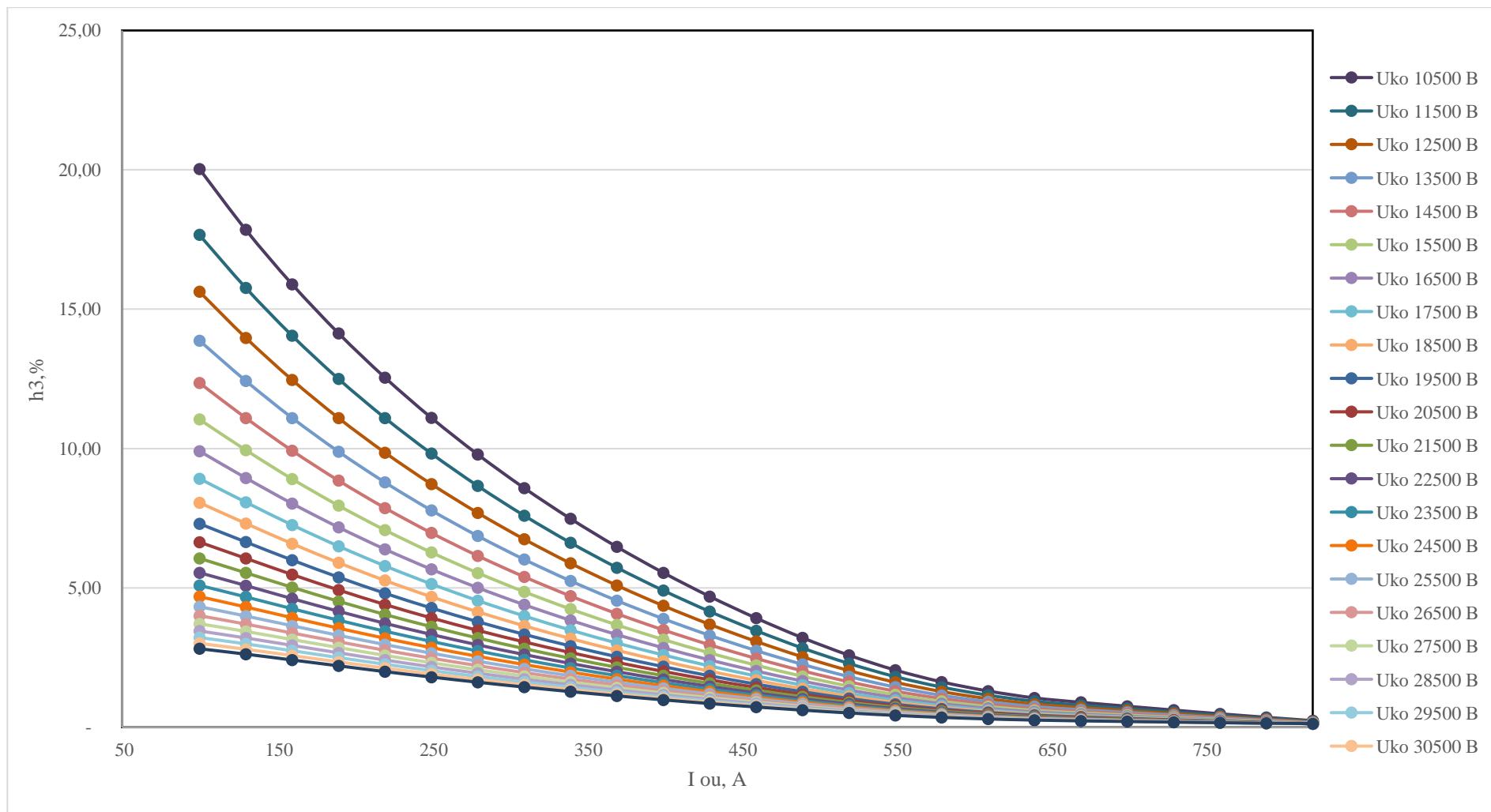


Рисунок Д.54 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27934 \text{ м}^2$

