

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А. С. Торопов  
подпись      инициалы, фамилия  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Исследование влияния нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на  
низковольтную электрическую сеть  
тема

Руководитель	_____	<u>доцент каф. ЭМиАТ, к.т.н.</u>	<u>А. В. Коловский</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А. А. Михайлюк</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И. А. Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Абакан 2024

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование влияния нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на низковольтную электрическую сеть» содержит 81 страницу текстового документа, 93 рисунка, 4 таблицы, 25 использованных источников, 3 листа графического материала.

НЕЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА, ГАРМОНИЧЕСКИЕ  
СОСТАВЛЯЮЩИЕ, ТРАНСФОРМАТОР, КАЧЕСТВО  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объект исследований – нелинейная нагрузка.

Предмет исследований – влияние доли и состава нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на показатели качества электрической энергии.

Метод исследования – компьютерное моделирование в «SimInTech».

Новизна заключается в создании модели нелинейной нагрузки в среде «SimInTech», позволяющей легко создавать узлы нагрузки с заданным числом подключенных нелинейных нагрузок. Это дает возможность создавать модели, позволяющие оценить влияние на электрическую сеть большого числа нелинейных потребителей с импульсными источниками питания.

Цель работы – исследование влияния однофазной нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на качество передаваемой электроэнергии и работу трансформатора путем моделирования упрощенной схемы в среде «SimInTech».

Задачи выпускной квалификационной работы:

- разработка модели нелинейной нагрузки в «SimInTech»;
- исследование влияния числа нелинейных потребителей на искажение напряжения в сети;
- разработка модели участка сети 0,4кВ с долей нелинейной коммунально-бытовой нагрузкой в «SimInTech»;
- исследование влияния доли и числа ЭП с нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на электрическую сеть при соединении обмоток трансформатора  $\Delta/Y$  и  $Y/Y$ .

Значимость работы обусловлена развитием низковольтных электрических сетей и появлению в сети 0,4кВ большого количества коммунально-бытовых потребителей, которые в свою очередь являются мощной нелинейной электрической нагрузкой.

Область применения – результаты полученных исследований могут быть применены при разработках мероприятий по борьбе с гармоническими составляющими высших гармоник, вызванных нелинейной нагрузкой.

## THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic "Study of the influence of nonlinear household load on a low-voltage electrical network" contains 82 pages of a text document, 93 figures, 4 tables, 20 sources used, 3 sheets of graphic material.

NONLINEAR LOAD, HARMONIC COMPONENTS, TRANSFORMER, POWER QUALITY, MODELING.

The object of research is compliance with electricity quality standards

The subject of research is the influence of non-linear household load on the quality of electric energy.

The research method is computer modeling in "SimInTech".

The novelty lies in the creation of a primitive model in the "SimInTech" environment, which allows us to assess the degree of influence of nonlinear household loads with switching power sources on the electrical network.

The purpose of the work is to study the influence of a single-phase nonlinear household load on the quality of transmitted electricity and transformer operation by modeling a simplified circuit in the "SimInTech" environment.

Tasks of the final qualification work:

- development of a nonlinear load model in "SimInTech";
- comparison of the effect of the number of non-linear consumers on the distortion of voltage in the network and the consequences of the appearance of higher-order harmonic coefficients;
- development of a model of a 0.4kV network section with a share of nonlinear household load in "SimInTech";
- comparison of the influence of the share of nonlinear household load with a different number of consumers and changing transformer windings D/Y and Y/Y.

The research method is computer modeling in the "SimInTech" environment.

The significance of the work is due to the development of low-voltage electrical networks and the appearance of a large number of utility consumers in the 0.4kV network, which in turn are a powerful nonlinear electrical load.

Scope of application – the results of the research can be applied in the development of combating the harmonic components of higher harmonics caused by nonlinear loading.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Теоретическая часть.....	5
1.1 Нелинейные потребители в низковольтных электрических сетях .....	6
1.2 Аналитический обзор по теме .....	9
1.3 Программное обеспечение для моделирования нелинейной нагрузки ..	16
2 Практическая часть .....	18
2.1 Разработка моделей нелинейной нагрузки .....	18
2.2 Разработка моделей участка сети с нелинейной нагрузкой.....	30
3 Аналитическая часть.....	32
3.1 Исследование влияния числа нелинейных электроприемников на гармонический состав .....	32
3.2 Исследование влияния различной доли нелинейной нагрузки при соединении обмоток трансформатора D/Y и Y/Y на низковольтную электрическую сеть .....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	72
Приложение А .....	75
Приложение Б.....	76
Приложение В .....	78
Приложение Г.....	80
Приложение Д .....	81

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с качеством электроэнергии, стоят в ряду ключевых задач, с которыми сталкиваются отрасли электроэнергетики на сегодняшний день. Причиной снижения качества электроэнергии является рост числа нелинейных нагрузок, вызывающих искажения в форме синусоиды тока и напряжения при их использовании.

По мере того как число нелинейных потребителей возрастает, также усиливается их воздействие на качество электроэнергии. Любая часть распределительной сети содержит множество нелинейных нагрузок, которые не только вызывают фазовый сдвиг тока и напряжения, но и влияют на их синусоидальную форму за счет генерации токов высших гармоник.

Актуальность работы обусловлена увеличением количества нелинейных нагрузок в бытовом и промышленном секторах, оснащенных импульсными источниками питания, и важностью анализа воздействия этих нагрузок на электроэнергетическую систему и трансформаторы.

Объект исследований – нелинейная нагрузка.

Предмет исследований – влияние доли и состава нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на показатели качества электрической энергии.

Метод исследования – компьютерное моделирование в «SimInTech».

Новизна заключается в создании модели нелинейной нагрузки в среде «SimInTech», позволяющей создавать узлы нагрузки с заданным числом подключенных нелинейных нагрузок. Это дает возможность создавать модели, позволяющие оценить влияние на электрическую сеть большого числа нелинейных потребителей с импульсными источниками питания.

Цель работы – исследование влияния однофазной нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на качество электроэнергии и работу трансформатора путем моделирования схемы в среде «SimInTech».

Задачи выпускной квалификационной работы:

- разработка модели нелинейной нагрузки в «SimInTech»;
- исследование влияния числа нелинейных потребителей на искажение напряжения в сети;
- разработка модели участка сети 0,4кВ с долей нелинейной коммунально-бытовой нагрузкой в «SimInTech»;
- исследование влияния доли и числа ЭП с нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на электрическую сеть при соединении обмоток трансформатора  $\Delta/Y$  и  $Y/Y$ .

Значимость работы обусловлена развитием низковольтных электрических сетей и появлению в сети 0,4кВ большого количества коммунально-бытовых потребителей, которые в свою очередь являются мощной нелинейной электрической нагрузкой.

Область применения – результаты полученных исследований могут быть применены при разработках мероприятий по борьбе с гармоническими составляющими высших гармоник, вызванных нелинейной нагрузкой.

## **1 Теоретическая часть**

### **1.1 Нелинейные потребители в низковольтных электрических сетях**

Электрические сети низкого напряжения являются одной из основных частей энергетической инфраструктуры, обеспечивая электроэнергией бытовые, коммерческие и промышленные потребители. Одной из современных проблем в этих сетях является наличие нелинейных потребителей, которые создают дополнительные сложности в эксплуатации и управлении сетями данного класса напряжения.

Нелинейные потребители — это электроприемники или оборудование, потребляющие ток, который не пропорционален приложенному напряжению. В результате работы таких устройств возникают искажения гармоник тока и напряжения в электрической сети.

К наиболее распространенным нелинейным потребителям относятся: персональные компьютеры и серверы: используются в офисах и домах, оснащены блоками питания, преобразующими переменный ток (AC) в постоянный (DC); светодиодное освещение: содержит драйверы, преобразующие переменное напряжение в постоянное для питания светодиодов; инверторы и преобразователи частоты: применяются в системах управления двигателями и возобновляемых источниках энергии, таких как солнечные панели; электронные устройства и бытовая техника: телевизоры, зарядные устройства, микроволновые печи и другое оборудование с импульсными источниками питания.

Различаются несколько видов электроприемников – именуемых как нагрузка, линейные и нелинейные сопротивления. Первым относятся наиболее знакомые лампы накаливания, нагревательные элементы, и другие резистивные нагрузки, сопротивление которых не зависит от тока или приложенного к ним напряжения, ко вторым более сложные устройства, сопротивление которых зависит от протекающего по ним тока или приложенного напряжения.

В недалеком прошлом большая часть электрической энергии потреблялась линейными нагрузками, с конца 90-х годов резко увеличилась доля нелинейных электропотребителей. В первую очередь это персональные компьютеры и файл-серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания, газоразрядные лампы другое офисное оборудование, также не составили исключения, набирающие популярность светодиодные светильники, и светодиодные лампочки.

Россия столкнулась с новой серьезнейшей проблемой. Ее суть в том, что сети электроснабжения 0,4 кВ в зданиях, оснащенных компьютерной

техникой, «заражены» высшими по отношению к промышленной частоте (50 Гц) гармониками.

В случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10-15%, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения не возникает. При превышении указанного предела появляются различные проблемы в эксплуатации.

Дело в том, что для электропитания перечисленного электронного оборудования используются встроенные импульсные источники питания, представляющие собой нелинейные нагрузки, сопротивление которых изменяется с течением времени. Они отличаются от прежних тем, что традиционный понижающий трансформатор и диод заменены на схему управления выпрямлением поступающего из сети тока.

Преимуществом такой схемы - для производителя оборудования - является значительное снижение размеров, стоимости и массы. Источник питания может изготавливаться практически любого формфактора. Недостатком - является то, что кроме преобразования переменного тока сети в выпрямленный ток, источник питания создает импульсы тока, содержащие большое количество гармоник третьего и более высокого порядков и значительные высокочастотные составляющие. Эти токи по сути являются несинусоидальным периодическим сигналом, который можно представить в виде суммы постоянной величины и бесконечного ряда синусоидальных сигналов с кратными частотами. На рисунке 1 кривая тока, потребляемого импульсным источником, разложена в гармонический ряд. Очень хорошо видно, что третья гармоника исследуемого тока по величине составляет больше 80% от величины основной гармоники частотой 50 Гц. [1]

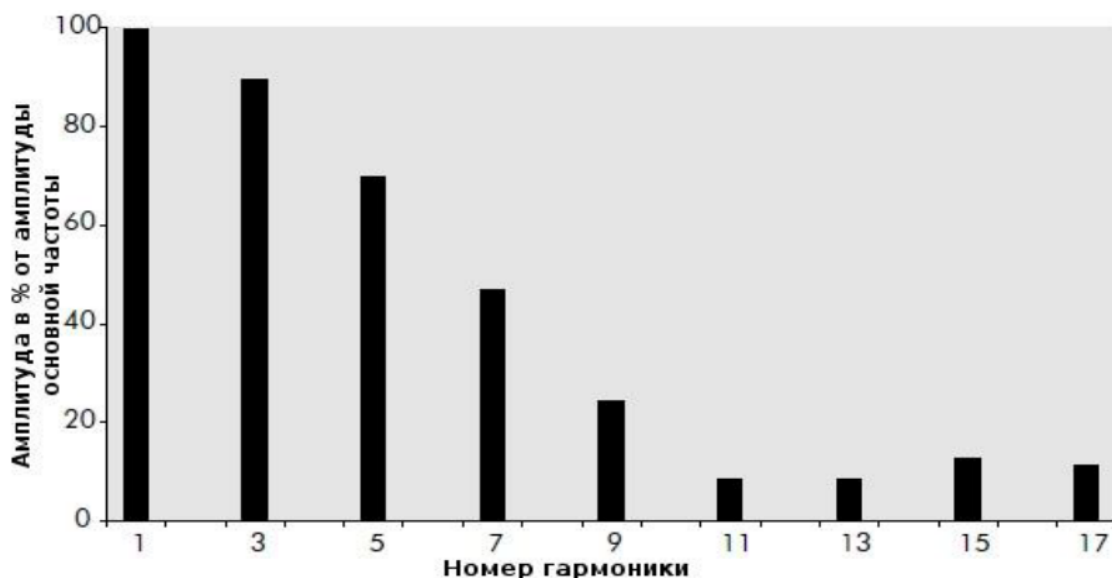


Рисунок 1 – Гармонический ряд кривой тока, потребляемого импульсным источником

Наличие гармоник высшего порядка могут приводить к различным последствиям. Гармонические токи вызывают дополнительные тепловые выделения в трансформаторах, кабельных линиях и других компонентах электроэнергетической сети. Данное явление, вызванное тем, что гармонические токи создают дополнительные потери, пропорциональные квадрату частоты самой гармоники. На рисунке 2 можно просмотреть процесс появления токов в нейтральном проводе трансформатора, где будет видна данная закономерность.

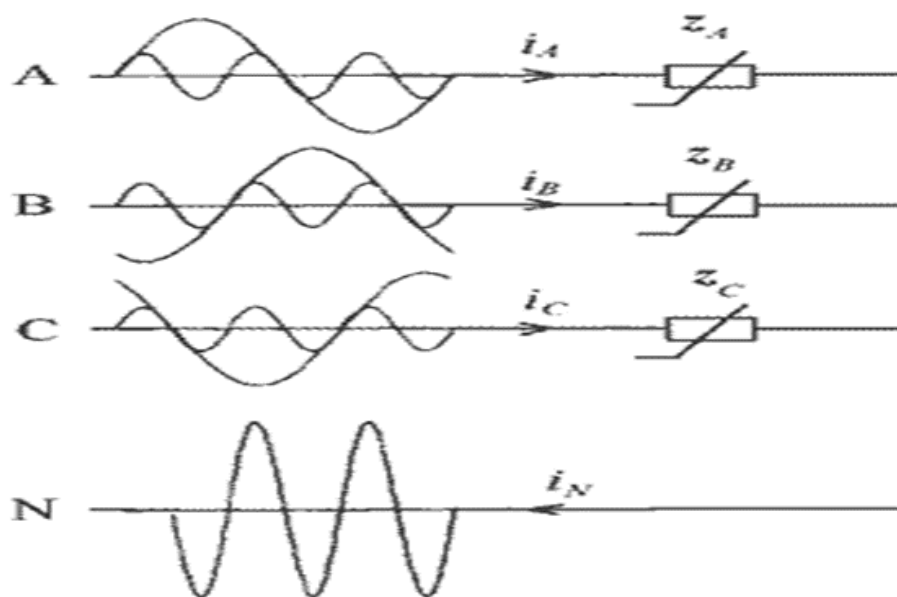


Рисунок 2 – Появление токов в нейтральном проводе трансформатора.

Ещё можно подчеркнуть, что высшие гармоники увеличивают активные потери в сети, что приводит к снижению общего коэффициента полезного действия. Данное явление происходит из-за дополнительных потерь мощности в резистивных и индуктивных элементах электрической сети, а также из-за повышения потерь в используемых ферромагнитных материалах.

Гармоники высшего порядка так же могут вызывать резонанс в сети, что приводит к значительному увеличению напряжения или тока в определенных точках. Резонансные явления могут привести к повреждению оборудования и изоляции, а также к нарушению работы защитных устройств.

Стоит обратить внимание и на обратное воздействие на источники питания, такие как генераторы и трансформаторы, питающие потребителей низковольтных сетей. Гармонические искажения могут приводить к деформации формы напряжения на выходе данных источниках питания сети. Это будет способствовать снижению показателей качества электроэнергии таких как: установившееся отклонение напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, коэффициент несимметрии напряжений по



обратной последовательности, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, отклонение частоты, размах изменения напряжения.

## 1.2 Аналитический обзор по теме

Исследовав и проанализировав различные источники информации уже можно найти зафиксированные результаты опытов по исследуемой теме. Основным методом для сбора и анализа информации использовался метод анализа электроэнергетических документов, диссертаций, научных статей, материалов научных конференций и сборников.

Статья «Modeling of nonlinear electrical loads of low-voltage distribution electrical networks», A. Kolovsky, Platonova E., Toropov A.S., Shcherbachevich V. [2]

В данной работе было проведено компьютерное моделирование части распределительной электрической сети, включающей нелинейную и несимметричную коммунально-бытовую и офисную нагрузку значительной мощности, используя программу базу SimInTech. На основе разработанной модели было исследовано влияние нелинейных однофазных потребителей (таких как компьютеры, принтеры, телевизоры, СВЧ-печи и т.д.) на искажение форм токов и напряжений в сети, а также на появление тока в нейтрали трансформатора.

Была показана зависимость величин высших гармоник токов в фазах и нейтрали трансформатора от суммарной мощности нелинейных потребителей, их доли в общей нагрузке питающей подстанции и распределения нагрузки по фидерам подстанции. Для снижения уровней гармонических составляющих токов предложено использовать узкополосные пассивные фильтры высших гармоник. Также проведено моделирование совместной работы однофазной нелинейной нагрузки и четырехзвенного фильтрокомпенсирующего устройства, включающего фильтры, настроенные на частоты третьей, пятой, седьмой и девятой гармоник.

По результатам анализа (в том числе и по внешнему виду осциллограмм) можно сделать вывод, что применение узкополосного фильтра помогло скомпенсировать гармоники третьего, пятого, седьмого и девятого порядка на высокой и низкой стороне трансформаторной подстанции, что обеспечивает трансформатору нормальный режим работы и, соответственно, обеспечивает качество электроэнергии по критерию несинусоидальности в сети 10 кВ. Амплитудное значение тока в нулевом проводе при этом уменьшилось в значительное количество раз. Результаты показали, что при подключении этих фильтров ток в нейтрали практически исчезает, а коэффициенты искажения кривых фазных токов и напряжений в сети минимальны.