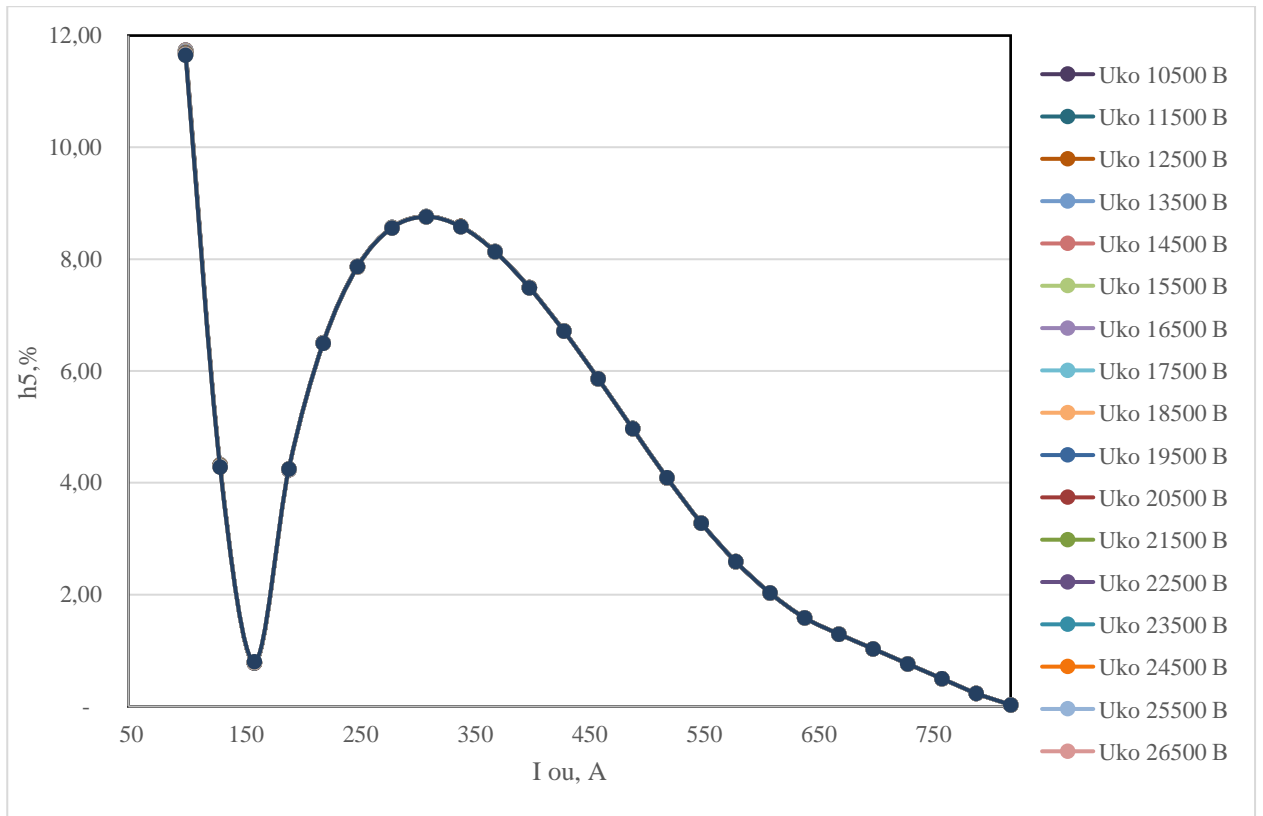


Рисунок Д.55 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$

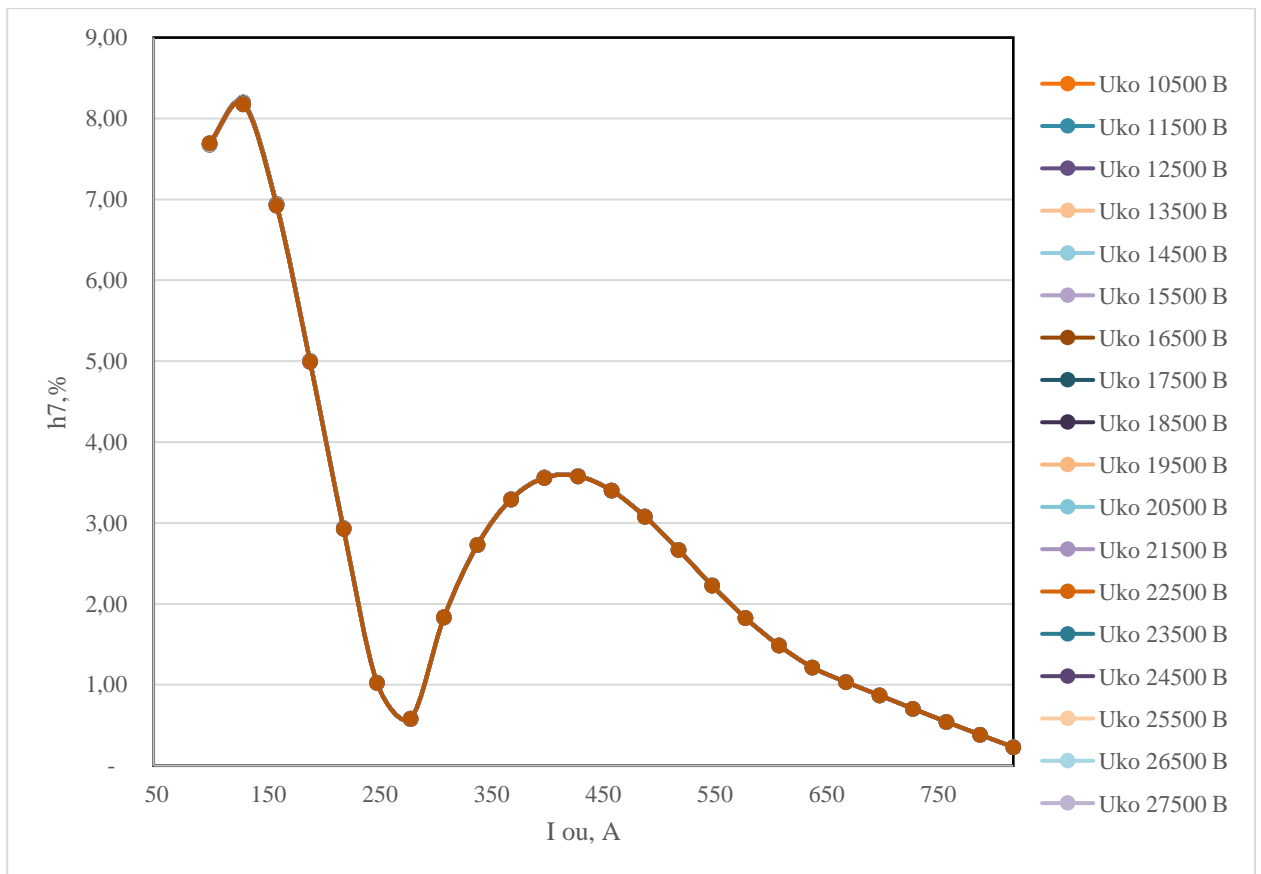


Рисунок Д.56 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$

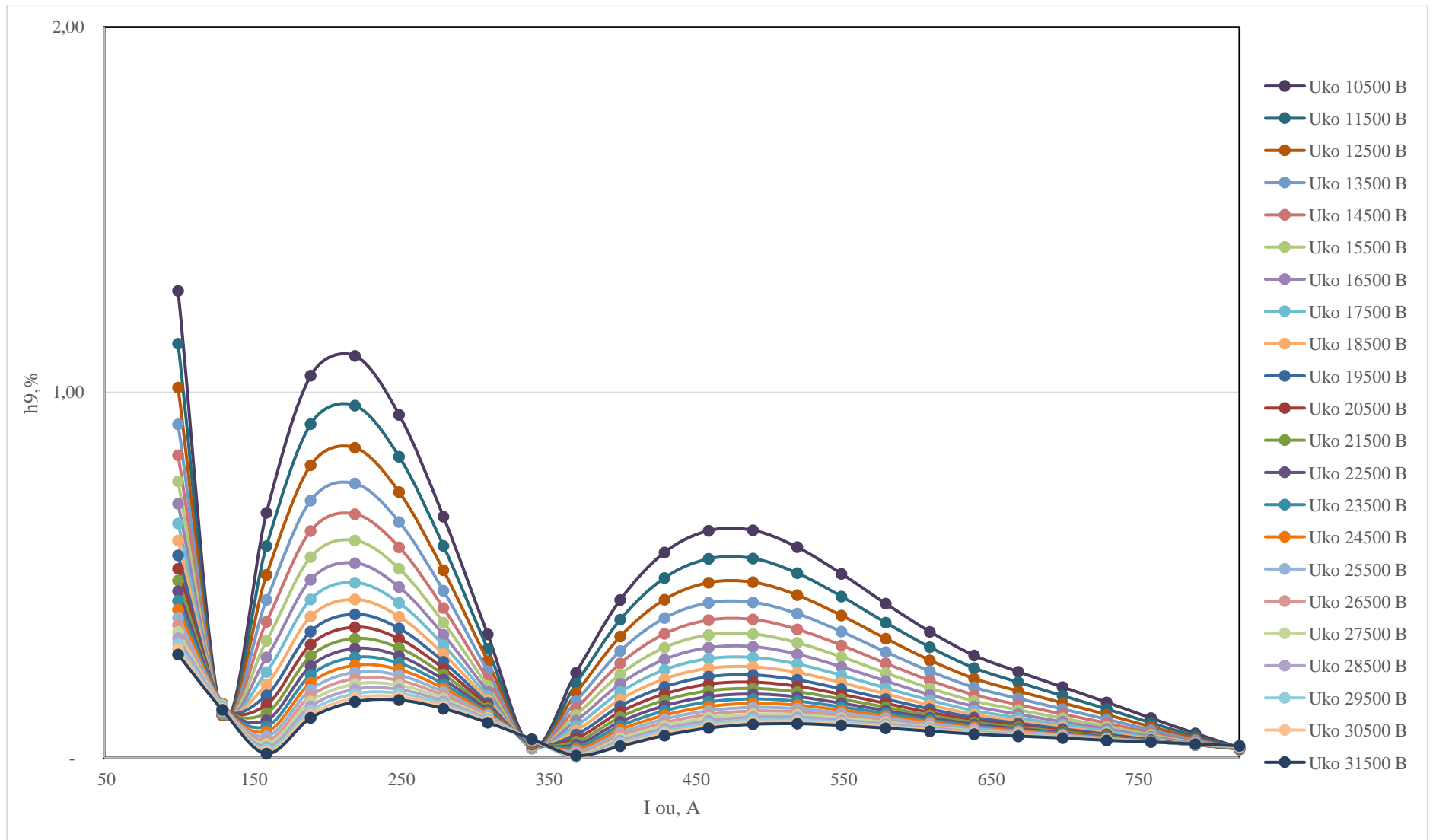


Рисунок Д.57 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27934 \text{ м}^2$

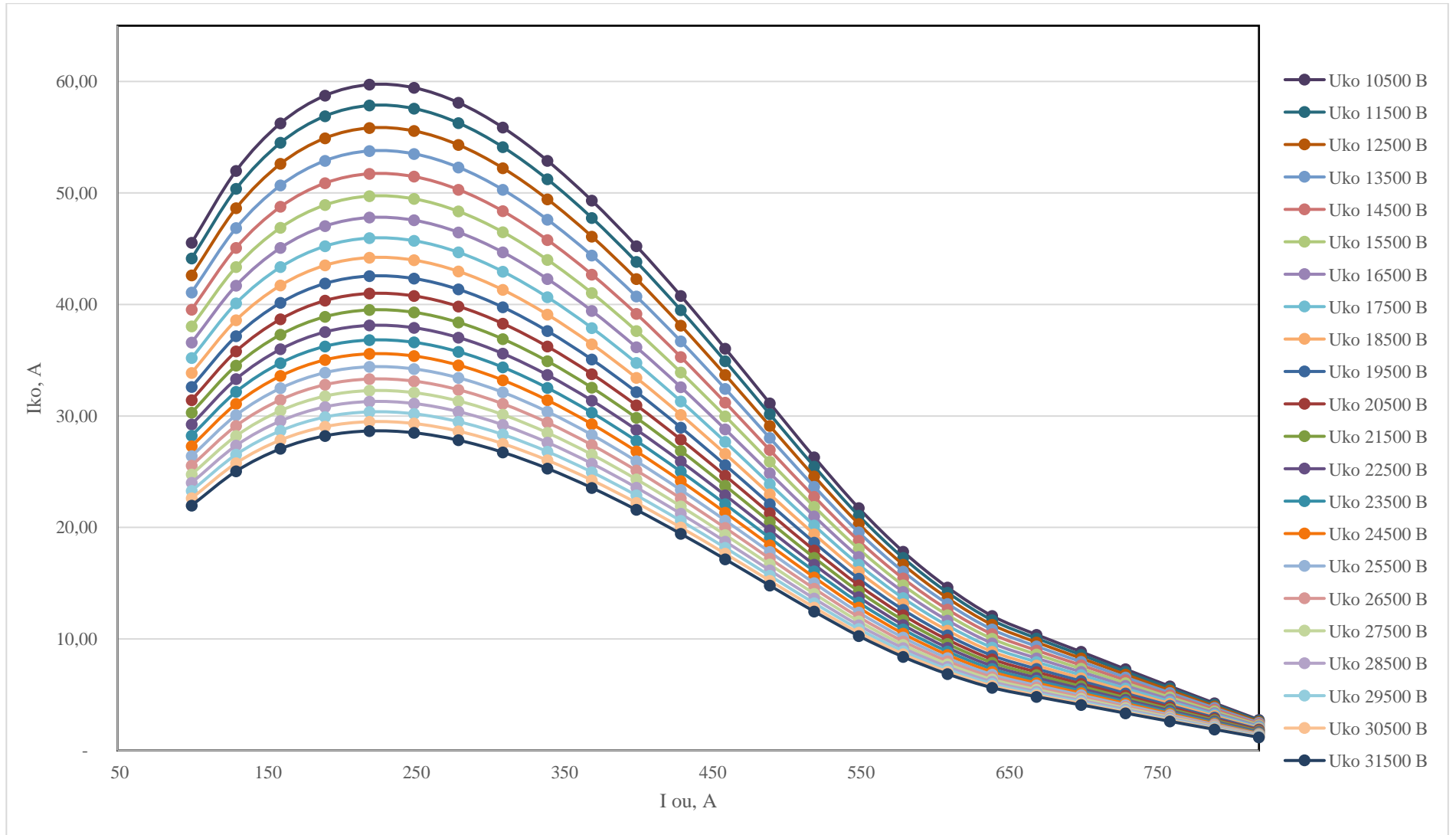


Рисунок Д.58 - График изменения тока компенсационной обмотки $I_{ко}$ $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,27934 \text{ м}^2$

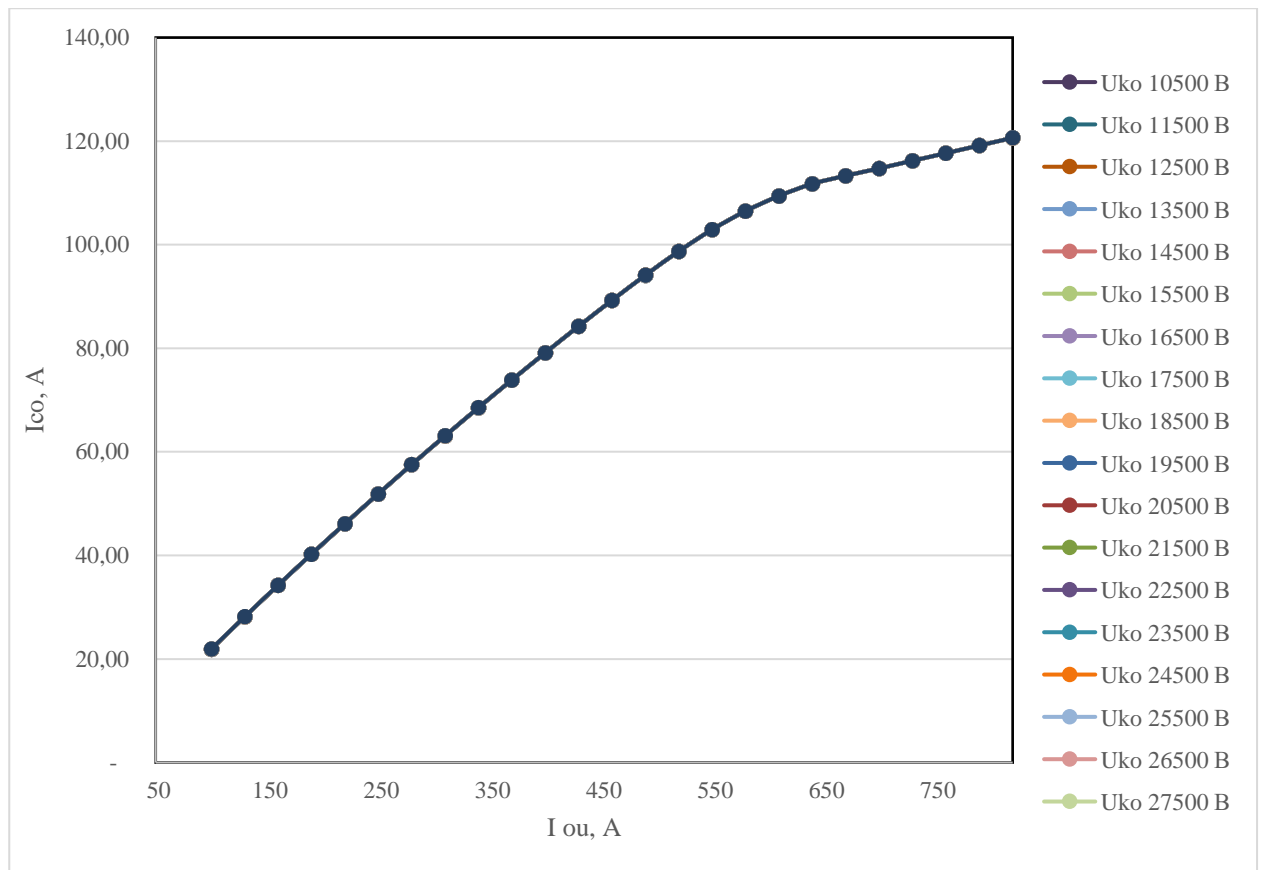


Рисунок Д.59 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$
 $S_{\text{ярем}} - 0,27934 \text{ м}^2$

Изменение сечений стержней и ярем $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,30938 \text{ м}^2$.
 Напряжение компенсационной обмотки 10500 В – 31500 В.

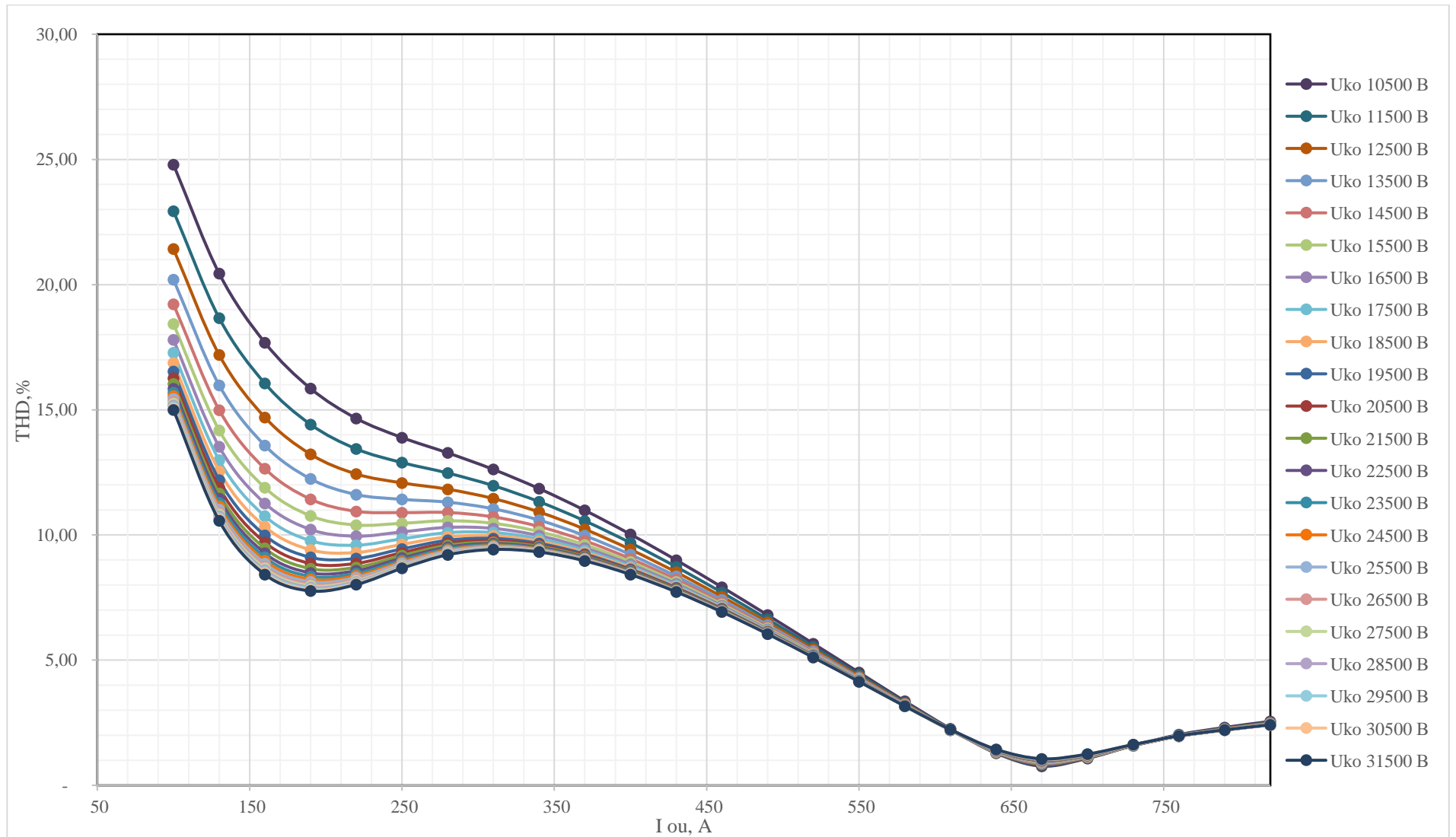


Рисунок Д.60 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки $I_{co} S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2 S_{\text{ярем}} - 0,30938 \text{ м}^2$