Статья «Влияние нелинейной нагрузки на качество электроэнергии». Авторы: И.Б. Наумкин, И.Н. Паскарь, В.М. Завьялов. [3]

В статье рассматривается влияние электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой на качество электроэнергии. Обсуждаются негативные последствия наличия нелинейной нагрузки в электрической сети и влияние высших гармонических составляющих на параметры качества электроэнергии. Проведен анализ современных методов управления параметрами энергетических систем, направленных на уменьшение влияния нелинейных нагрузок на качество электрической энергии, в частности на искажение формы напряжения и тока. Определены наиболее перспективные направления для повышения качества электроэнергии. Выявлено отсутствие методик для определения уровня гармонических составляющих напряжения и тока в питающей сети.

Разработана математическая модель электрической сети в программном комплексе MATLAB для изучения влияния нелинейной нагрузки на качество электроэнергии в подводящих линиях. В промышленности значительная часть потребления электрической энергии приходится на вентиляционные, насосные и компрессорные установки, конвейеры, подъемные механизмы, а также электроприводы технологических установок и станков. Эти механизмы чаще всего работают на асинхронных электродвигателях переменного тока. Для управления режимами работы асинхронных электродвигателей и снижения их энергопотребления производители электротехнического оборудования предлагают использовать преобразователи частоты.

Однако из-за особенностей конструкции частотного преобразователя его выходное напряжение и ток имеют искаженную, несинусоидальную форму с большим количеством гармонических составляющих. Неуправляемый выпрямитель преобразователя частоты потребляет из сети нелинейный ток, тем самым загрязняет сеть электроснабжения высшими гармониками напряжения.

По принципу действия существующие способы подавления высших гармонических составляющих напряжений и токов можно разделить на следующие подгруппы:

- изменение топологии сети электроснабжения региона;
- использование пассивных фильтров в сетях;
- использование активных фильтров для защиты сетей электроснабжения;
- использование устройств с автоматической стабилизацией формы напряжения (тока);
- использование вольтодобавочных устройств;
- использование электромашинных установок;

Для исследования влияния нелинейной нагрузки на качество электроэнергии в подводящих линиях автором была разработана математическая модель системы в программном комплексе Matlab.

Используя данную модель, возможно провести ряд опытов с изменением длины, марки, сечения кабеля, а также влияние этих параметров на качество электроэнергии.

После проведения серии опытов, автором планируется:

- 1) Усложнить модель, и включить вместо диодного моста частотный преобразователь, а на место нагрузки подключить асинхронный двигатель.
- 2) Собрать реальную электрическую цепь с аналогичными математической модели элементами и соответствующими характеристиками.
- 3) Разработка алгоритма, и определение методов и инструментов для оценки качества электроэнергии
- 4) Разработка методики выбора кабеля при работе на нагрузку с выпрямителем и емкостью в звене постоянного тока
- 5) Разработка методики улучшения параметров качества электроэнергии при использовании нелинейной нагрузки, такой как частотные преобразователи и асинхронные двигатели.

Статья «Исследование качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейными нагрузками». Авторы: Д.А. Кузьмин, В.Я. Горячев. [4]

В данной работе было изучено влияние нагрузки на гармонический состав тока и напряжения в основной сети электроснабжения. Выявлены источники, которые вызывают искажение кривых тока и напряжения, и получены соответствующие гармонические спектры. В качестве программного обеспечения использовалась среда MATLAB.

С переходом организаций, занимающихся производством и распределением электрической энергии, на коммерческую основу становится актуальной проблема определения качества электрической энергии. Поскольку электрическая энергия является товаром, она имеет свои показатели качества.

Качество электрической энергии зависит не только от производителя, но и от параметров потребителей. Потребители с нелинейной характеристикой оказывают негативное влияние на качество электрической энергии. Нелинейность нагрузки приводит к возникновению гармонических искажений напряжения в сети. Это означает искажение формы и, следовательно, гармонического состава напряжения не только на зажимах потребителя, но и по всей сети электроснабжения.

В данной статье можно наблюдать графики гармонических составов напряжения в тяжелом режиме работы сети и приближенные значения к реальным.

В энергосистемах, работающих на нагрузку с нелинейной характеристикой, возникают гармонические составляющие, превышающие нормативные значения по ГОСТ 13109-97 в несколько раз. [5]

В статье на примере работы мощных электровозов железнодорожного транспорта, в которых для работы двигателей используется мостовая схема

выпрямления, исследуется проблема низкого качества электрической энергии в других точках единой системы электроснабжения. Высокочастотные гармоники, возникающие в сети, распространяются по ней и могут вызывать аварийные перенапряжения.

Поэтому в электроэнергетических системах необходимо предусматривать устройство, способствующее снижению гармонических составляющих напряжения (тока).

Статья «Особенности работы трехфазных систем электроснабжения 0,4 кВ в условиях нелинейной нагрузки». Авторы: Д.Н. Моргунов, Е.В. Дорбрынин, О.Н. Козменков, А.М. Батищев. [6]

В данной статье говорится о том, что внедрение в системы как общего, так и специального назначения приводит к большему использованию источников питания импульсного напряжения, которые в свою очередь создают нелинейную нагрузку. Новейшие технологии энергоэффективность конечных электроприемников. Но, это имеет влияние на работы систем электроснабжения, а именно – снижают качество питающего напряжения и тем самым создают дополнительные помехи и потери в питающих трансформаторах. В статье предоставлены результаты исследований отдельных показателей качества электроэнергии (несинусоидальность и несимметрия напряжения) и работы питающих трансформаторов и анализа зависимости данных показателей от нагрузки.

Исследования показали, что использование большого количества однофазных нагрузок с импульсными источниками питания ухудшает качество электроэнергии, даже если каждое отдельное устройство соответствует требованиям. Это приводит к дополнительным потерям в питающем трансформаторе и превышению допустимых значений несимметрии напряжения и гармоник высших частот, особенно по 3-й гармонике. В результате увеличиваются токи нулевой последовательности, потери в трансформаторе и его нагрев. Повышенные гармоники высоких частот угрожают нормальной работе систем СЦБ, а перегрев трансформаторов, особенно сухих, снижает их ресурс и повышает вероятность отказа в системе электроснабжения. Поэтому при проектировании или модернизации систем электроснабжения нетяговых потребителей нужно учитывать наличие нелинейной нагрузки и заранее предусматривать меры по снижению этих негативных последствий. Такими мерами могут быть установка фильтров гармоник, использование трансформаторов с соединением обмоток по схеме "треугольник", ограничение максимальной загрузки трансформаторов до 40-50%, и перевод потребителей с импульсными источниками питания на систему постоянного тока.

Статья «Анализ сверхнормативных потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ, имеющих нагрузку с преобладанием нелинейных потребителей». Авторы: М. Юдин, К. Юдин, Т. Пономаренко. [7]

В данной статье на основе экспериментов и полученных после данных, собранных в разные времена года на подстанциях с напряжением 6–10/0,4 кВ и мощностями силовых трансформаторов (СТ) от 250 до 400 кВА, с применением корреляционно-регрессионного анализа были получены математические модели для расчета дополнительных потерь мощности в силовых обмотках и магнитопроводе трансформатора. После полученных результатов было выявлено, что при недогрузке силовых трансформаторов и воздействии множества факторов большое влияние на дополнительные потери активной мощности оказывают среднесуточные значения коэффициента загрузки трансформатора, отклонения напряжения и коэффициент искажения синусоидальности кривой тока в нейтрали силового трансформатора.

Статья «Разработка имитационной модели для оптимизации режимов в трехфазных сетях с нелинейной нагрузкой», автором которой является С.Ю. Гунько. [8]

При рассмотрении материалов для данного исследования были выявлено, что важными аспектами в электрических системах являются несимметрия и несинусоидальность токов и напряжений, а также уровни реактивной мощности. Предельные значения несинусоидальности регламентируются нормативными документами, однако на практике контроль этих значений осуществляется недостаточно. Бурное развитие силовой полупроводниковой техники открыло новые возможности для улучшения параметров электрической энергии, влияющих на ее качество. Аппаратные и программные средства вычислительной техники позволяют совершенствовать методы анализа и синтеза устройств для симметрирования, компенсации реактивной мощности и борьбы с высшими гармониками в системах электроснабжения. Широкий ассортимент микроконтроллеров, появившихся в последнее десятилетие, предоставляет возможности для создания сложных систем управления, которые повышают качество электроэнергии в системах электроснабжения и электропотребления.

Исходя из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что использование поисковой оптимизации позволяет с высокой точностью выполнять симметрирование трехфазных трехпроводных и четырехпроводных систем. Этот метод решает не только задачу анализа, но и синтез симметро-компенсирующих устройств. Поисковая оптимизация показала высокую точность при расчете управляющих импульсов для силового активного фильтра, оптимизируя работу системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой.

Таким образом, разработка новых методов анализа электромагнитных процессов и синтеза устройств для симметрирования и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения является актуальной задачей. Перспективными являются методы, основанные на применении компьютерных моделей и оптимизационных методов, что позволяет ставить задачи в общем виде и решать их с высокой точностью.

Статья «Экспериментальные исследования несинусоидальности токов и напряжений в сети 0,38кВ». Авторы: М.А. Юдин, С.В. Нехаев. [9]

В данной статье говорится о том, что в сельских электросетях России наблюдается увеличение бытовых нагрузок на фоне резкого снижения производственных мощностей. Использование высокотехнологичного оборудования с нелинейными вольтамперными характеристиками вызывает рост высших гармоник в низковольтной сети. Практические исследования, проведенные в сетях напряжением 0,38 кВ Краснодарского края, наглядно показывают, что отдельные показатели качества электроэнергии (ПКЭ), в частности, несинусоидальность напряжения, не соответствуют нормативным требованиям. Циркуляция высших гармоник в сети приводит к значительным материальным и техническим ущербам.

В ходе проведенных экспериментов результаты показали, что спектральный состав тока небаланса на головном участке остается довольно стабильным, хотя коэффициент искажения синусоидальности кривой тока небаланса динамично изменяется в течение суток, коррелируя с графиком нагрузки. Более половины общего спектра высших гармонических токов небаланса составляет 3-я гармоника, а около пятой части – 5-я гармоника.

Статья «Перспективы применения активных фильтров гармоник в распределительных сетях низкого напряжения». Авторы: А.И. Орлов, Д.В. Бортник. [10]

В данной статье говорится о том, что развитие и широкое распространение устройств силовой и микроэлектроники, современных осветительных приборов и других потребителей электроэнергии с нелинейными вольтамперными характеристиками приводят к ухудшению качества электроэнергии, особенно в электрических сетях напряжением 0,4 кВ. Хотя существует ряд методов решения проблем качества электроэнергии, результаты измерений показывают, что эти проблемы остаются актуальными. В данной работе оценивается один из перспективных методов минимизации проблем качества электроэнергии — использование параллельных активных фильтров гармоник в распределительных сетях низкого напряжения. Методы исследования включали анализ экспериментально полученных осциллограмм потребителей электроэнергии и численное компьютерное моделирование низковольтной распределительной сети с нелинейными нагрузками и различными типами фильтров компенсирующих устройств. Теоретическая электротехника и методики обработки статистических данных служили методологической основой исследования.

В ходе данной работы выполнен анализ влияния типичных коммунально-бытовых потребителей на показатели качества электроэнергии. На основе результатов компьютерного моделирования проведен сравнительный анализ способов повышения качества электроэнергии в низковольтных распределительных сетях с технико-экономической точки зрения. Оценена перспектива применения параллельных активных фильтров гармоник в данных условиях. Установлено, что использование параллельных

активных фильтров гармоник на вводах в здания является перспективным методом решения проблем низкого качества электроэнергии.

Статья «О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях», автором которой является А.Г. Арутюнян. [11]

В данной работе автором рассматривается вопрос о потерях активной мощности в сетях напряжением 0,23–0,24 кВ при несимметричной нагрузке. Проблема актуальна, так как в быту все больше потребителей используют устройства с нелинейной вольтамперной характеристикой. Потери электроэнергии включены в тариф на её передачу, поэтому их точное определение важно для распределительных сетевых компаний. Предлагается методика определения дополнительных потерь активной мощности в трёхфазных четырёхпроводных электрических сетях 0,4/0,23 кВ при искажении и несимметрии фазных токов и напряжений. В текущей методике эти потери определяются с помощью формулы, которая не учитывает потери в фазных и нулевом проводах при искажении кривых фазных напряжений и токов. Новый метод позволяет с высокой точностью определить потери в любых режимах трёхфазных электрических сетей 0,4/0,23 кВ. Это повысит точность оценки дополнительных потерь активной мощности в городских электрических сетях.

Статья «The problem of heating power transformers when working with a non-linear load», Toropov, A., Platonova, E., Chistyakov, G., Kolovsky, A., Malikova, A. [12]

В данной работе была показана взаимосвязь между нагревом силовых трансформаторов и нелинейным искажением кривой тока, вызванным нелинейными электрическими нагрузками. Нагрев происходит из-за высших гармоник электрического тока, протекающего через трансформатор. Обоснована необходимость решения проблемы нагрева трансформаторов при наличии значительной доли нелинейных потребителей электроэнергии в их нагрузке. Представлены результаты анализа искажений синусоидальности напряжения и тока трансформаторов с преобладанием нелинейной нагрузки, выявившие, что коэффициенты гармоник превышают допустимые стандартами значения, при этом третья гармоника имеет самый высокий процент в спектре.

В конечном итоге выполнено моделирование электрической сети с трансформатором и нелинейной нагрузкой в среде MATLAB, результаты которого показали значительное снижение коэффициента гармоник тока после установки пассивного фильтра, рассчитанного на третью гармонику. Анализ других методов снижения температуры трансформатора под воздействием высших гармоник тока показал, что для рассматриваемых подстанций наиболее эффективным способом является установка дополнительного трансформатора для снижения нагрузки.

Опираясь на результаты проведенных исследований можно сделать вывод о том, что исследование влияния нелинейных нагрузок, представленных различными видами потребителей, является важной и

актуальной темой нашего времени. Нелинейная нагрузка может нести за собой различные проблемы, которые будут приводить к различным сбоям и авариям в сети различного напряжения, в частности в сети низкого питающего напряжения. Поэтому стоит рассматривать различные методы борьбы с гармониками различных порядков, которые и являются источниками проблем и находить оптимальные пути их уменьшения и устранения.

### **1.3 Программное обеспечение для моделирования нелинейной нагрузки**

В данном разделе представлены различные программные обеспечения, которые помогут представить и построить схемы сетей низкого напряжения, схемы моделирования различных устройств по борьбе с данной нагрузкой и рассмотрением параметров данной сети.

В целом, программное обеспечение (ПО) — это набор программ, которые нужны для работы компьютера. Под ПО понимают операционные системы, текстовые редакторы, браузеры и другие программы для выполнения различных задач.

Программное обеспечение предназначено для управления электронными и механическими компонентами компьютера. ПО является гибкой системой, которую можно совершенствовать. Программные продукты, работающие с информацией, превращают аппаратную часть ПК в комплекс, способный решать самые разнообразные задачи.

В данном разделе представлены современные и популярные программные обеспечения, которые способны обеспечить оптимальную разработку схем для экспериментов требуемой низковольтной сети.

«SimInTech» – среда динамического моделирования систем, в частности схем электроснабжения, предназначенная для расчётной работы различных систем управления сложными техническими объектами и элементами.

Можно выделить основные направления использования среды «SimInTech»:

- 1) создание различных моделей;
- 2) проектирование алгоритмов управления;
- 3) отладка алгоритмов и систем на модели объекта;
- 4) генерация исходного кода на языке СИ для программируемых контроллеров.

Назначение данной программы. «SimInTech» предназначен для детального исследования и анализа нестационарных процессов в:

- 1) ядерных и тепловых электроустановках;
- 2) системах автоматического управления;
- 3) следящих приводах и роботах;
- 4) системах электроснабжения;



- 5) любых технических системах, описание которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений или реализовано методами структурного моделирования.

Среда «SimInTech» имеет свой ряд преимуществ:

- 1) прозрачность блоков;
- 2) скорость расчета, более новое и современное ядро;
- 3) мультидисциплинарность;
- 4) применение шага моделирования;
- 5) генерация C-кода;
- 6) возможность программирования как импортных, так и отечественный микропроцессоров;
- 7) модуль переноса блоков.

«MatLab» – высокоуровневый интерпретированный язык программирования с установленным пакетом прикладных программ и интегрированной средой для разработки и выполнения инженерных и математических расчетов, работы с матричными базами данных, визуализации различных систем.

Основные направления использования среды «MatLab»:

- 1) программирование и разработка различных алгоритмов;
- 2) визуализация данных в качестве двух-трехмерных графиков;
- 3) математические вычисления разных уровней сложности;
- 4) информационный анализ рассматриваемых объектов.

Основным назначением программного обеспечения «MatLab» является визуализация разносторонних научных исследований и проведение множества инженерных работ.

Программа «MatLab» так же имеет свой ряд преимуществ:

- 1) простота восприятия и использования математического языка описания;
- 2) удобный набор инструментов;
- 3) среда рабочего интерфейса настроена для итеративного проектирования и научных исследований;
- 4) «MatLab» интегрирует рабочие процессы;
- 5) оптимизация библиотечных вызовов;
- 6) полнота коллекции алгоритмов;
- 7) визуализация обратной связи.

«MathCad» - одна из самых мощных и эффективных математических вычислительных систем, предназначенная для широкого круга пользователей. Она позволяет выполнять математические расчеты как в числовом, так и в символьном формате, используя привычные математические формулы и знаки. При этом решение поставленных задач задается с помощью привычных математических выражений и числовых знаков.

Основной функционал работы системы «MathCad»:

- 1) вычисление арифметических выражений разной сложности, дифференциальных уравнений, обработка матриц и т.д.;
- 2) построение графических функций;
- 3) функции программирования;
- 4) интерактивные сервисные функции.

Достоинства программы «MathCad»:

- 1) использование естественного математического языка;
- 2) примитивность;
- 3) диагностика ошибок;
- 4) быстрая и точная система вычислений;
- 5) реализация большого основного круга стандартных функций математических вычислений;
- 6) возможность работы с комплексными числами;
- 7) возможность смольных математических вычислений.