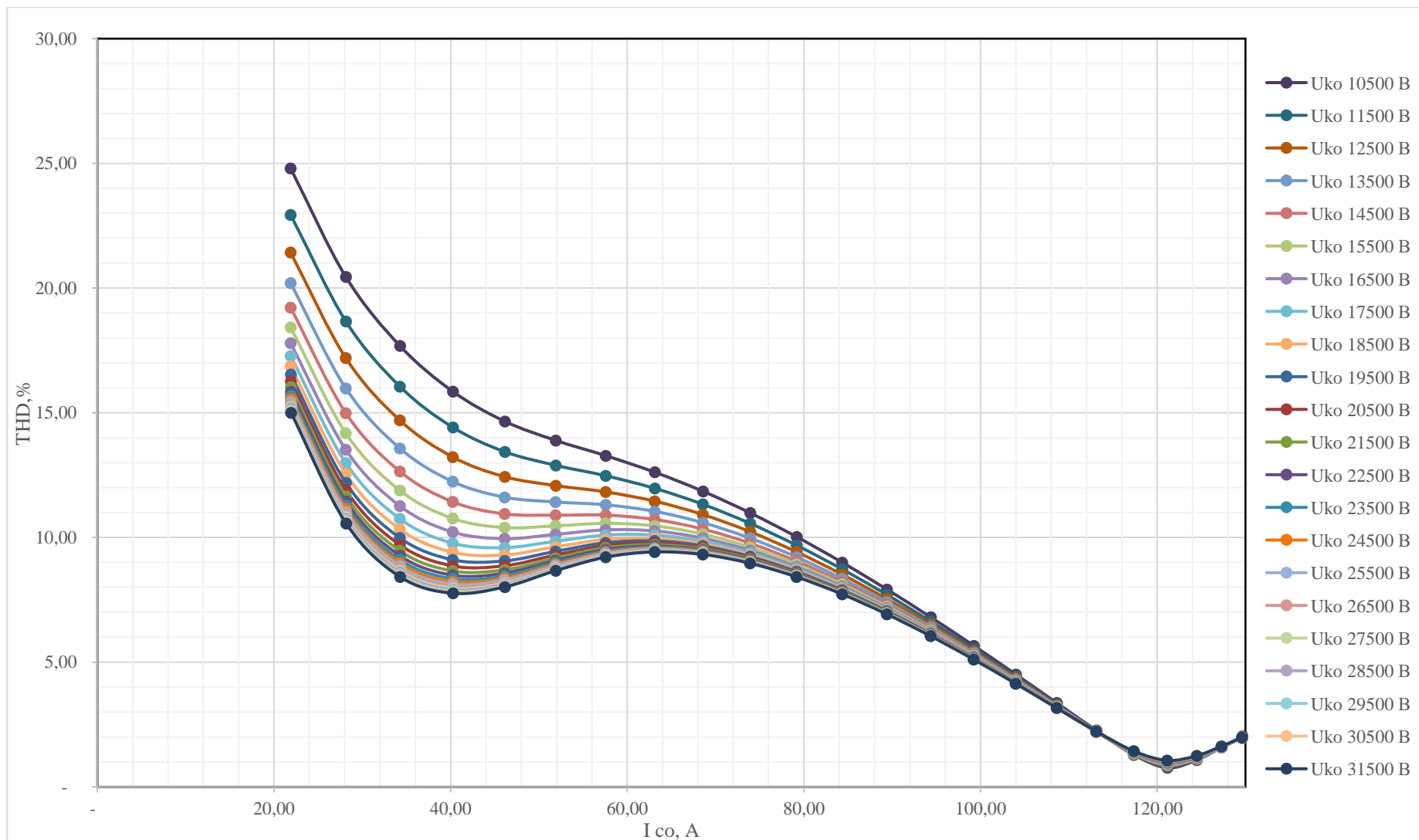


Рисунок Д.61 - График изменения коэффициента гармоник THD тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,30938 \text{ м}^2$

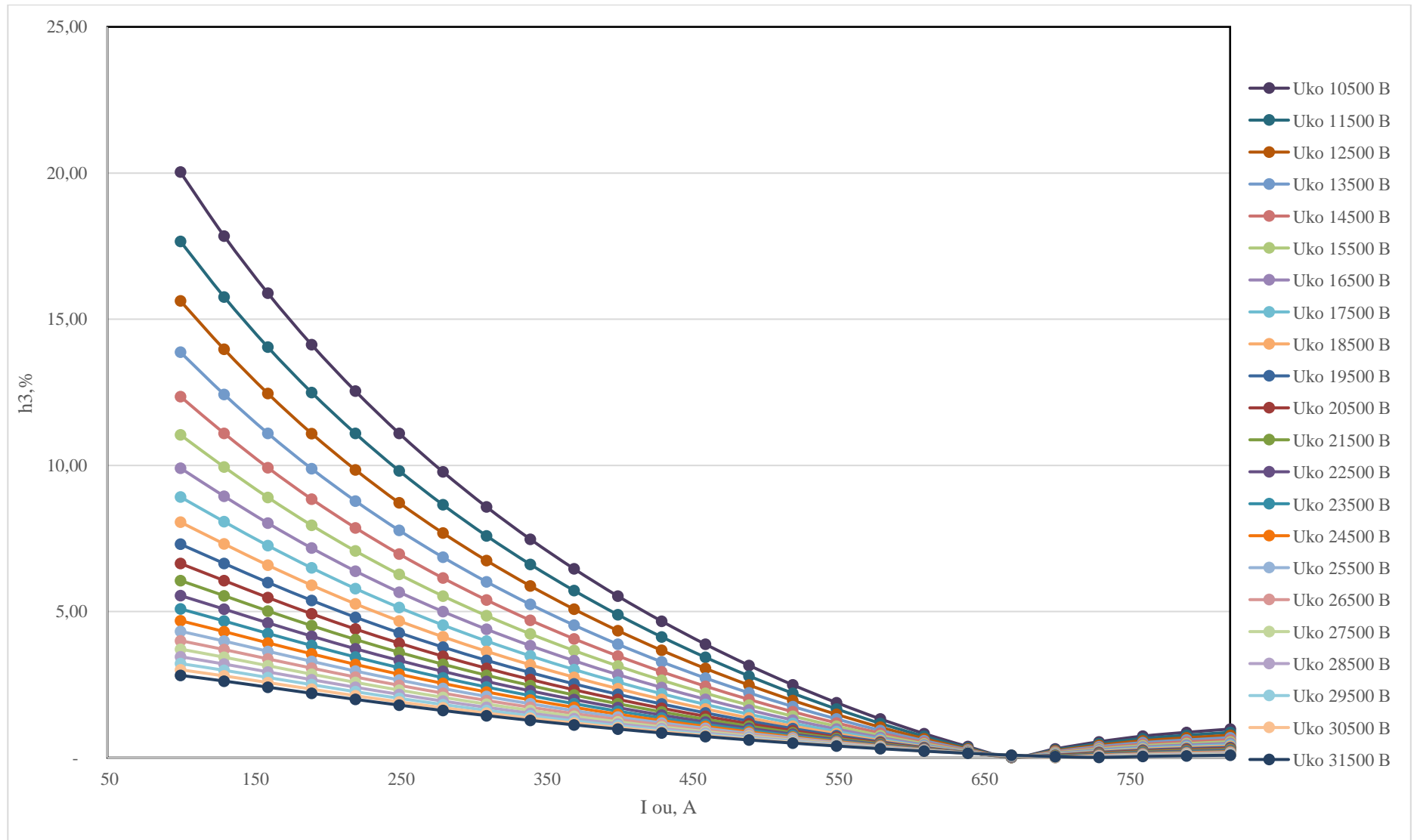


Рисунок Д.62 - График изменения 3-ей гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,30938 \text{ м}^2$