Существует еще множество других программ для вычислений и решения нужных систем. В данном разделе представлены основные программы, которые используются студентами при обучении в данном ВУЗе. Выделив основные плюсы достоинства программ, можно сделать вывод о том, что среда динамического моделирования систем «SimInTech» является самой оптимальной для достижения требуемых целей данной выпускной квалификационной работы. Среда «SimInTech» удобна и примитивна, и имеет дополнительный ряд преимуществ, таких как: прозрачность и понятность блоков, общестандартные обозначения элементов, прямая наглядность построения необходимых схем, быстрота вычислений, возможность ручного программирования при необходимости и т.д. Так же главным плюсом можно выделить то, что данная программа имеет специальную бесплатную лицензию для студентов, которая дает более обширную библиотеку блоков, что позволят получить больше возможностей от программы при построении и анализе необходимой области исследования.

## **2 Практическая часть**

### **2.1 Разработка моделей нелинейной нагрузки**

Для исследования данной темы была построена наглядная модель нелинейной нагрузки на базе среды «SimInTech». Данная модель представлена на рисунке 2. Данная модель разработана в программе как субмодель, которая включает в себя трансформатор однофазный, диодный выпрямитель, в виде мостовой схемы, сглаживающий фильтр, представленный конденсатором, нагрузка, представленная активным сопротивлением. Эта субмодель будет в дальнейшем использоваться при моделировании и анализе участка сети с нелинейной нагрузкой.

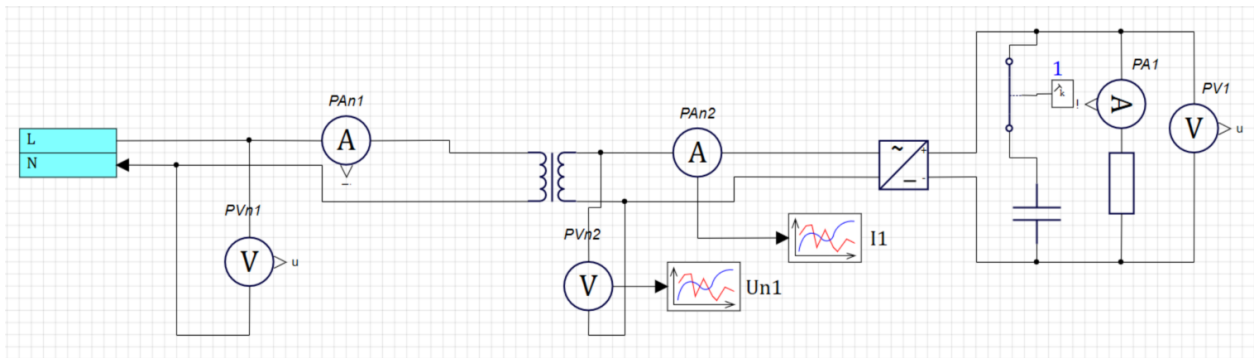


Рисунок 2 – Модель нелинейной нагрузки (субмодель)

Для удобства дальнейшего использования, субмодель отредактирована как пользовательский блок со следующими свойствами:

- номинальное выпрямленное напряжение,  $U_{dn}$ ;
- номинальный выпрямленный ток,  $I_{dn}$ ;
- коэффициент пульсации,  $K_p$ ;
- первичное напряжение трансформатора,  $U_1$ .

На основании этих данных в скрипте субмодели рассчитываются остальные параметры элементов модели (трансформатор однофазный, диодный мостовой выпрямитель, емкость сглаживающего конденсатора, сопротивление нагрузки выпрямленной цепи). Текст скрипта «Нелинейная нагрузка» представлен в приложении А. Расчеты ведутся для частоты питающего напряжения 50 Гц.

Ниже приведена методика расчета параметров элементов субмодели.

#### 1. Трансформатор однофазный.

Для более точного получения данных трансформатора использовалась методика расчета из «Расчет и моделирование выпрямителей», авторами которого являются П.А. Борисов и В.С. Томасов. [13]

При расчете параметров трансформатора приняты следующие значения промежуточных параметров:

- амплитуда магнитной индукции  $B_m = 1$  Тл,
- число стержней трансформатора  $s = 1$ ,
- коэффициент, число чередующихся секций обмоток  $p = 2$  (первичная обмотка наматывается между половинами вторичной обмотки (или наоборот)).

Сопротивление  $r_{тр}$  и индуктивность  $L_{тр}$  трансформатора рассчитываются по формулам 1 и 2 соответственно.

$$r_{тр} = K_r \frac{U_{dn}}{I_{dn} f B_m} \sqrt[4]{\frac{s f B_m}{I_{dn} U_{dn}}}, \quad (1)$$

где  $K_r$  – коэффициент, зависящий от типа схемы выпрямителя. Для мостового однофазного выпрямителя  $K_r = 3.5$ .

$$L_{\text{тр}} = K_L \frac{sU_{\text{дн}}}{(p-1)^2 I_{\text{дн}} f B_m} \sqrt{\frac{I_{\text{дн}} U_{\text{дн}}}{s f B_m}} \quad , \quad (2)$$

где  $K_L$  – коэффициент, зависящий от типа схемы выпрямителя. Для мостового однофазного выпрямителя  $K_L = 5 \cdot 10^{-3}$ .

Напряжение вторичной обмотки определяется по формуле 3 в зависимости от номинального выпрямленного напряжения, необходимого коэффициента пульсации, учета потерь напряжения в трансформаторе и порога выпрямления диода.

$$U_{2\text{н}} = \frac{U_{\text{дн}}(1+K_p)}{\sqrt{2}} + I_{\text{дн}} \sqrt{r_{\text{тр}}^2 + 2\pi f L_{\text{тр}}^2} + U_{\text{порVD}} \quad , \quad (3)$$

Номинальная мощность трансформатора рассчитывается с учетом коэффициента загрузки трансформатора равного 0.813 для однофазной мостовой схемы.

Окно с настройками блока «Трансформатор однофазный» представлено на рисунке 3.

Название	Имя	Формула	Значение ▲
<b>Номинальные данные</b>			
Ток холостого хода, %	I0x		1
Номинальная мощность, кВА	Snom	St/1e3	1.2300123
Номинальное напряжение обмотки НН, В	Unomlv	U2n	10.600257
Номинальное напряжение обмотки ВН, В	Unomhv	U1	220
Номинальная частота, Гц	fnom	f	50
<b>Схема замещения</b>			
Сопrotивление обмотки ВН [Xh, Rh], о.е.	Zhpu	[X/2, r/2]	[0.00012156371, 6.0567...
Сопrotивление обмотки ВН [Xl, Rl], о.е.	Zlpu	[X/2, r/2]	[0.00012156371, 6.0567...
Сопrotивление ветви намагничивания [Xm, Rm], о.е.	Z0pu		[9.9938337, 245.9984]
<b>Характеристика холостого хода</b>			
<b>Расчет параметров схемы замещения</b>			
Рассчитать параметры схемы замещения	calculate		0
Записать расчетные параметры в свойства	write_c		0
Потери короткого замыкания, кВт	Pk	0.1e-3	0.0001
Соотношение сопротивлений обмоток	Hv_Lv	0.5	0.5
Напряжение короткого замыкания, %	Uk	3	3
Потери холостого хода, кВт	Px	0.05e-3	5E-5
Сопrotивление обмотки ВН [Xh, Rh], о.е.	Zhpu_c		[0.01443869, 0.004065]
Сопrotивление обмотки ВН [Xl, Rl], о.е.	Zlpu_c		[0.01443869, 0.004065]
Сопrotивление ветви намагничивания [Xm, Rm], о.е.	Z0pu_c		[9.9938337, 245.9984]

Рисунок 3 – Параметры трансформатора

## 2. Диодный выпрямитель.

В первом приближении можно воспользоваться представлением ВАХ диода идеальным ключом ( $U_{\text{порVD}} = 0$ ,  $R_{\text{VD}} = 10^{-5}$  Ом).

3. Нагрузка представлена активным сопротивлением, рассчитываемым по формуле 4.

$$R_n = \frac{U_{dn}}{I_{dn}}, \quad (4)$$

4. Сглаживающий фильтр, представленный емкостью рассчитывается по формуле 5.

$$C = \frac{q}{p\pi f (R_n + r_{тр}) K_{p,вх}}, \quad (5)$$

где  $q$  - коэффициентом сглаживания пульсаций,  
 $p$  – пульсность схемы (для однофазной мостовой схемы  $p = 2$ ),  
 $K_{p,вх}$  – коэффициент пульсаций выпрямителя без фильтра (для однофазной мостовой схемы  $K_{p,вх} = \frac{2}{3}$ ).

Коэффициентом сглаживания пульсаций рассчитывается по формуле 6.

$$q = \frac{K_{p,вх}}{K_p}, \quad (6)$$

где  $K_p$  – желаемый коэффициент пульсаций.

Результаты моделирования нелинейной нагрузки мощностью 1кВт, выпрямленным напряжением 12В и коэффициентом пульсации выпрямленного напряжения 5% представлены на рисунках 4 - 9.