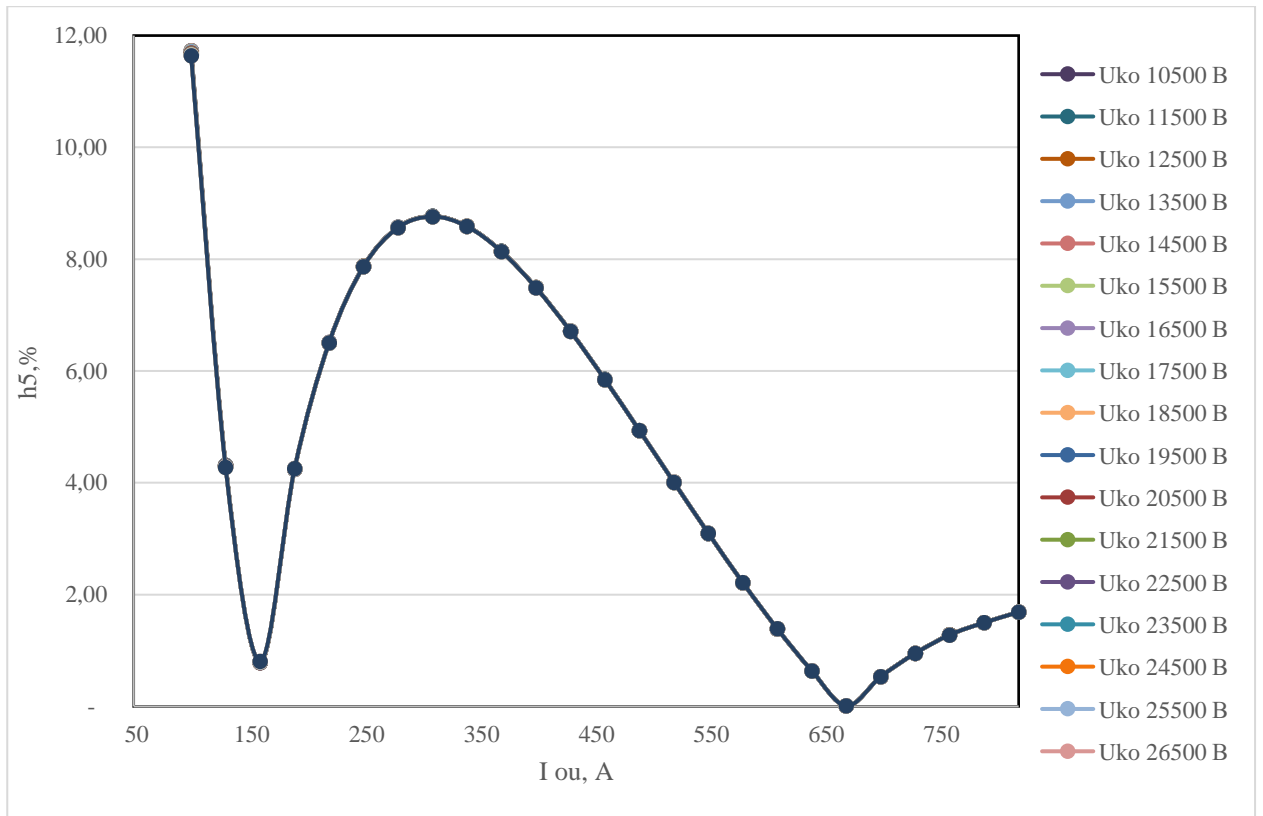


Рисунок Д.63 - График изменения 5-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,30938 \text{ м}^2$

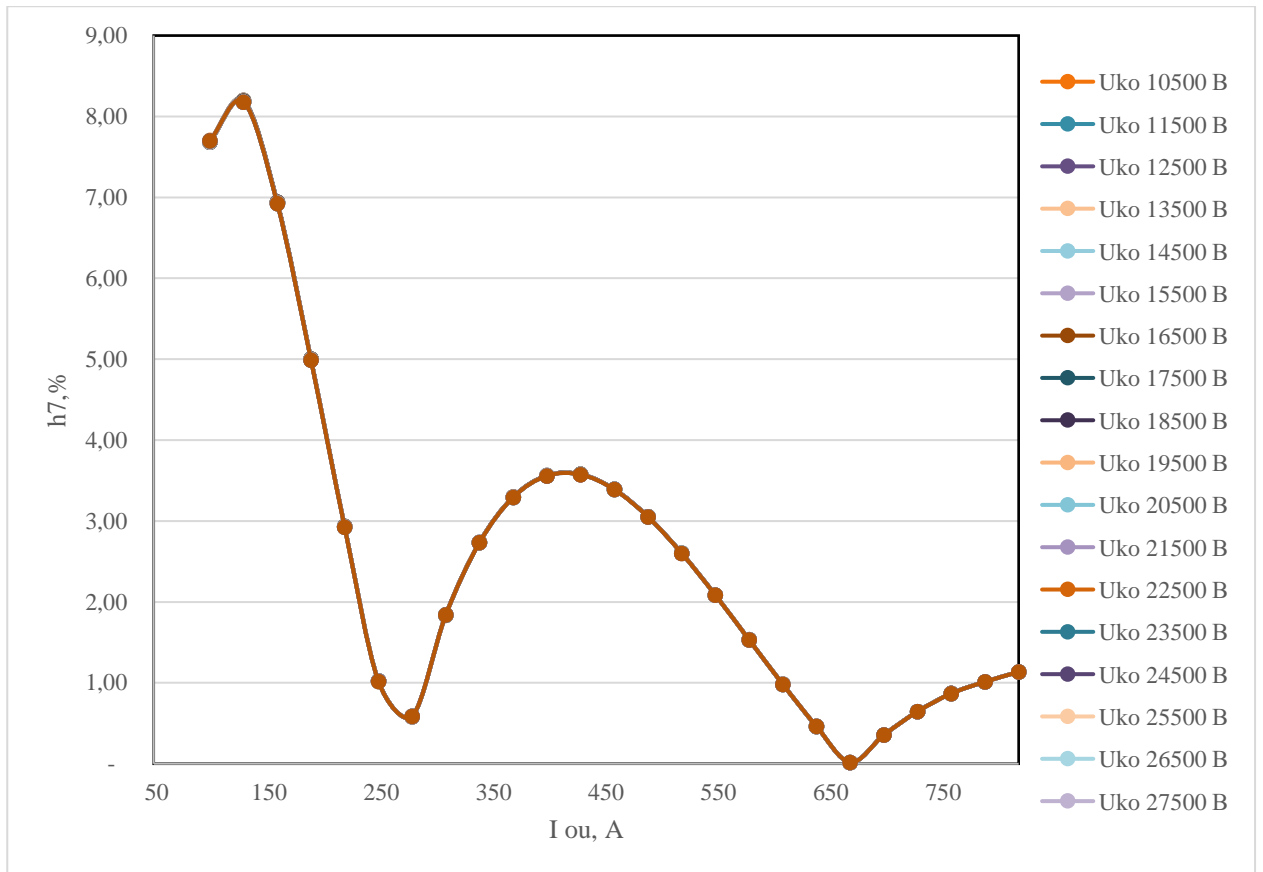


Рисунок Д.64 - График изменения 7-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co}
 $S_{\text{стержня}} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{\text{ярем}} - 0,30938 \text{ м}^2$

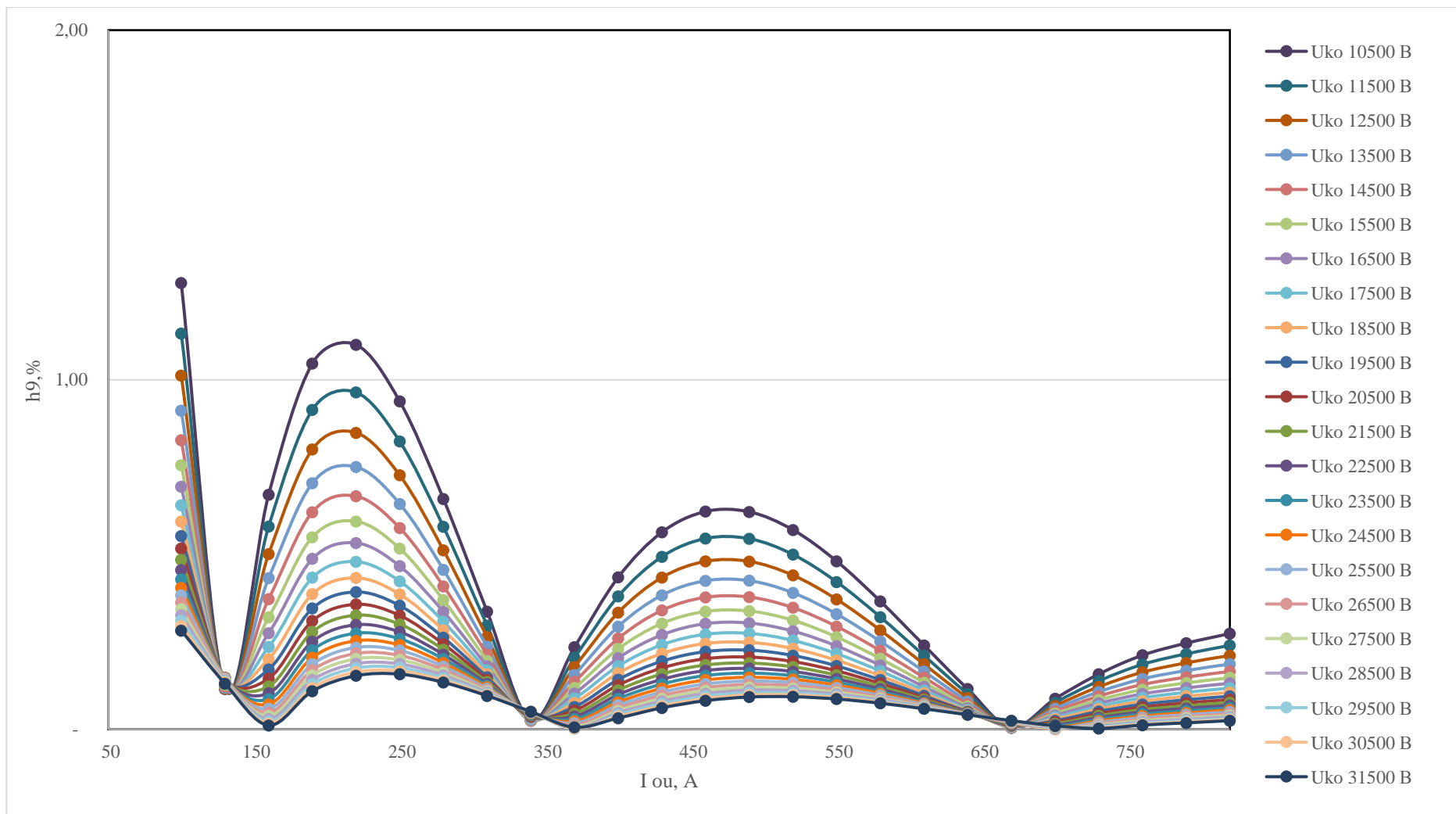


Рисунок Д.65 - График изменения 9-ой гармоники тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,30938 \text{ м}^2$

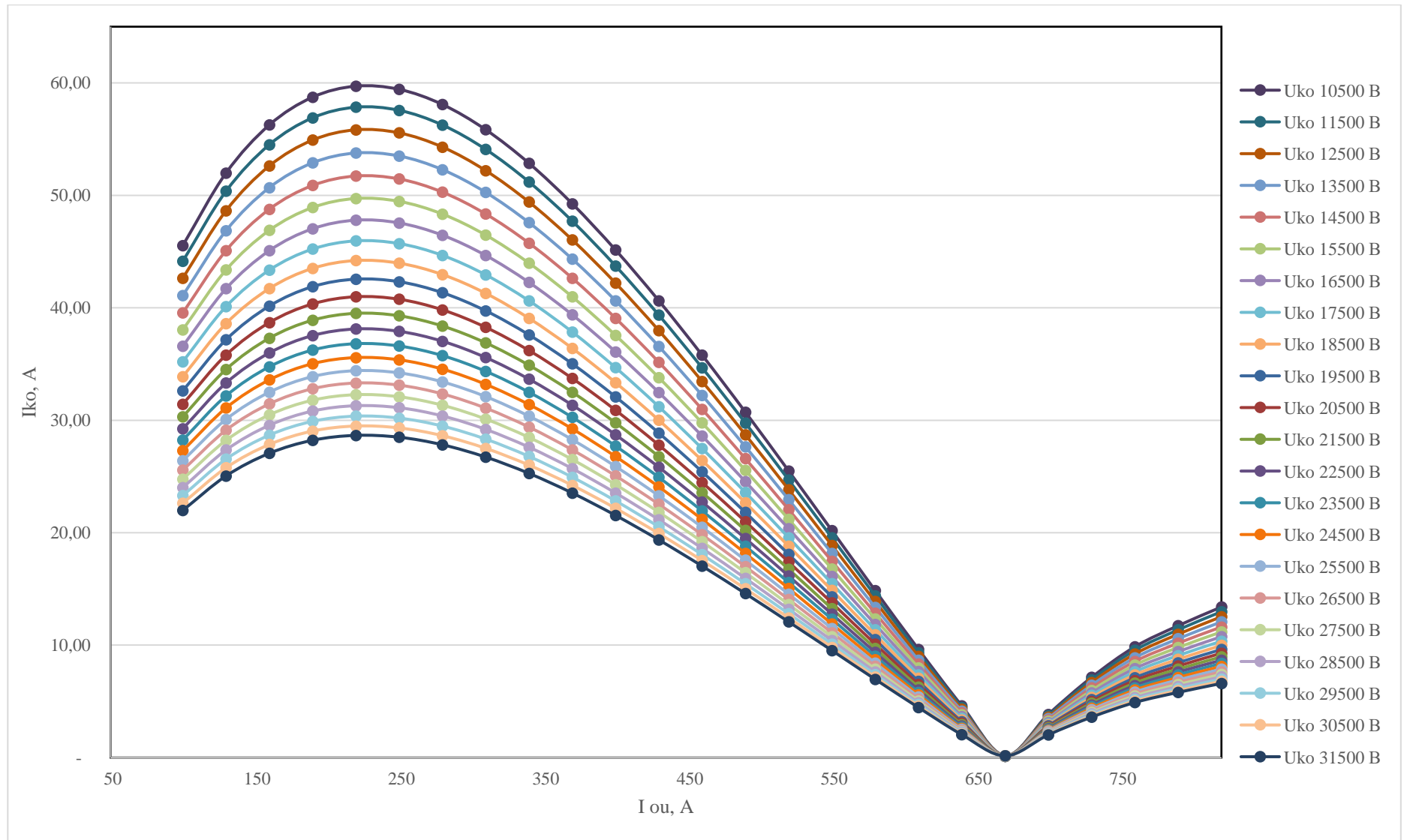


Рисунок Д.66 - График изменения тока компенсационной обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$ $S_{ярем} - 0,30938 \text{ м}^2$

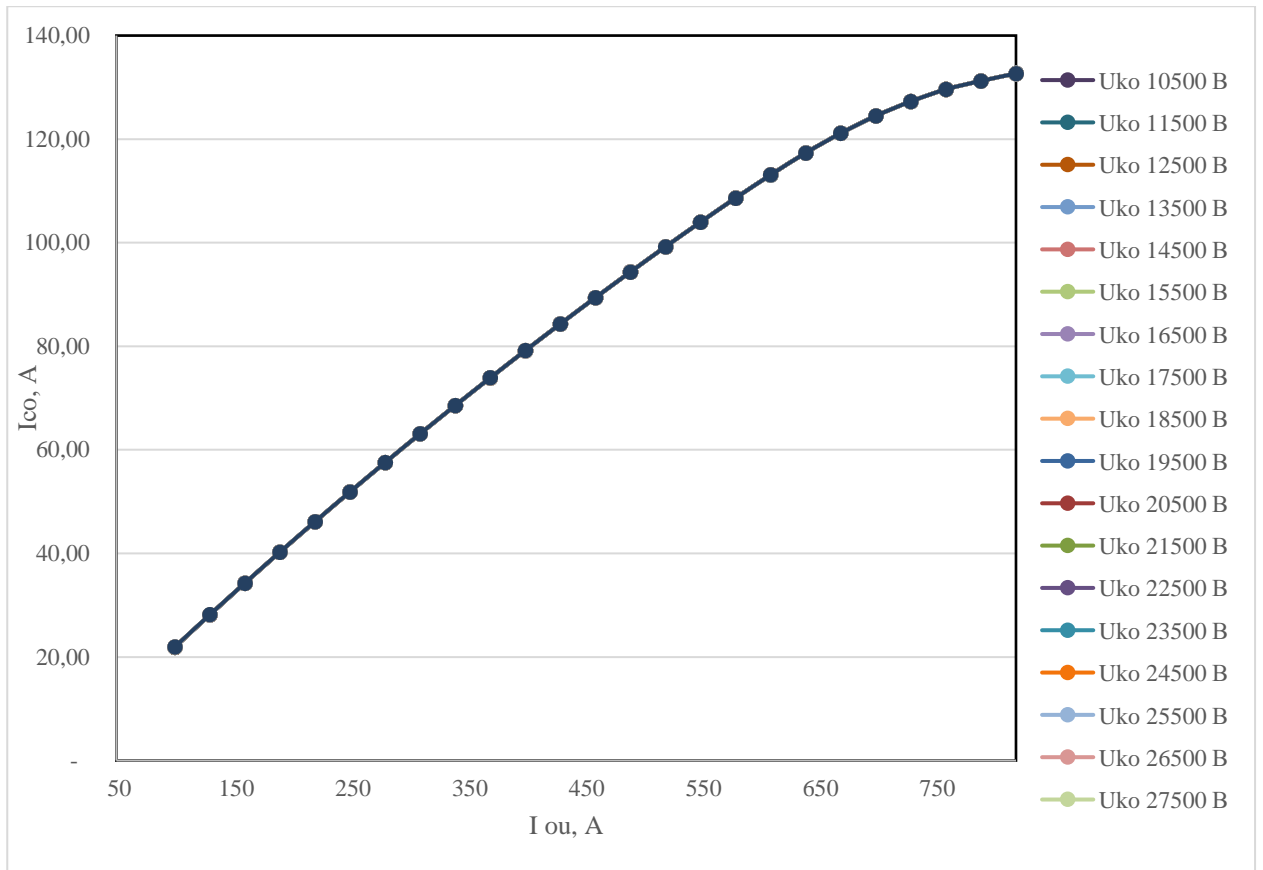


Рисунок Д.67 - График изменения тока сетевой обмотки I_{co} $S_{стержня} - 0,150184 \text{ м}^2$
 $S_{ярем} - 0,30938 \text{ м}^2$