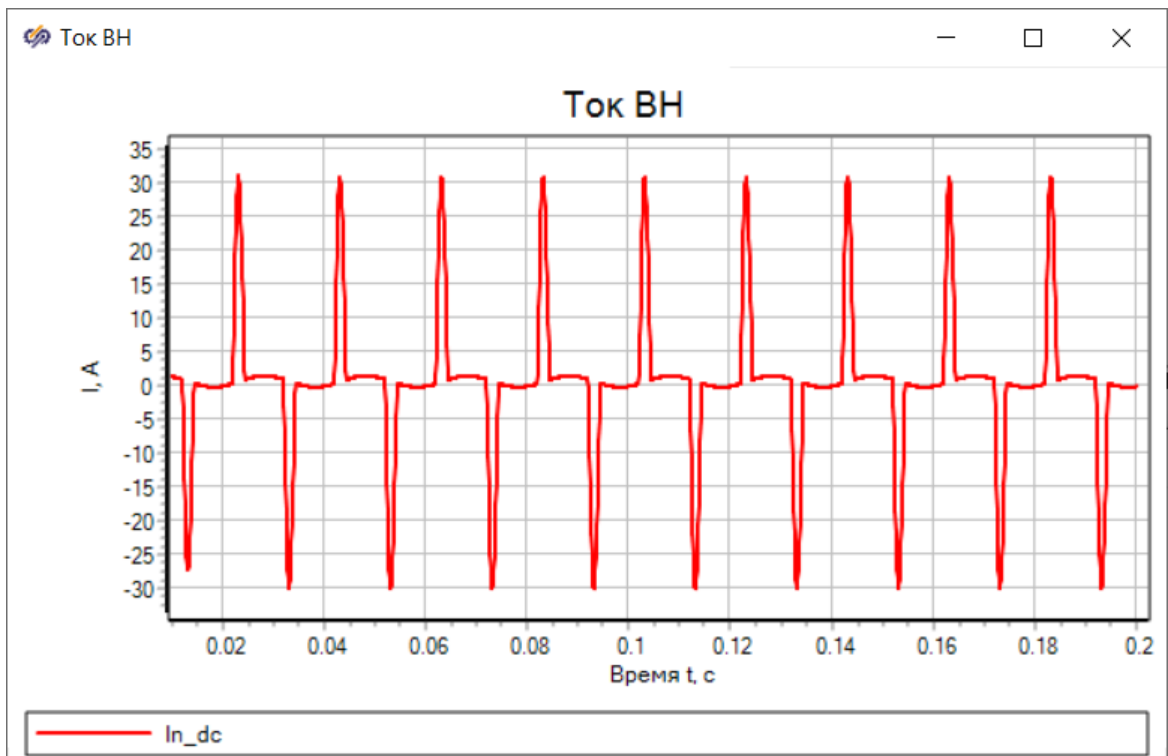


Рисунок 4 – Ток первичной обмотки

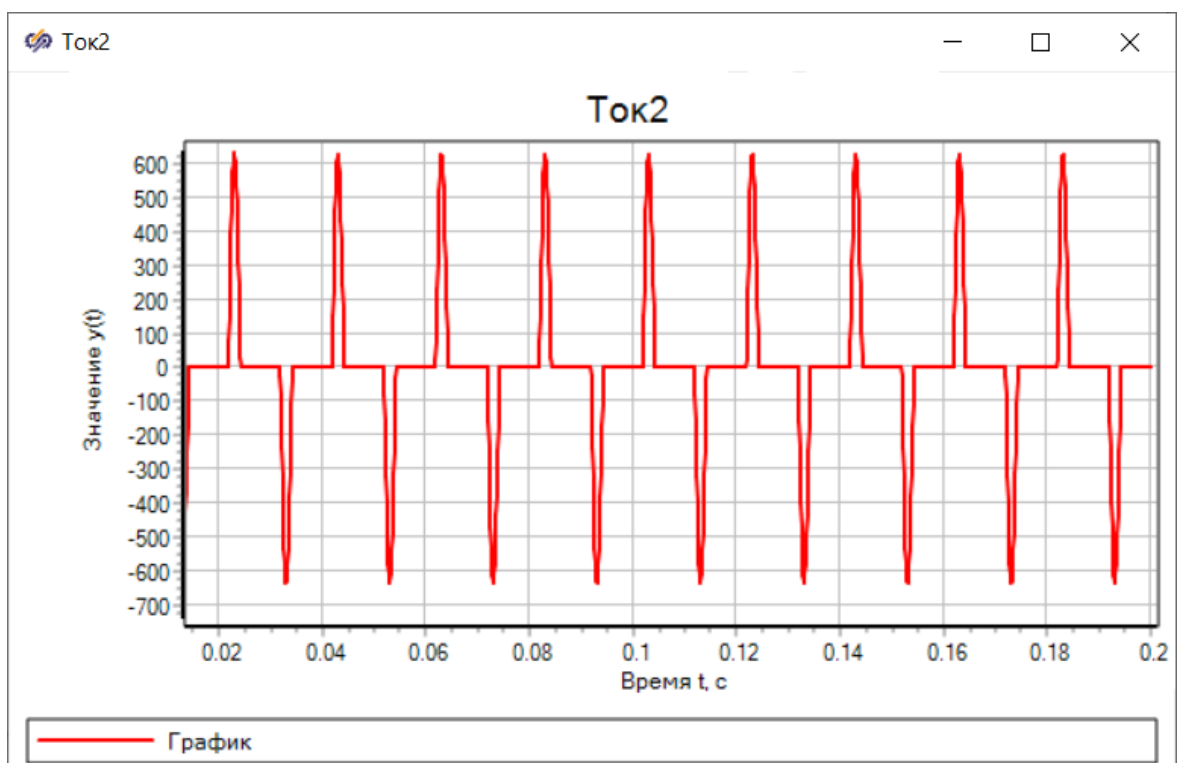


Рисунок 5 – Ток вторичной обмотки

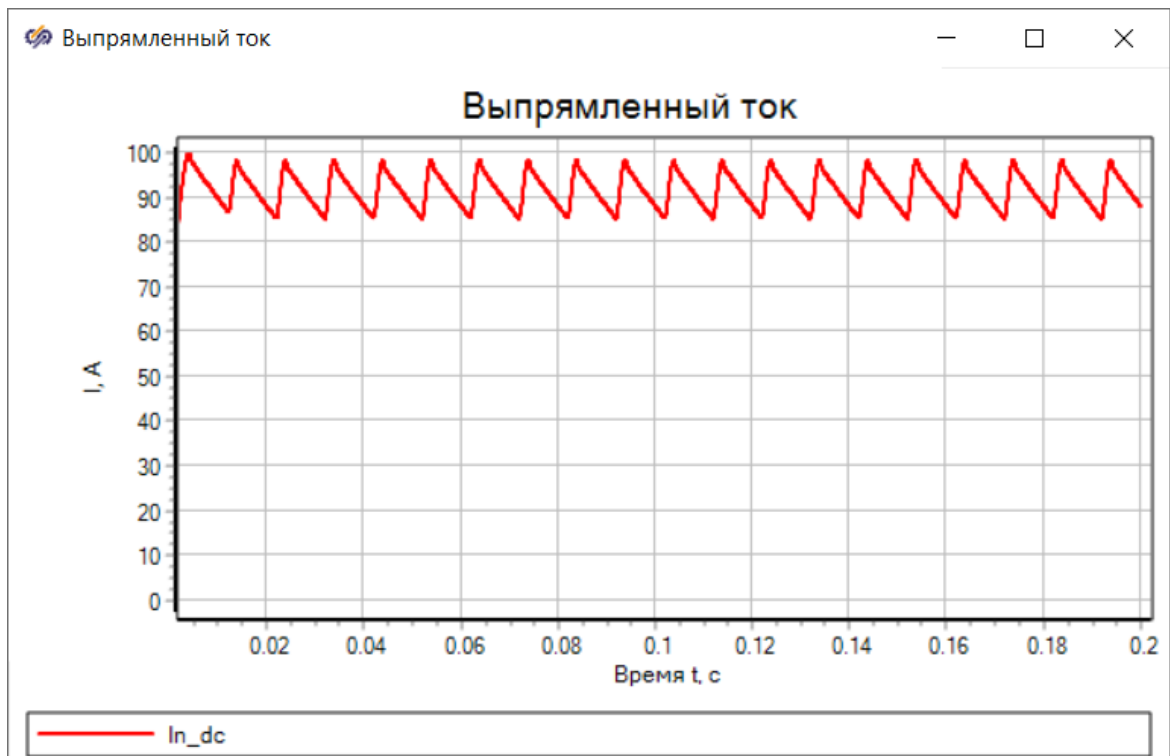


Рисунок 6 – Выпрямленный ток

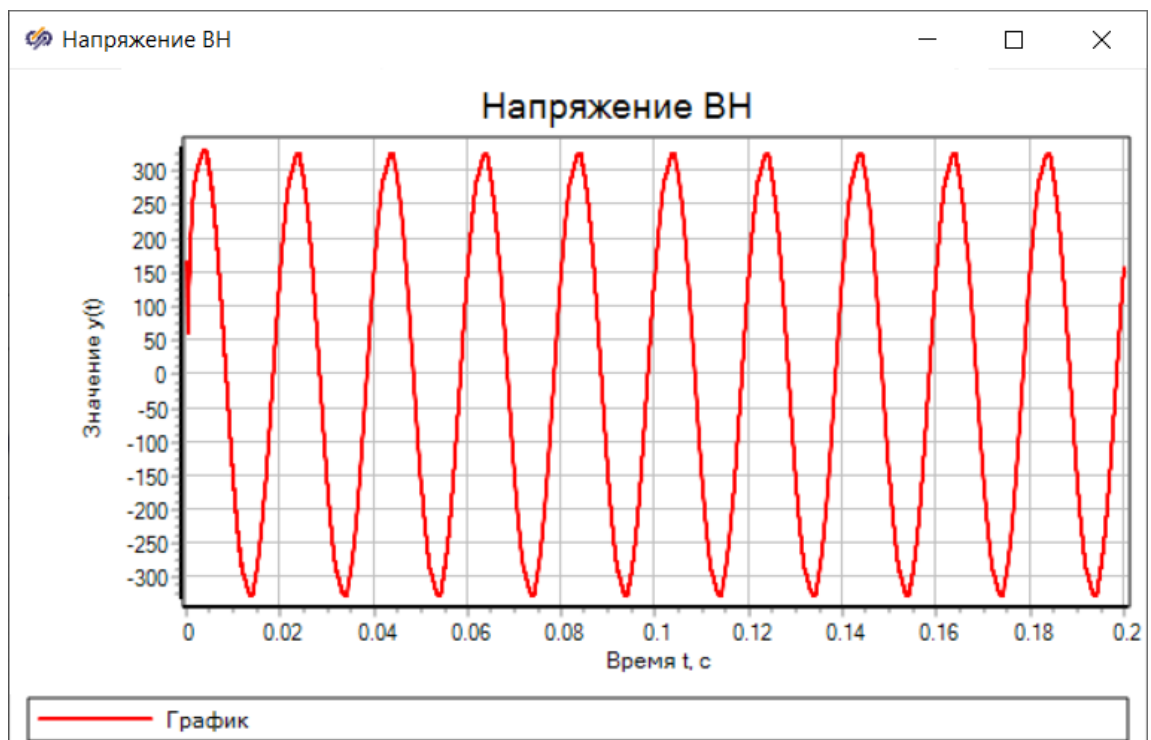


Рисунок 7 – Первичное напряжение

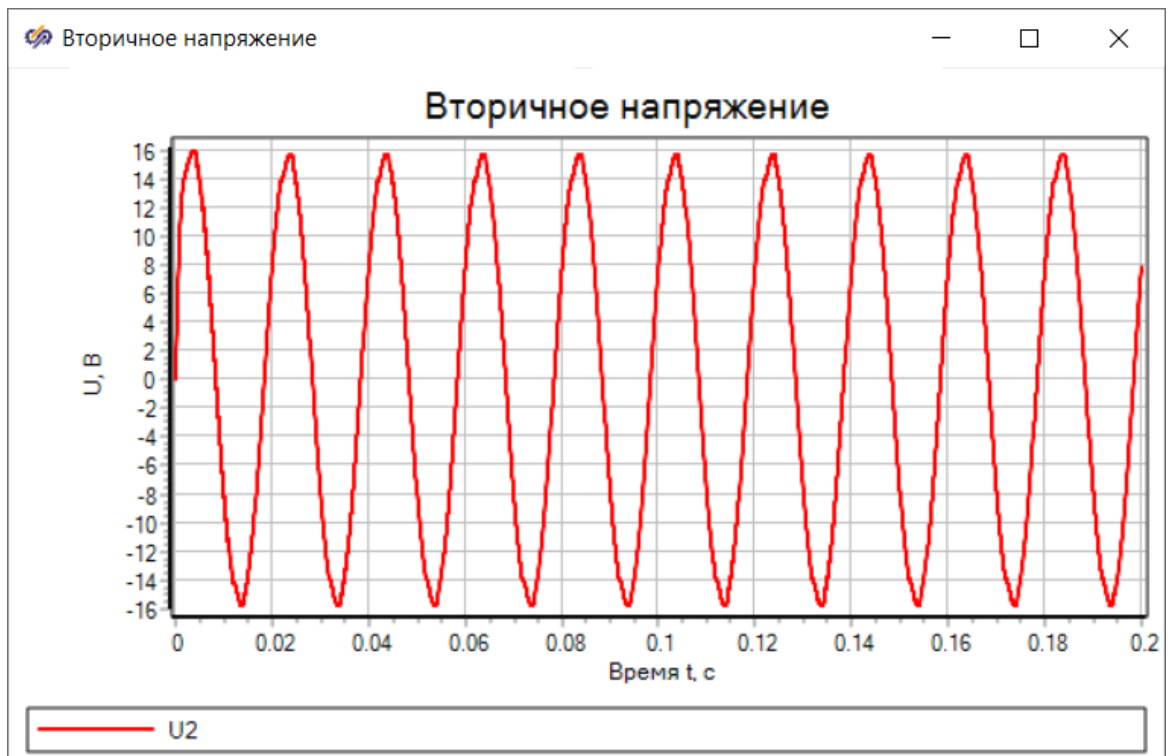


Рисунок 8 – Вторичное напряжение

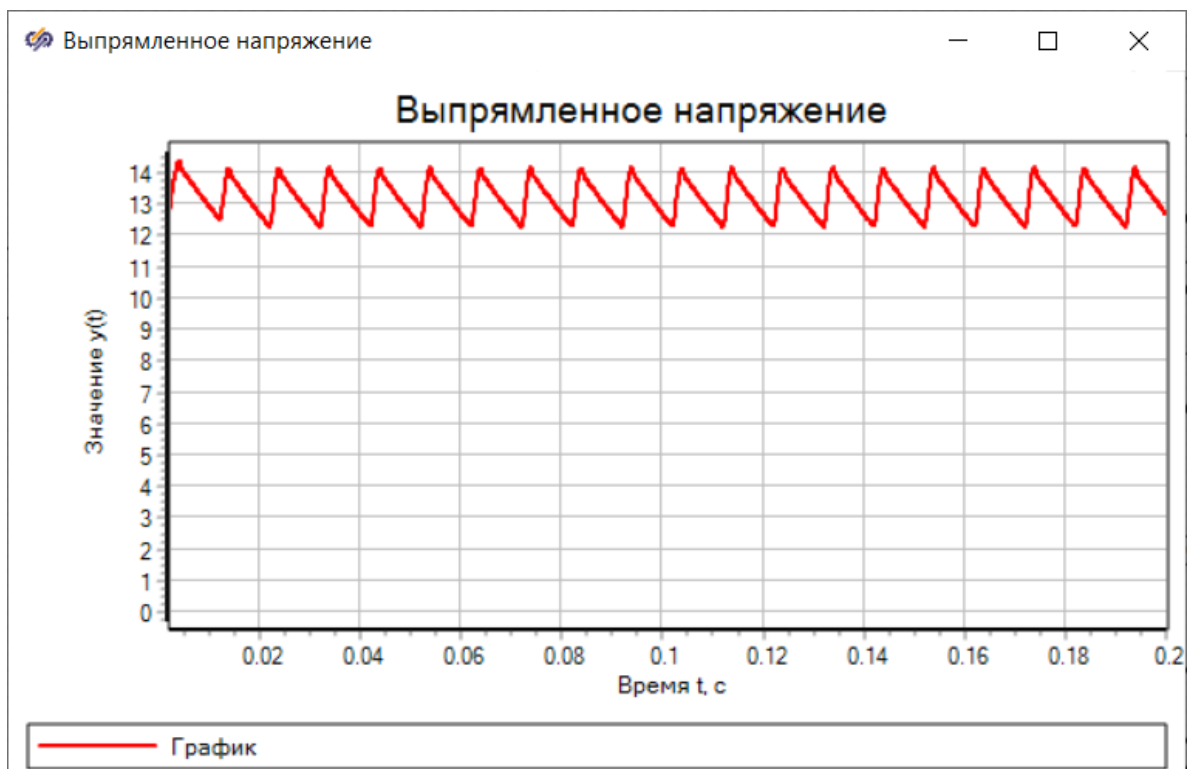


Рисунок 9 – Выпрямленное напряжение

Из представленных рисунков видно, что средние значения выпрямленного тока  $I_{dn} = 91.5$  А, средние значения выпрямленного напряжения  $U_{dn} = 13.2$  В. Мощность в цепи постоянного тока  $P = 1.21$  кВт, общая потребляемая мощность  $P = 1.40$  кВт.



Результаты моделирования нелинейной нагрузки мощностью 1кВт, выпрямленным напряжением 12В и коэффициентом пульсации выпрямленного напряжения 2% представлены на рисунках 10 - 15.

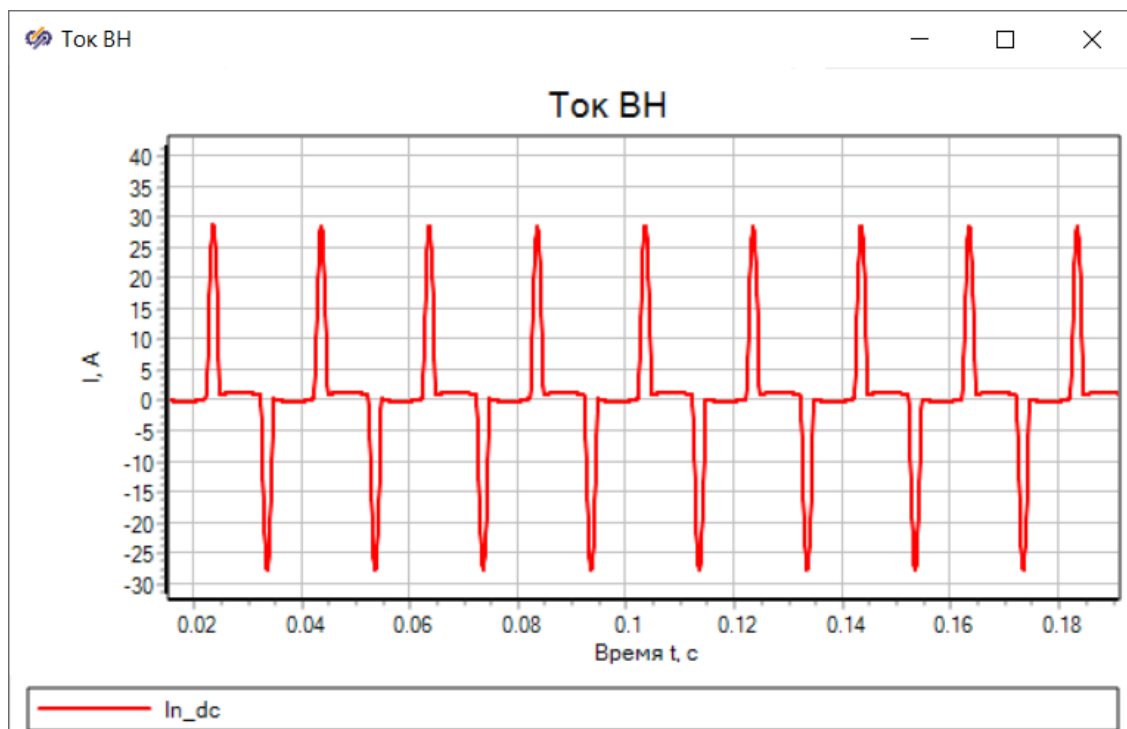


Рисунок 10 – Ток первичной обмотки

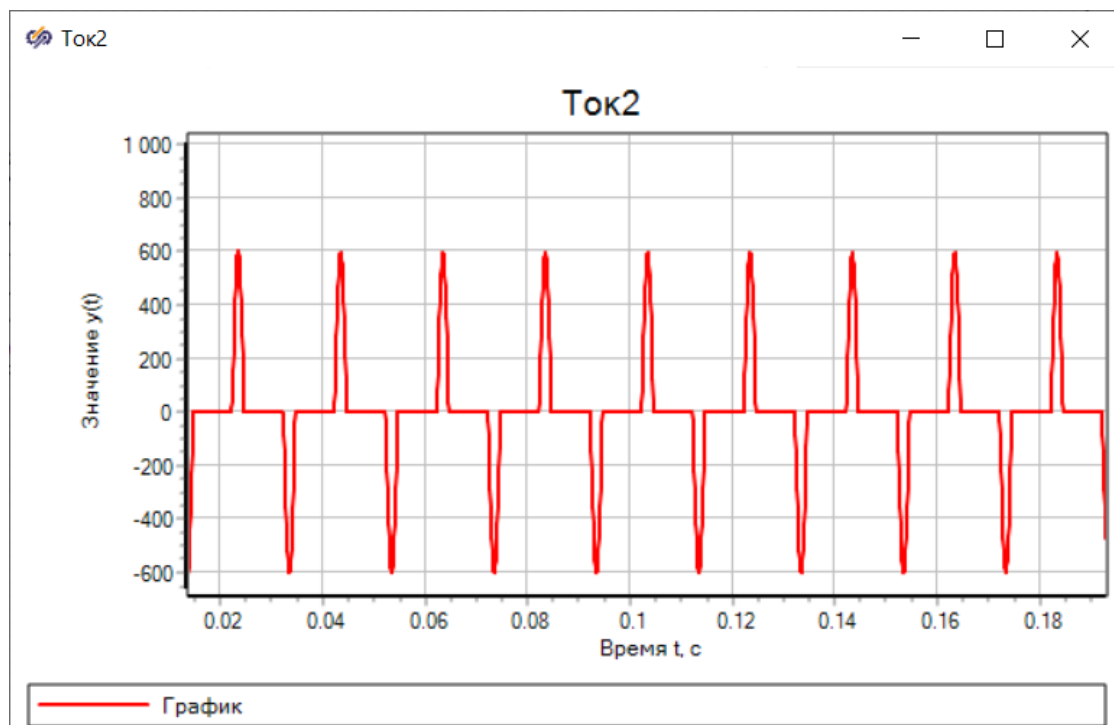


Рисунок 11 – Ток вторичной обмотки



Рисунок 12 – Выпрямленный ток

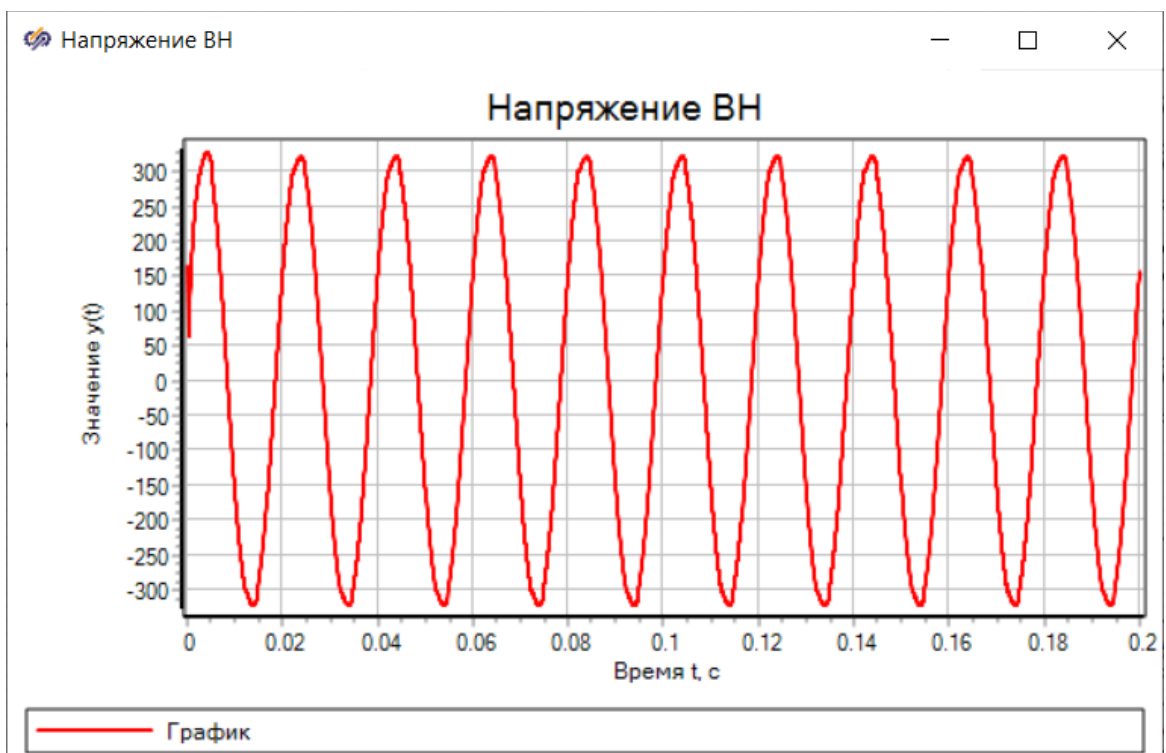


Рисунок 13 – Первичное напряжение

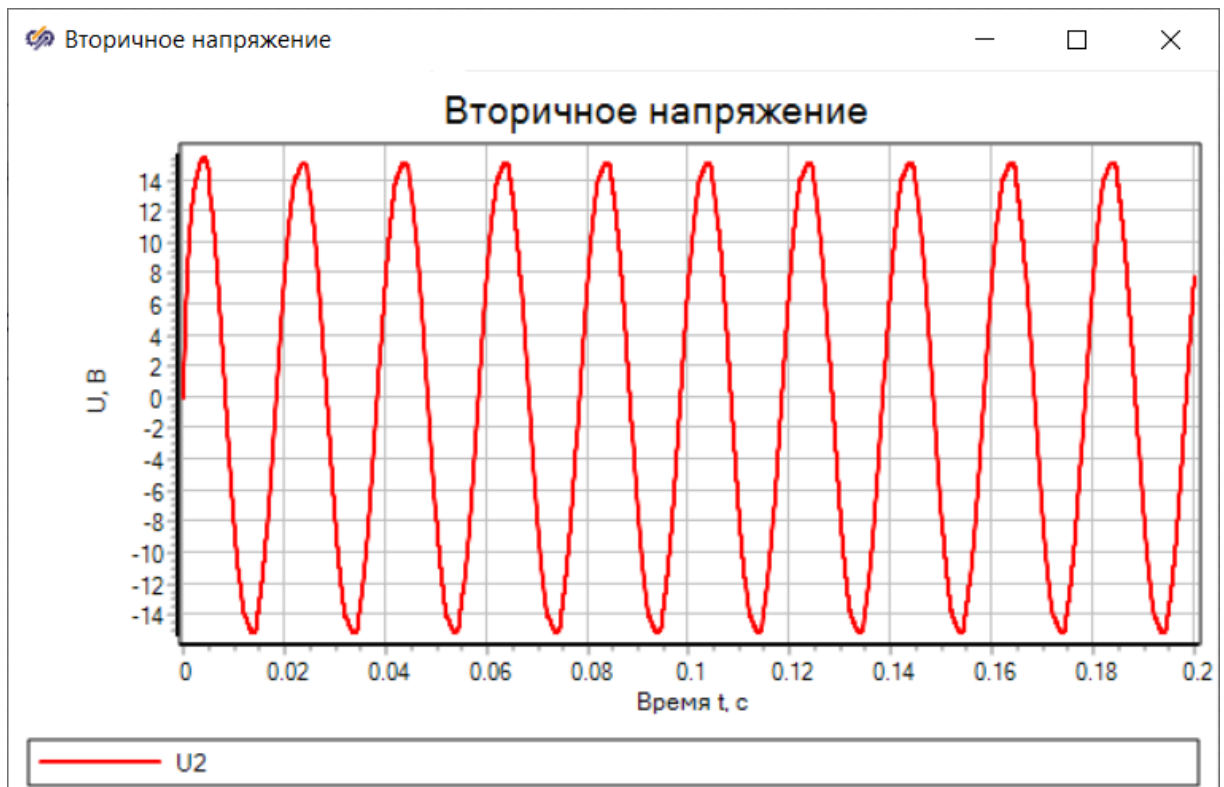


Рисунок 14 – Вторичное напряжение

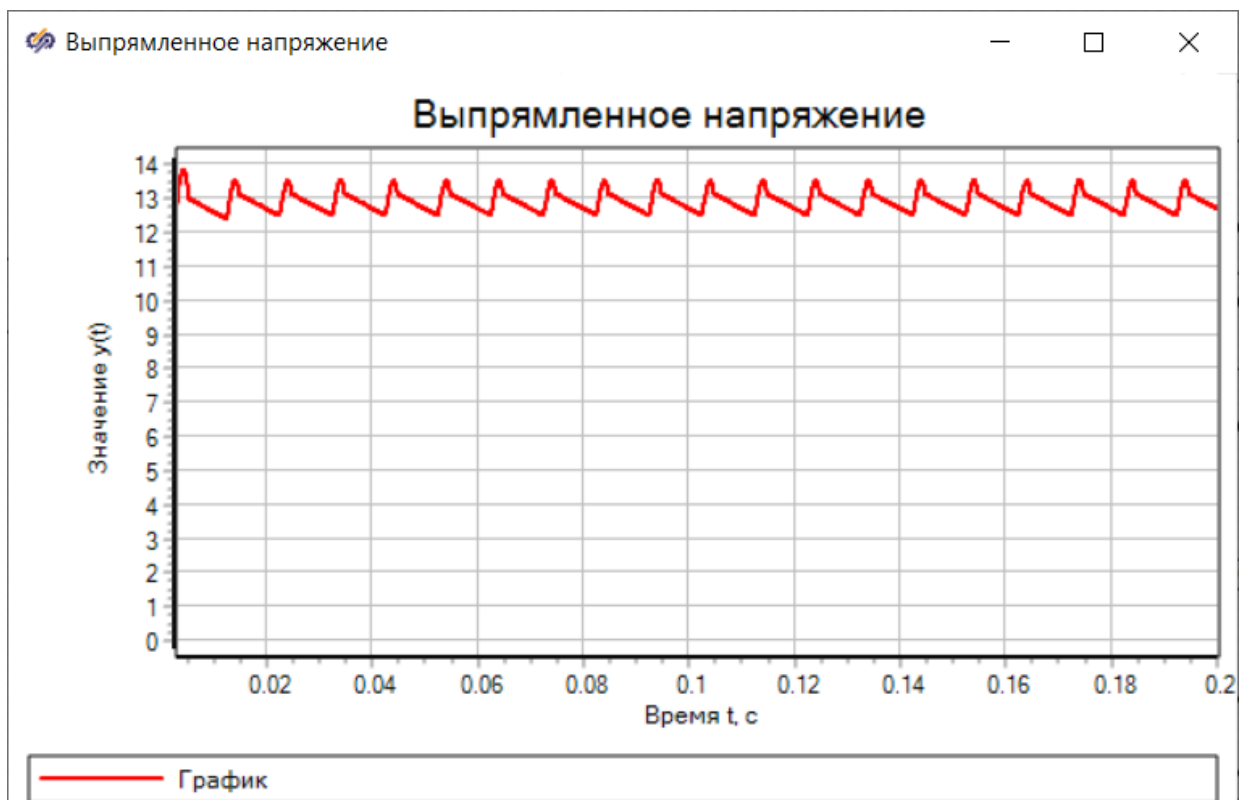


Рисунок 15 – Выпрямленное напряжение

Из представленных рисунков видно, что средние значения выпрямленного тока  $I_{dn} = 89.8$  А, средние значения выпрямленного

напряжения  $U_{dn} = 12.9$  В. Мощность в цепи постоянного тока  $P = 1.16$  кВт, общая потребляемая мощность  $P = 1.35$  кВт.

В разработанной субмодели из графиков выпрямленного тока и напряжения видно, что их средние значения соответствуют номинальным значениям, задаваемым в свойствах субмодели. Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения так же соответствует задаваемому в свойствах субмодели. Результаты вычисления мощности потребляемой нелинейной нагрузкой, представленной субмоделью, близки к номинальной мощности выпрямленной цепи. Ток в первичной цепи трансформатора значительно искажается, а именно при возрастании кривой выпрямленного напряжения от минимального до среднего возрастает от нуля до максимума, а при возрастании напряжения от среднего до максимального – спадает до нуля. При снижении выпрямленного напряжения от максимального до минимального значения, ток практически нулевой.

Таким образом, чем меньше коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, тем уже импульс тока в первичной обмотке трансформатора.

В данной части моделируется участок сети с нелинейной нагрузкой. Модель данной сети включает в себя источник напряжения трехфазный, трансформатор трехфазный двухобмоточный, шина и субмодель в качестве нелинейной коммунально-бытовой нагрузки, рассмотренная в разделе 2.1.

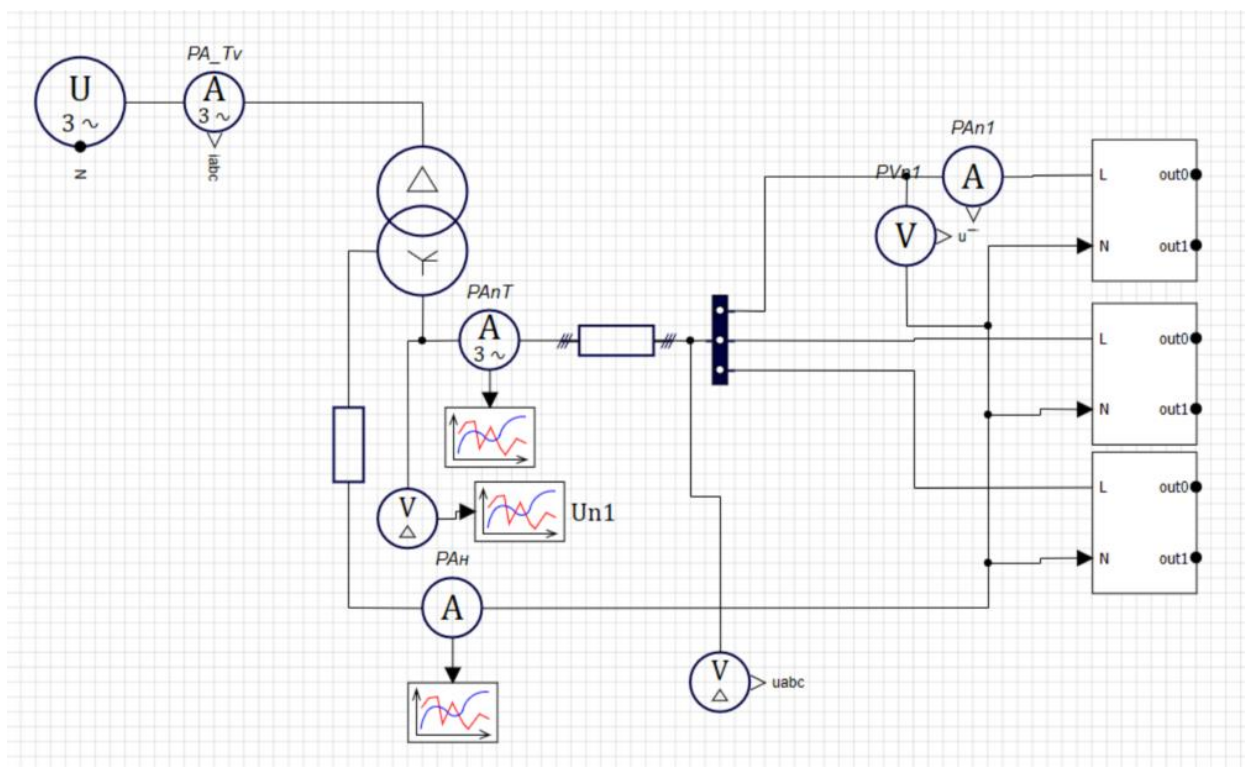


Рисунок 16 – Модель участка сети с нелинейной нагрузкой

Данная сеть имеет номинальное напряжение  $U = 10.5$  кВ, частота сети  $f = 50$  Гц.

Параметры выбранного для исследования трансформатора:

- номинальная мощность трансформатора,  $S_{ном} = 16$  кВА;
- потери холостого хода,  $P_{хх} = 150$  Вт;
- потери короткого замыкания  $P_{кз} = 600$  Вт;
- ток холостого хода  $I_{кз} = 2$  %;
- напряжение короткого замыкания  $U_{кз} = 4$  %.

Расчет параметров схемы замещения трансформатора представлен на рисунке 17.

Название	Имя	Формула	Значение
<b>Номинальные данные</b>			
Номинальная мощность, кВА	Snom	16	16
Номинальное напряжение обмотки ВН (линейное, rms), В	Unomhv	10e3	10000
Номинальное напряжение обмотки НН (линейное, rms), В	Unomlv	400	400
Ток холостого хода, %	Ixx		2
Номинальная частота, Гц	fnom		50
<b>Схема замещения</b>			
<b>Характеристика намагничивания</b>			
<b>Расчет параметров схемы замещения</b>			
Напряжение короткого замыкания, %	Uk		4
Потери холостого хода, кВт	Px		0.15
Потери короткого замыкания, кВт	Pk		0.6
Соотношение сопротивлений обмоток	Hv_Lv		0.5
Рассчитать параметры схемы замещения	calculate		0
Записать расчетные параметры в свойства	write_c		0
Сопротивление обмотки ВН [Xh, Rh], о.е.	Zhpu_c		[0.0069597055, 0.01875]
Сопротивление обмотки НН [Xl, Rl], о.е.	Zlpu_c		[0.0069597055, 0.01875]
Сопротивление ветви намагничивания [Xm1, Rm1], о.е.	Zmpu_c		[56.579036, 106.6883]

Рисунок 17 – Расчет параметров схемы замещения трансформатора

Для дальнейшего исследования влияния коммунально-бытовой нелинейной нагрузки данная модель была дополнена еще одной промежуточной субмоделью, которая позволяет менять число блоков субмодели самой нелинейной нагрузки. Промежуточная субмодель представлена на рисунке 18. На рисунке представлен пример размножения субмодели в количестве 1 блока. Это позволит исследовать влияние нелинейной нагрузки на питающую сеть при различном числе коммунально-бытовых потребителей.

В скрипте размножающейся субмодели рассчитываются параметры элементов, которые связывают питающую сеть с субмоделью нелинейной нагрузки. Текст скрипта «Размножающаяся субмодель» представлен в приложении Б.

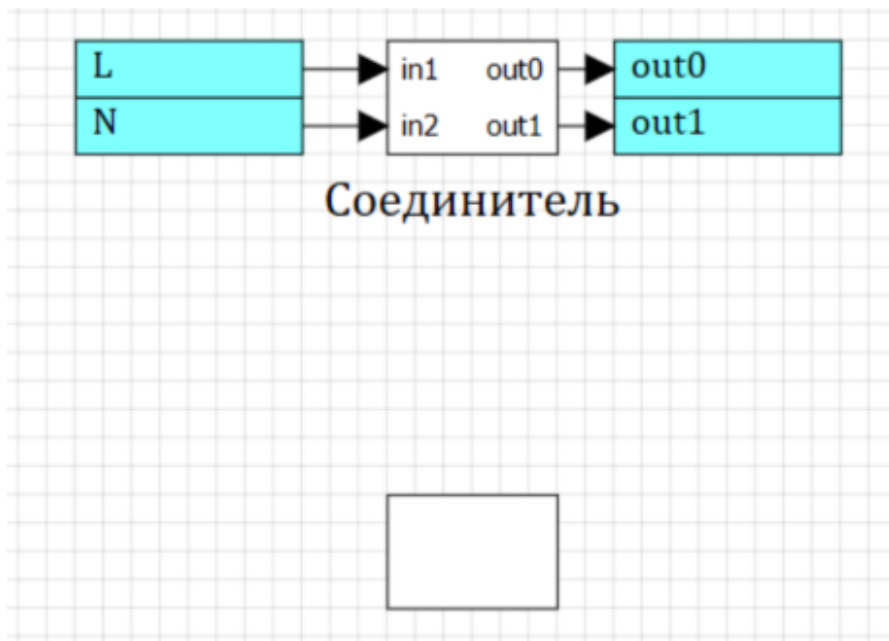


Рисунок 18 – Модель промежуточной субмодели

## 2.2 Разработка моделей участка сети с нелинейной нагрузкой

В данной части была разработана модель электрической сети, состоящей из трех магистральных линий, изображенной на рисунке 19. В качестве модели нагрузки рассматривалась параллельно соединенные линейная и нелинейная нагрузки с возможностью задания нелинейной нагрузки. Данная сеть включает в себя источник напряжения трехфазный, трансформатор трехфазный и три магистральных однофазных линии с подключенной нагрузкой.

На схеме линия, представленная субмоделью, состоящая из секций, включающая в себя сопротивления фазного и нейтрального проводов с параллельно подключенными линейной и нелинейной нагрузками. Количество последовательно соединенных секций определяется задается в свойствах субмодели. Разработанная субмодель линии с переменным числом секций представлена на рисунке 20.

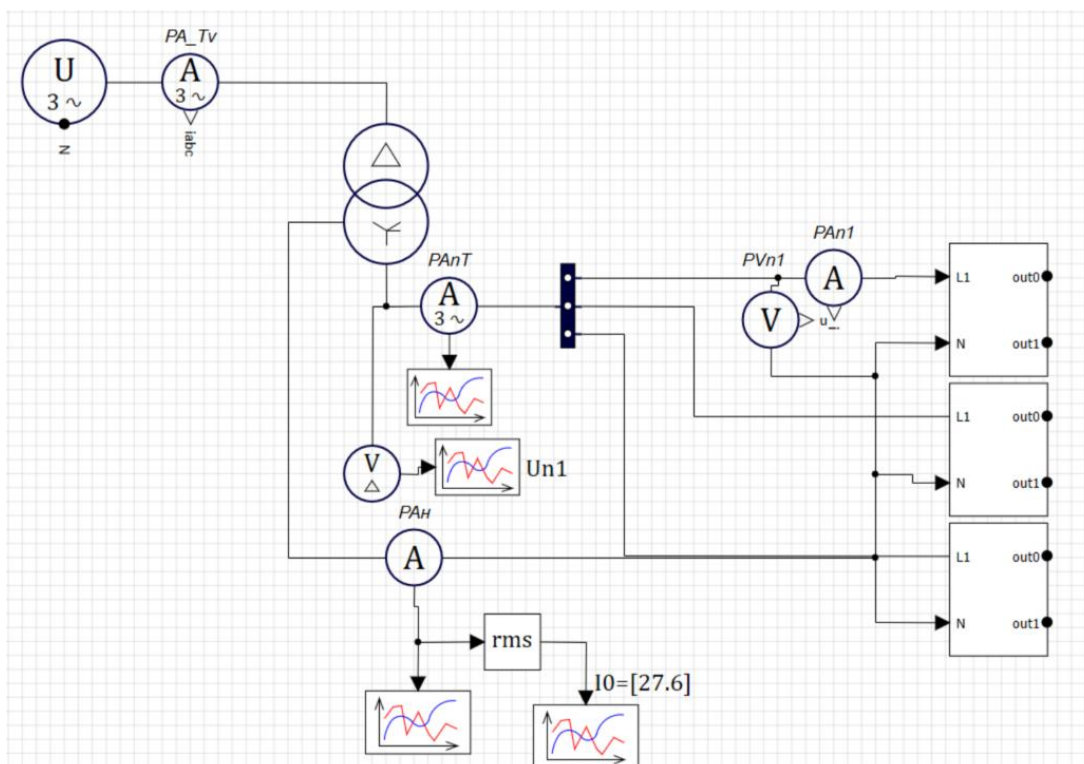


Рисунок 19 – Модель электрической сети с нелинейной нагрузкой

Параметры сети аналогичны, как и в п. 2.1.