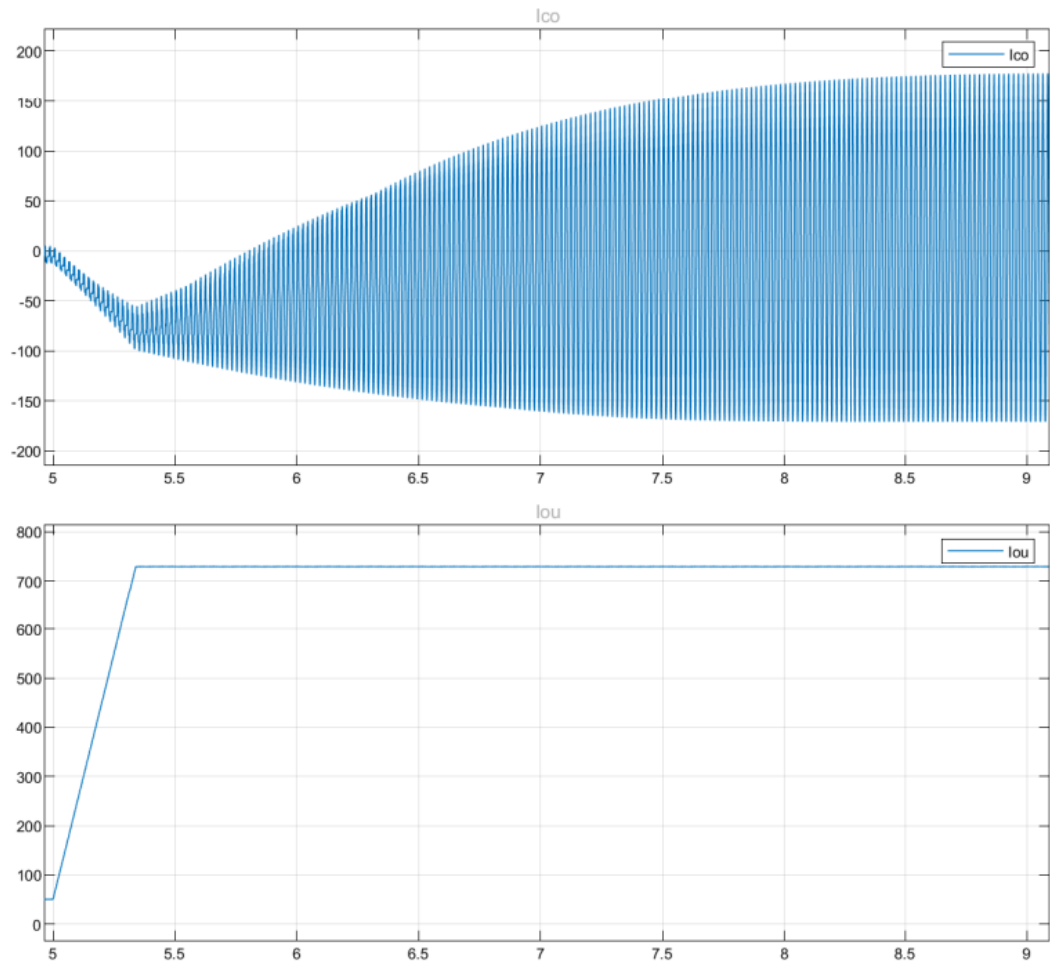


Рисунок Е.1 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=0$ $R_2=10$ Ом

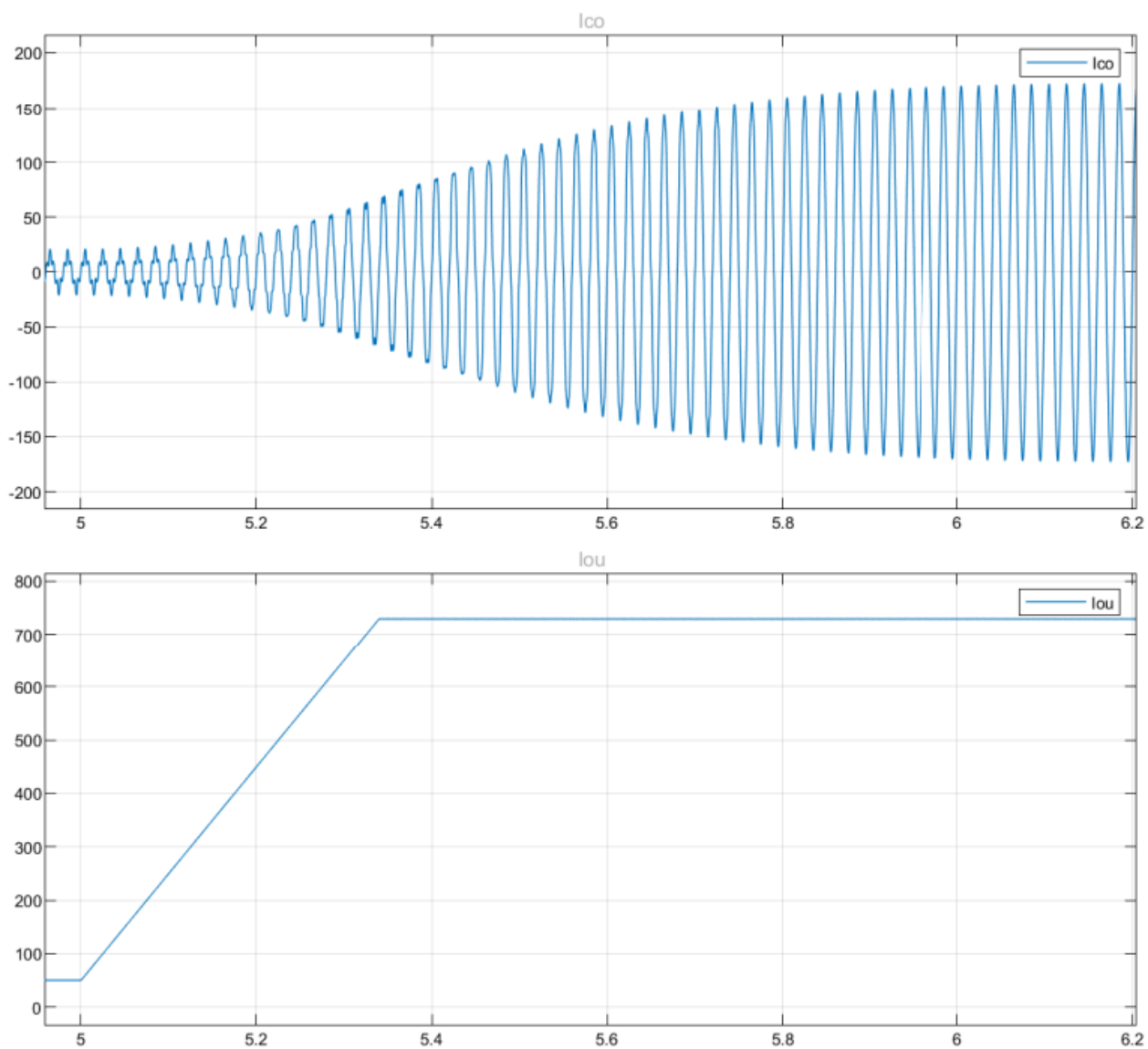


Рисунок Е.2 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=10$ $R_2=10$ Ом

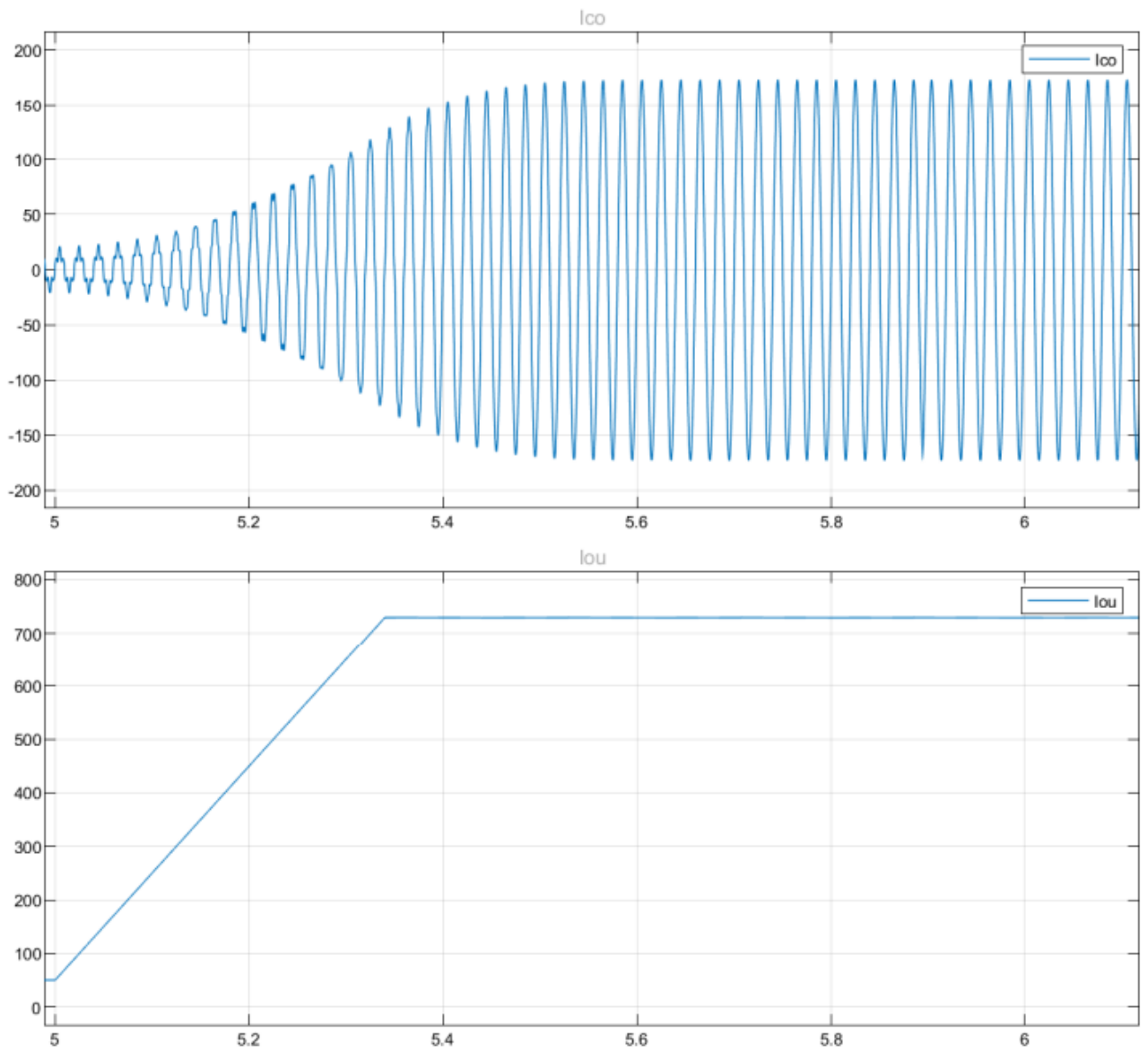


Рисунок Е.3 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=30$ $R_2=30$ Ом