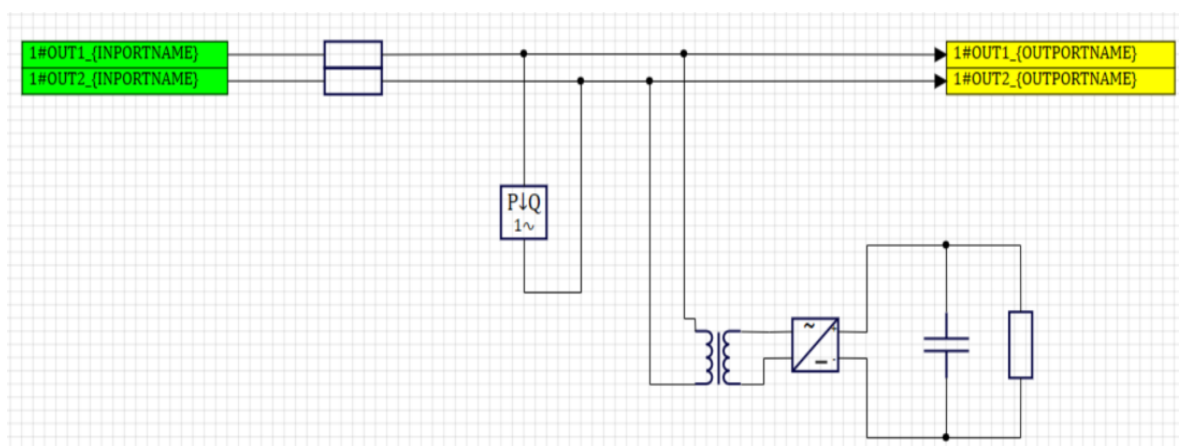


Рисунок 20 – Субмодель линии с переменным числом секций

Данная субмодель позволяет регулировать долю линейной и нелинейной нагрузки, а также распределение такой нагрузки по всей длине заданной линии электропередачи. Число секций линии, мощность линии, доля нелинейной нагрузки прописываются в скрипте файла названной «Участок сети.ptr». Также в скрипте рассчитываются параметры схемы замещения трансформатора, задаются параметры ВАХ диодов, вычисляется сопротивление нагрузки выпрямленной цепи и емкость сглаживающего конденсатора. Скрипт разработанной субмодели представлен в приложении В.

### 3 Аналитическая часть

#### 3.1 Исследование влияния числа нелинейных электроприемников на гармонический состав

Рассмотрены результаты моделирования при различной кратности нелинейной нагрузки на одну фазу  $n$ : 1, 10, 50, 100, чтобы выявить влияние количества числа нелинейных электроприемников на искажения в электрической сети. Суммарная мощность по всем фазам составляет  $P = 9\text{кВт}$ . Загрузка трансформатора составляет 60% – 70%. Результаты исследования сети с разной кратностью модели нелинейной нагрузки представлены на рисунках ниже соответственно.

Результаты моделирования при кратности модели на одну фазу  $n = 1$  представлены на рисунках 22 - 25.

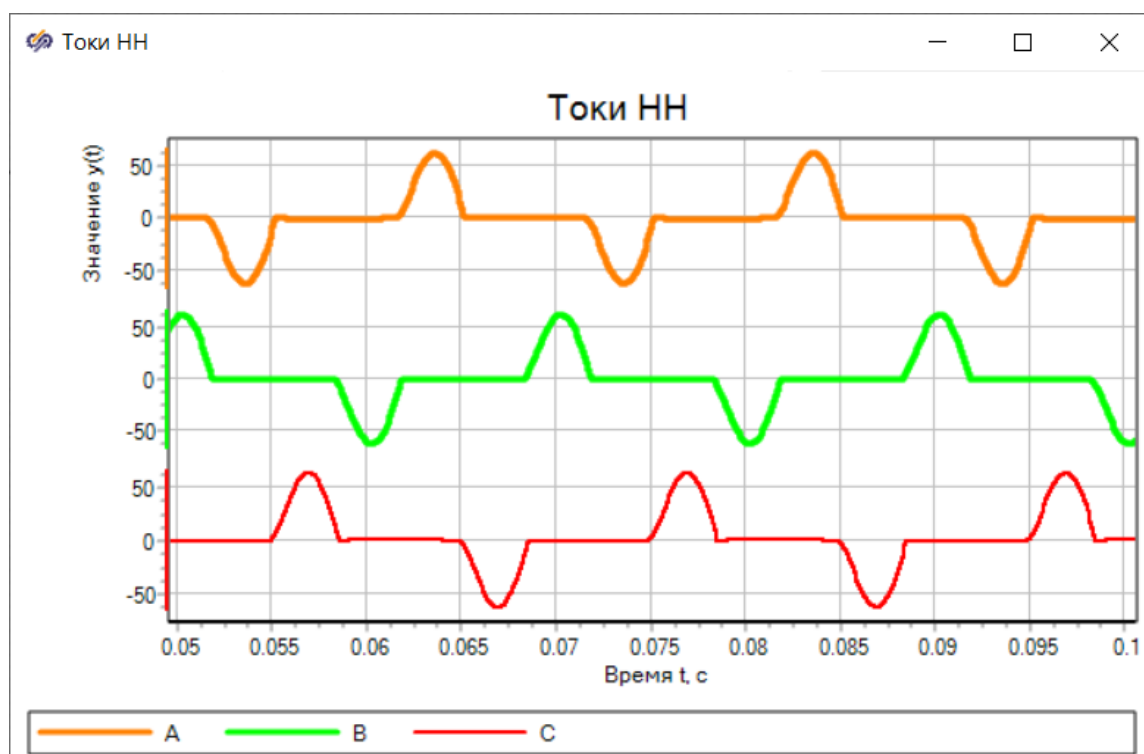


Рисунок 22 – Линейный ток при  $n = 1$





Рисунок 23 – Линейное напряжение при  $n = 1$

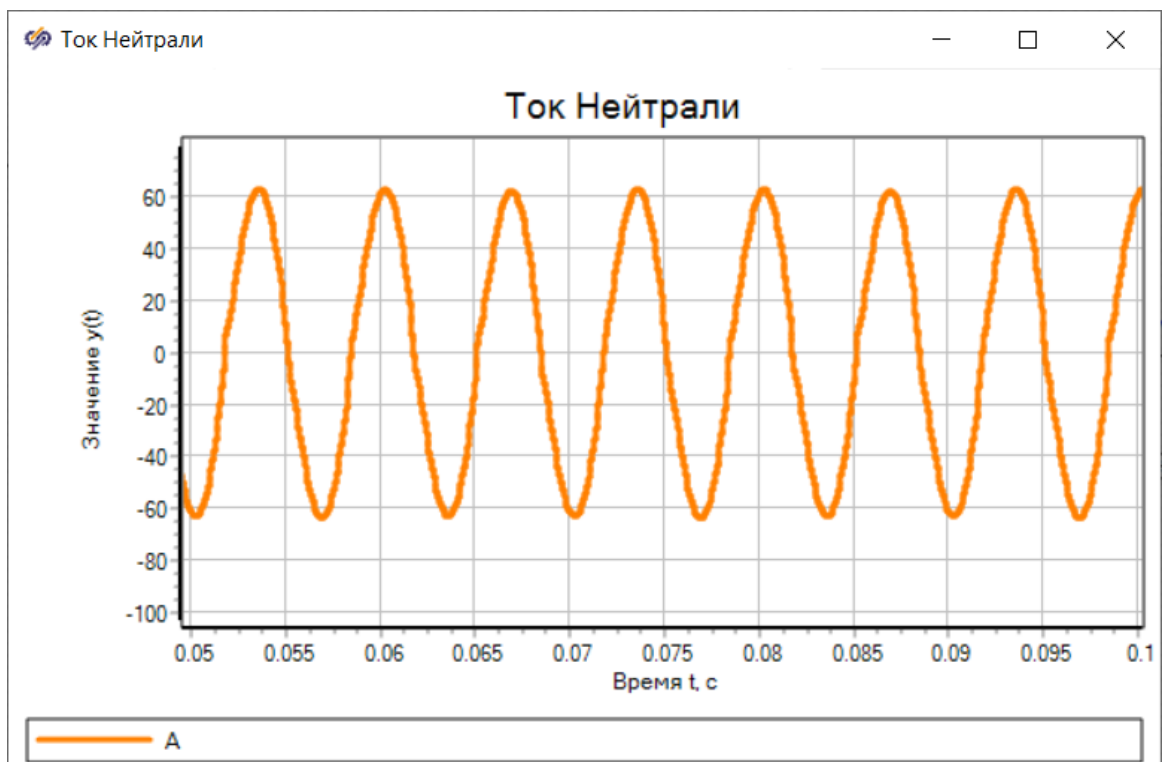


Рисунок 24 – Ток в нейтрале трансформатора при  $n = 1$

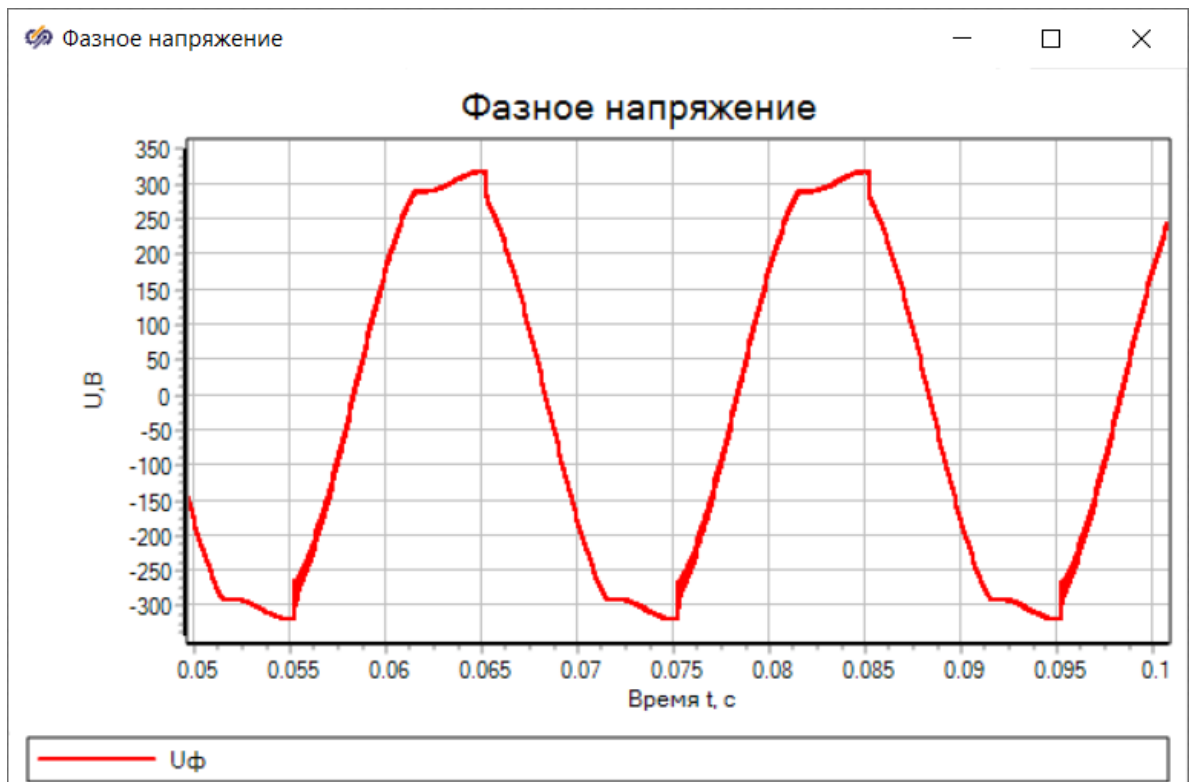


Рисунок 25 – Фазное напряжение при  $n = 1$

Результаты моделирования при кратности модели на одну фазу  $n = 10$  представлены на рисунках 26 - 29.

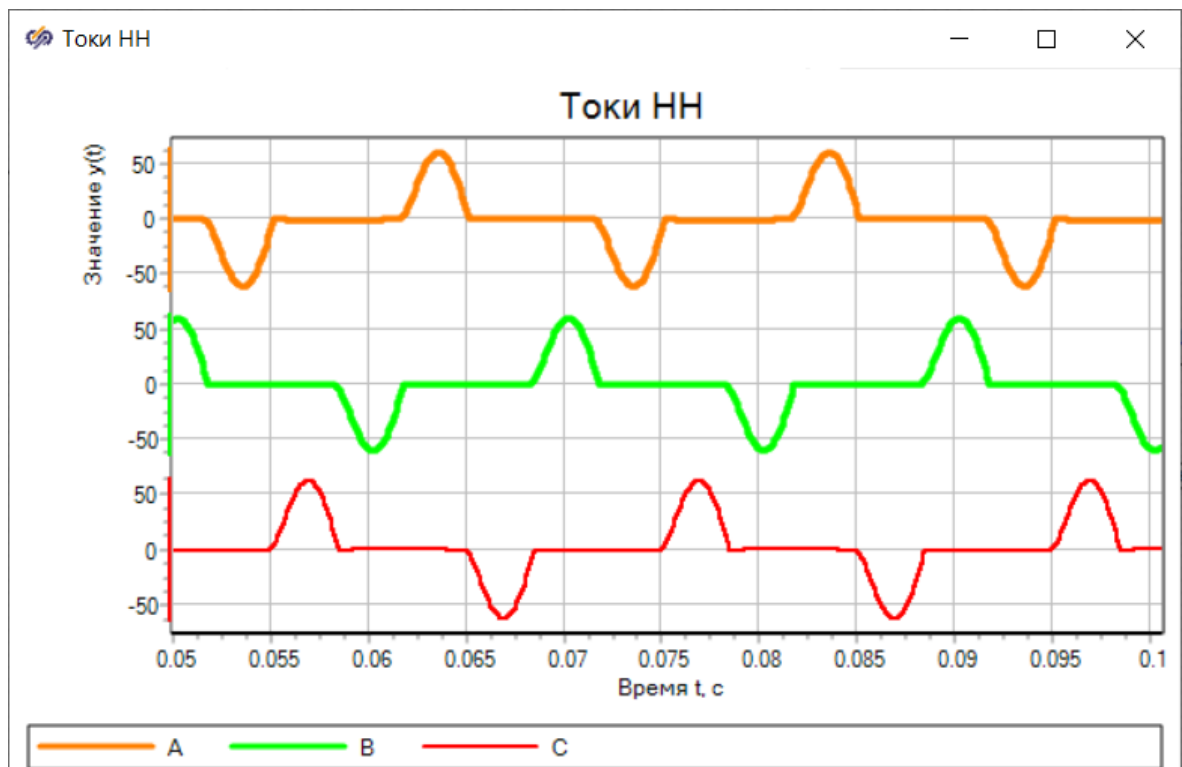


Рисунок 26 – Линейный ток при  $n = 10$

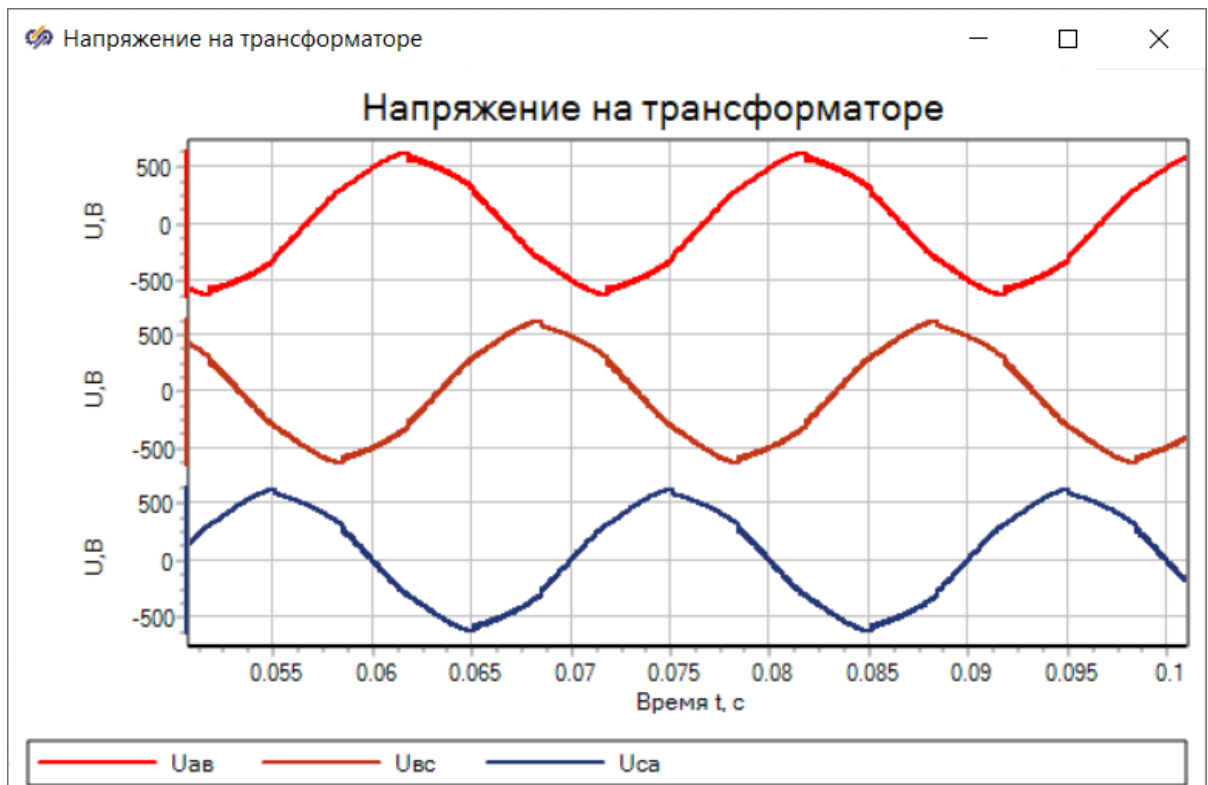


Рисунок 27 – Линейное напряжение при  $n = 10$

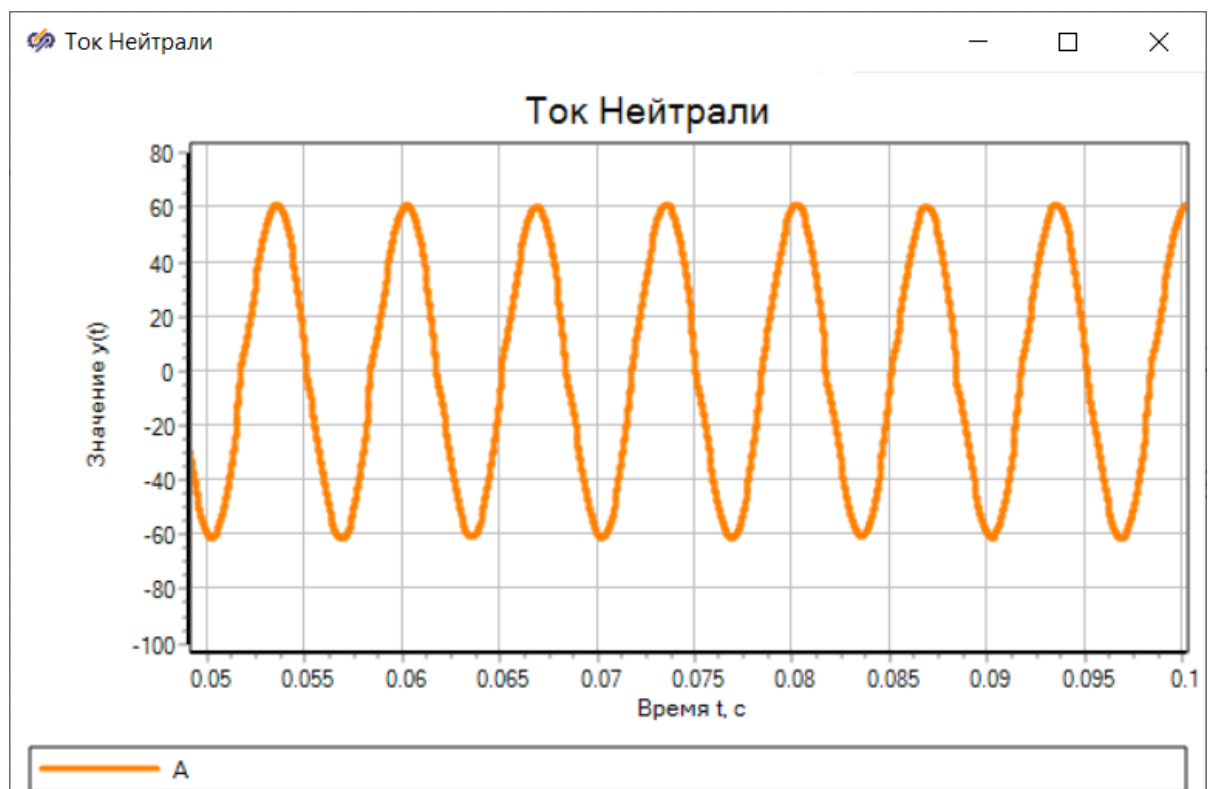


Рисунок 28 – Ток в нейтрале трансформатора при  $n = 10$

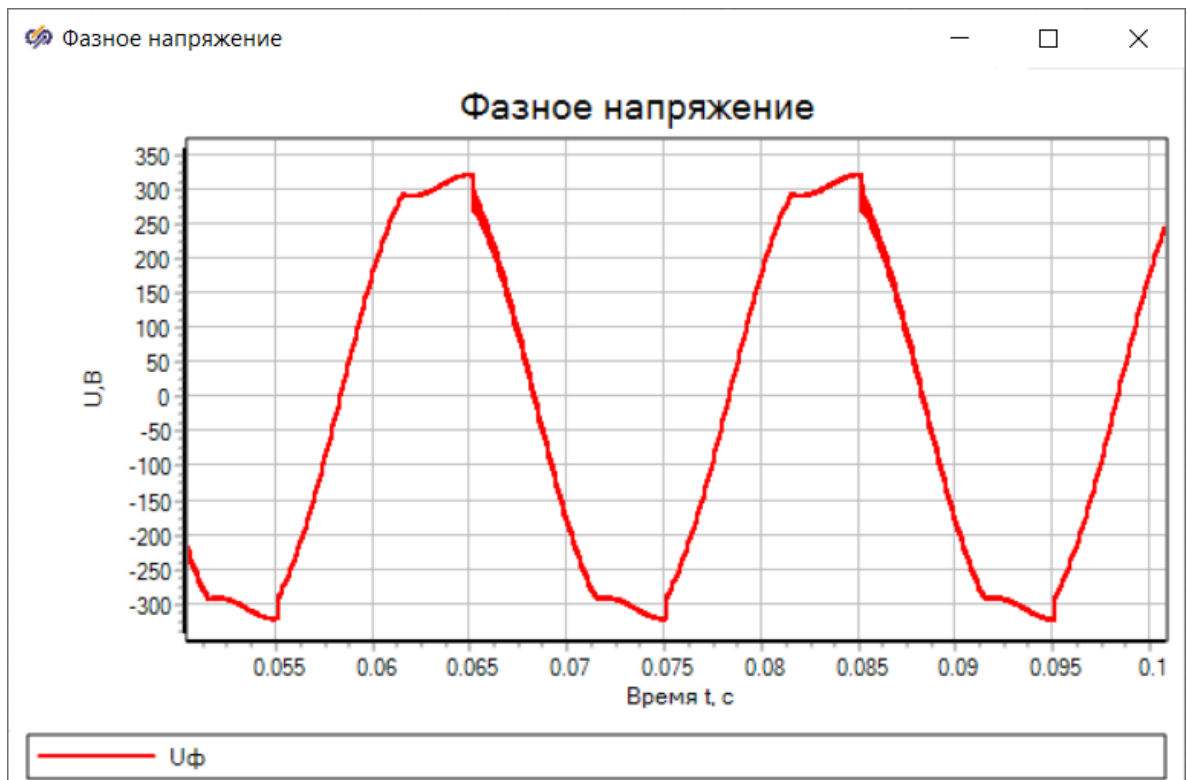


Рисунок 29 – Фазное напряжение при  $n = 10$

Результаты моделирования при кратности модели на одну фазу  $n = 50$  представлены на рисунках 30 - 33.

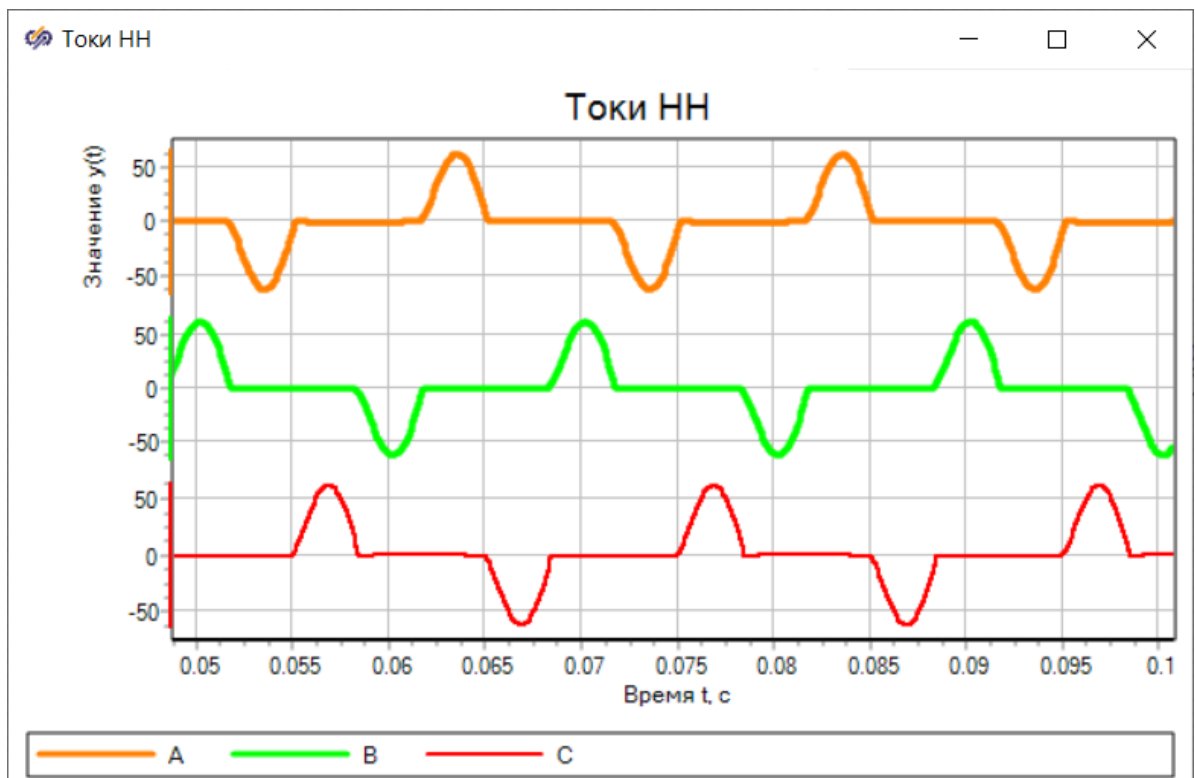


Рисунок 30 – Линейный ток при  $n = 50$



Рисунок 31 – Линейное напряжение при  $n = 50$

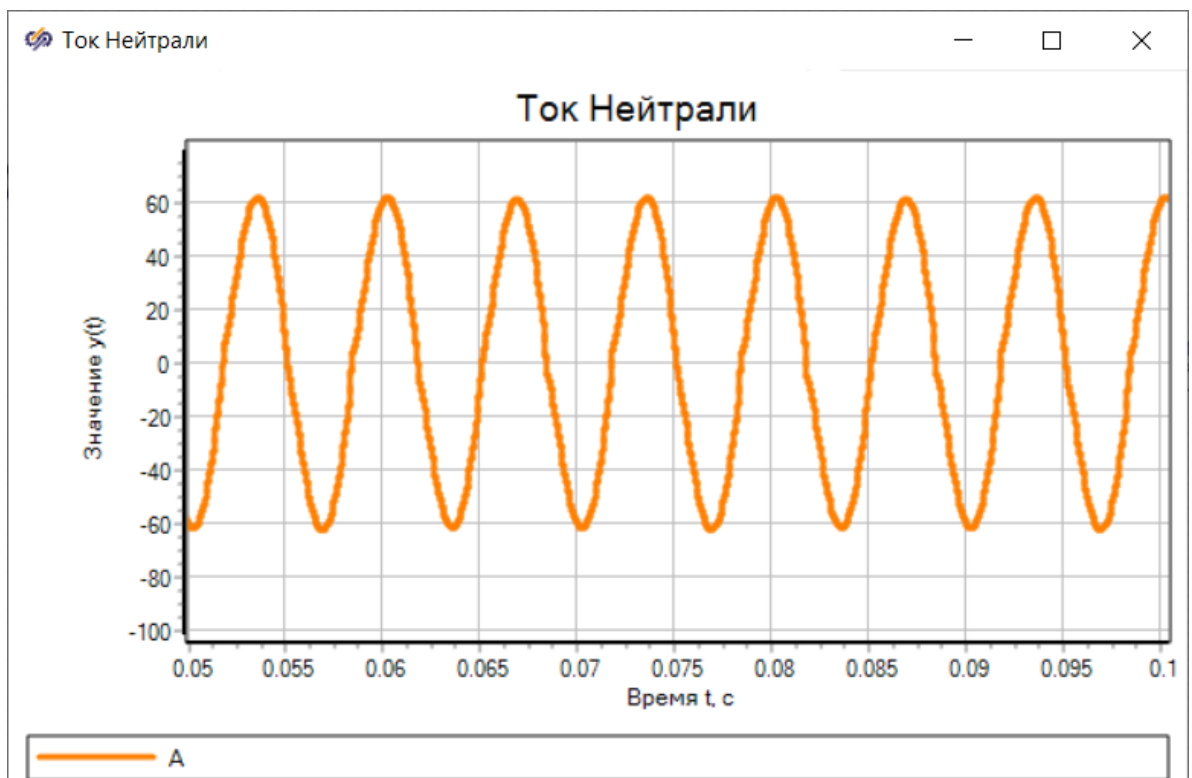


Рисунок 32 – Ток в нейтрале трансформатора при  $n = 50$

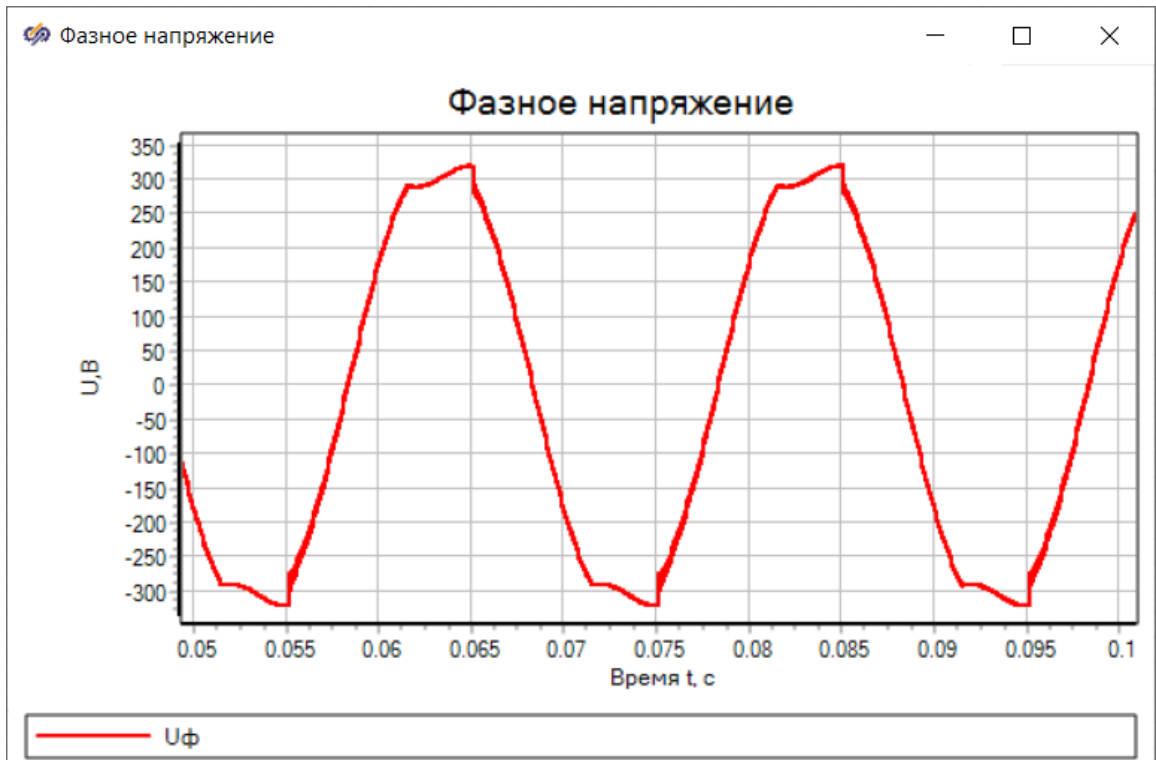


Рисунок 33 – Фазное напряжение при  $n = 50$

Результаты моделирования при кратности модели на одну фазу  $n = 100$  представлены на рисунках 34 - 37.