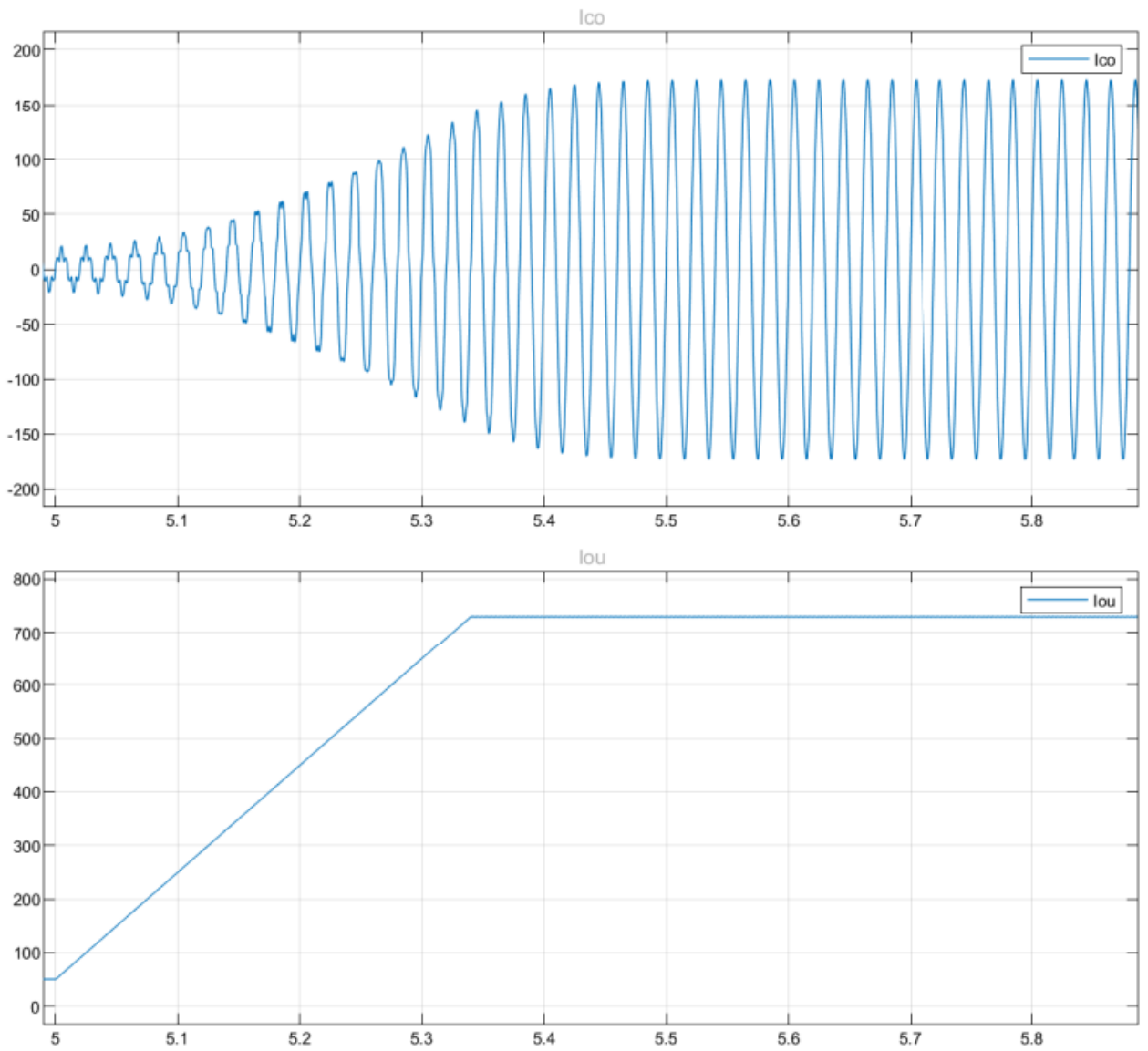


Рисунок Е.4 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=40$ $R_2=40$ Ом

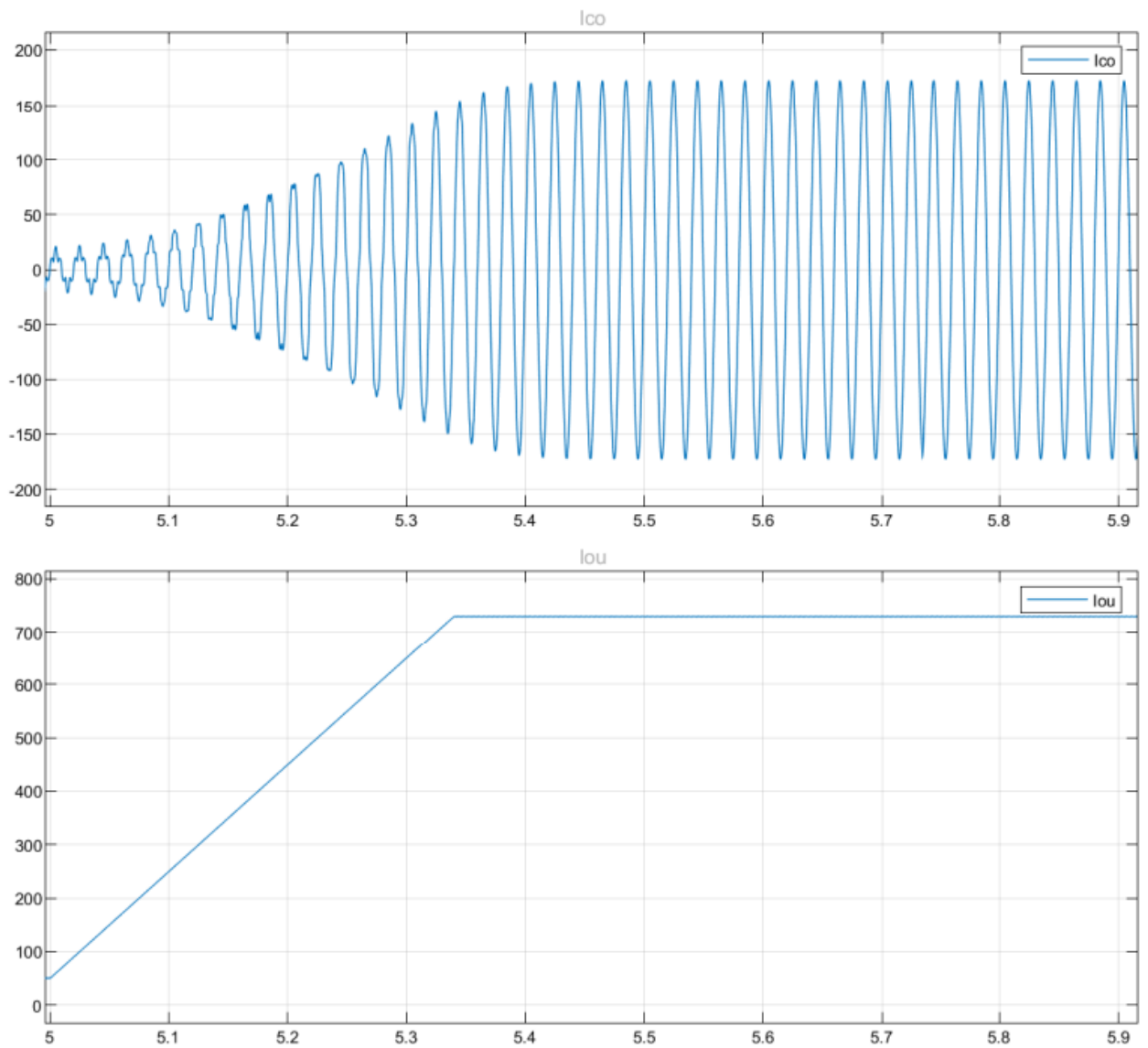


Рисунок Е.5 - Расчетная осциллограмма набора номинальной мощности УШР 25 МВАр 110 кВ при установке сопротивлений $R_1=50$ $R_2=50$ Ом



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.Даукеева» 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») Республика Казахстан, 160024 г.Шымкент, Каратауский р/н, жилой массив Тассай, здание 1196 e-mail: asia.trafo@alageum.com

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