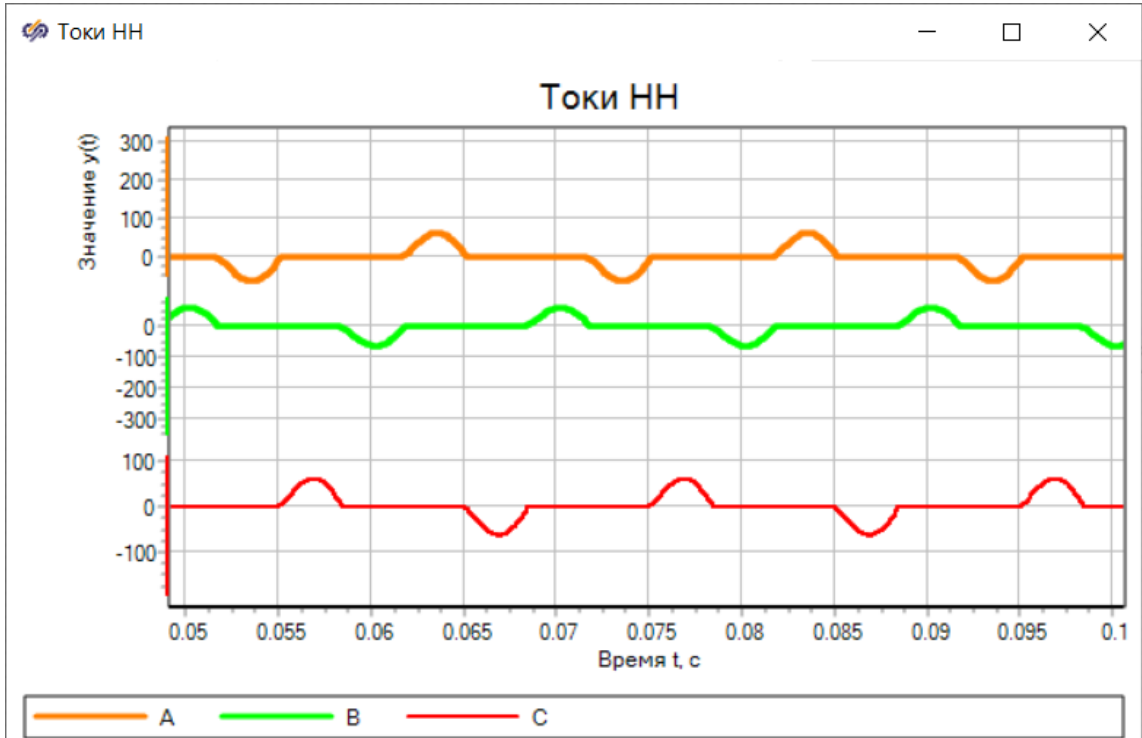


Рисунок 34 – Линейный ток при  $n = 100$

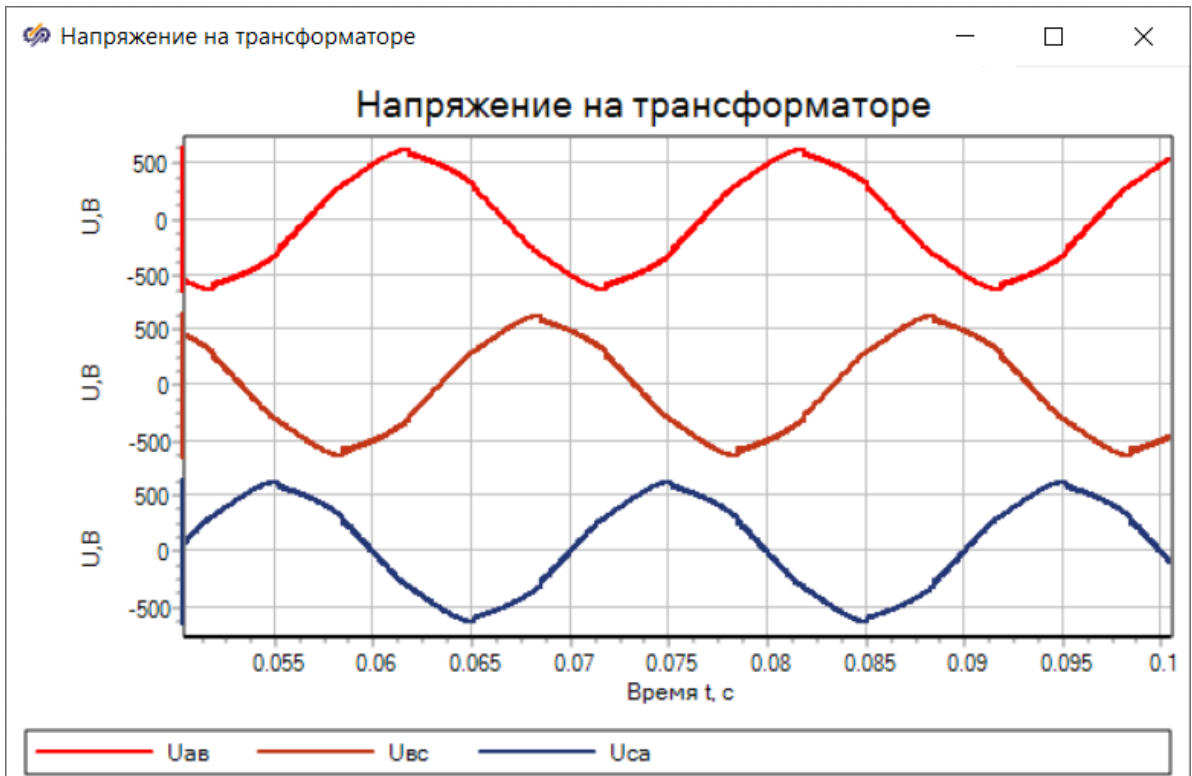


Рисунок 35 – Линейное напряжение при  $n = 100$

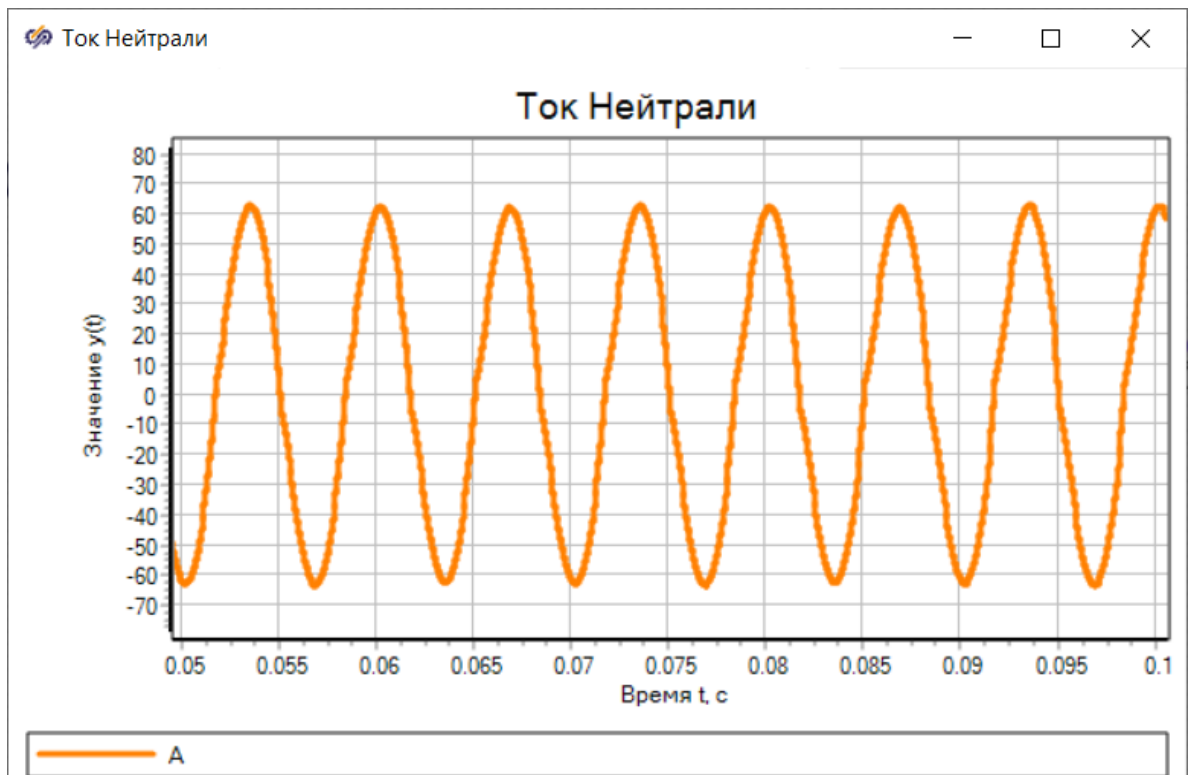


Рисунок 36 – Ток в нейтрале трансформатора при  $n = 100$

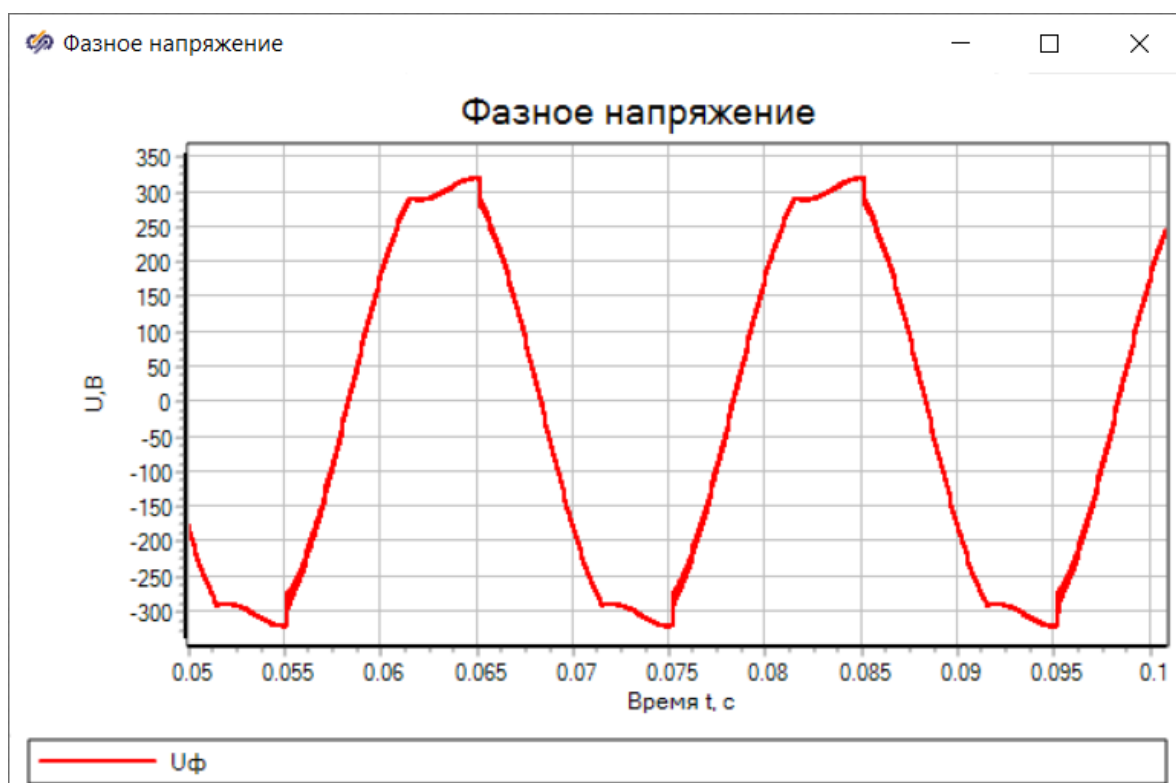


Рисунок 37 – Фазное напряжение при  $n = 100$

Также проведен спектральный анализ напряжения на трансформаторе. Согласно ГОСТ 32144-2013 искажения каждой гармонической составляющей имеет свою норму отклонения, выраженную в процентах  $K_{U(n)}$ , %. [14]

Исследование спектрального анализа гармонических составляющих напряжения на трансформаторе  $K_{U(n)}$ , % представлен в таблицах 1 – 4, в которых указаны гармонические составляющие превышающие нормативные значения.

Таблица 1 – Исследование спектрального анализа напряжения трансформатора  $K_{U(n)}$ , % при  $n=1$ .

№ гармонической составляющей	Значение $K_{U(n)}$ , %	Нормативное допустимое значение $K_{U(n)}$ , %
21	0,24	0,2
27	0,23	0,2

Таблица 2 – Исследование спектрального анализа напряжения трансформатора  $K_{U(n)}$ , % при  $n=10$ .

№ гармонической составляющей	Значение $K_{U(n)}$ , %	Нормативное допустимое значение $K_{U(n)}$ , %
21	0,52	0,2
27	0,33	0,2



Таблица 3 – Исследование спектрального анализа напряжения трансформатора  $K_{U(n)}$ , % при  $n=10$ .

№ гармонической составляющей	Значение $K_{U(n)}$ , %	Нормативное допустимое значение $K_{U(n)}$ , %
21	0,23	0,2
27	0,33	0,2

Таблица 4 – Исследование спектрального анализа напряжения трансформатора  $K_{U(n)}$ , % при  $n=100$ .

№ гармонической составляющей	Значение $K_{U(n)}$ , %	Нормативное допустимое значение $K_{U(n)}$ , %
27	0,42	0,2

Проанализировав проведенные эксперименты можно выявить зависимость влияния числа нелинейных электроприемников в сети. При увеличении числа электроприемников с нелинейной нагрузкой при одинаковой суммарной мощности увеличивается несимметрия напряжения, особенно фазные. Нелинейная нагрузка приводит к появлению тока в нейтральном проводе преимущественно 3 гармонике равного по амплитуде фазному. При соединении трансформатора D/Y данные токи вызывают существенный перегрев трансформатора. Особо заметен рост гармонической составляющей высокого порядка, причем 21 и 27 гармонические составляющие выходят за пределы ГОСТа.

Исследуя спектральный анализ гармонических составляющих напряжения было выявлено несоответствие гармонических составляющих гармоник высшего порядка.

Гармоники высшего порядка несут свои негативные последствия:

- ускоренный процесс износа электрооборудования, из-за износа изоляции, который возникает при нагреве из-за гармонических составляющих высшего порядка;
- могут возникать потери мощности и уменьшение пропускной способности линий электропередач;
- возможность возникновения резонанса в сети;
- ухудшение устройств автоматики электроэнергетической сети.

### **3.2 Исследование влияния различной доли нелинейной нагрузки при соединении обмоток трансформатора D/Y и Y/Y на низковольтную электрическую сеть**

Рассмотрены результаты влияния различной доли нелинейной нагрузки в низковольтной электрической сети при разном количестве электроприемников в линии электропередач и разным соединением обмоток силового трансформатора.

Первые замеры проводятся при количестве электроприемников в одной линии  $n$ : 1,10,50,100, доли нелинейной нагрузки  $k_n=40\%$  и соединение обмоток трансформатора D/Y.

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=1$  представлены на рисунках 38-40.

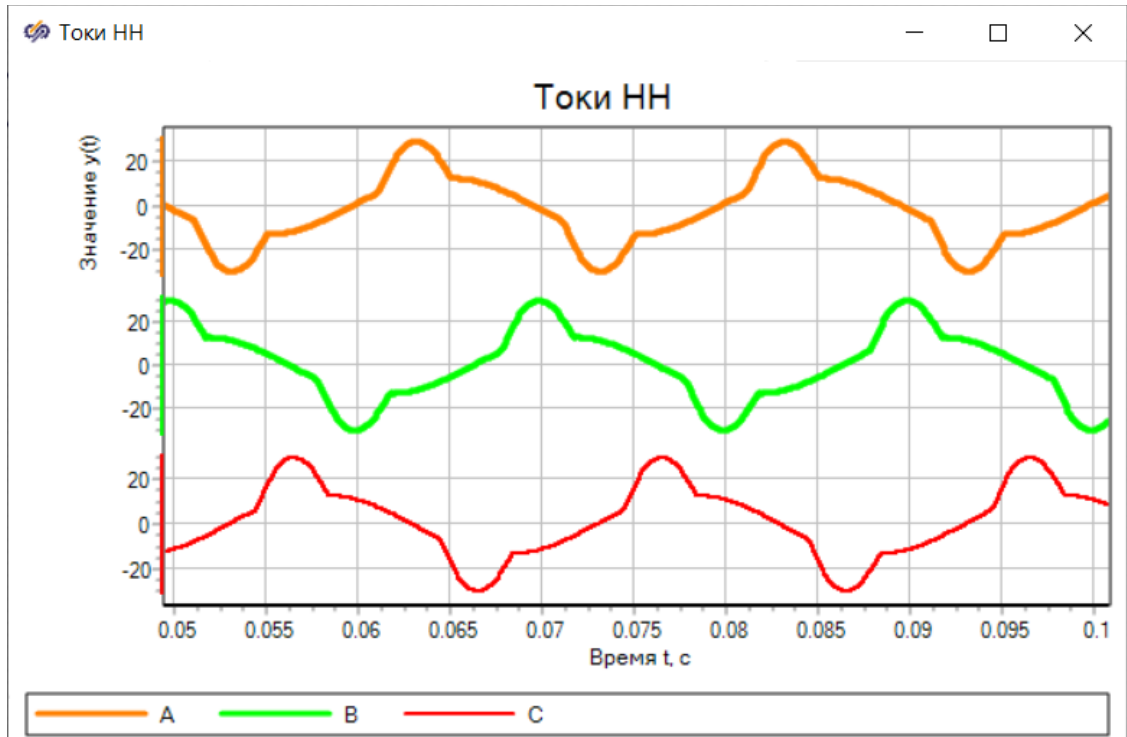


Рисунок 38 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ , D/Y

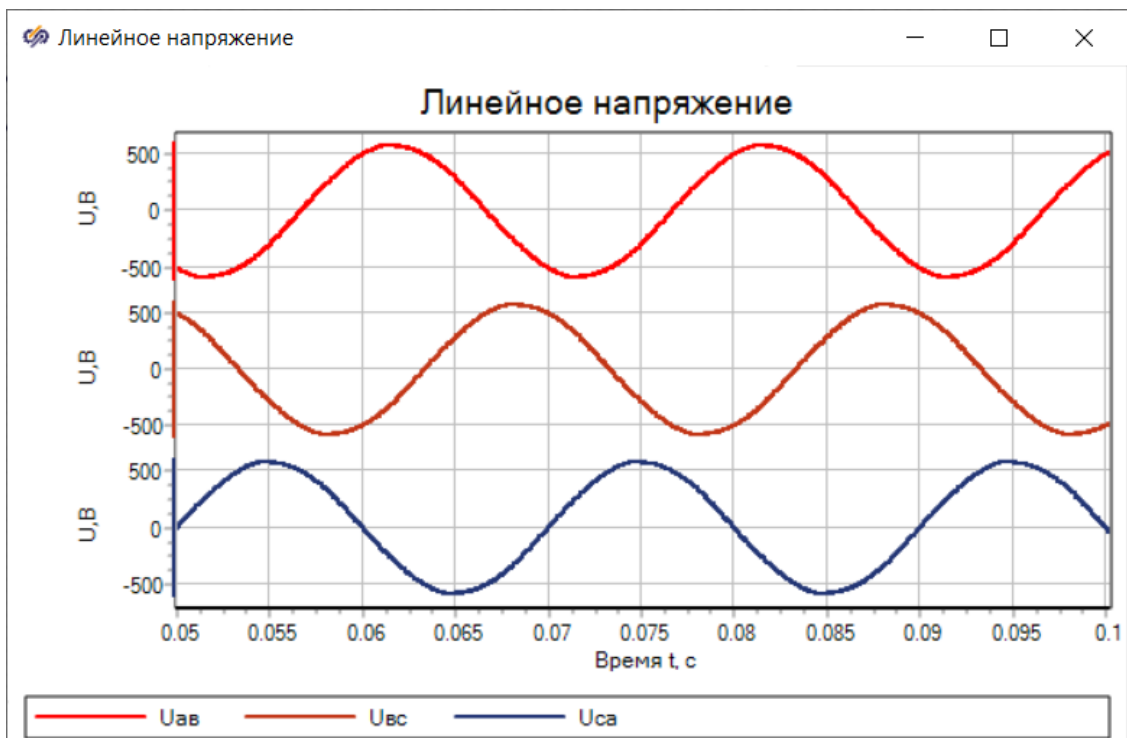


Рисунок 39 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ , D/Y

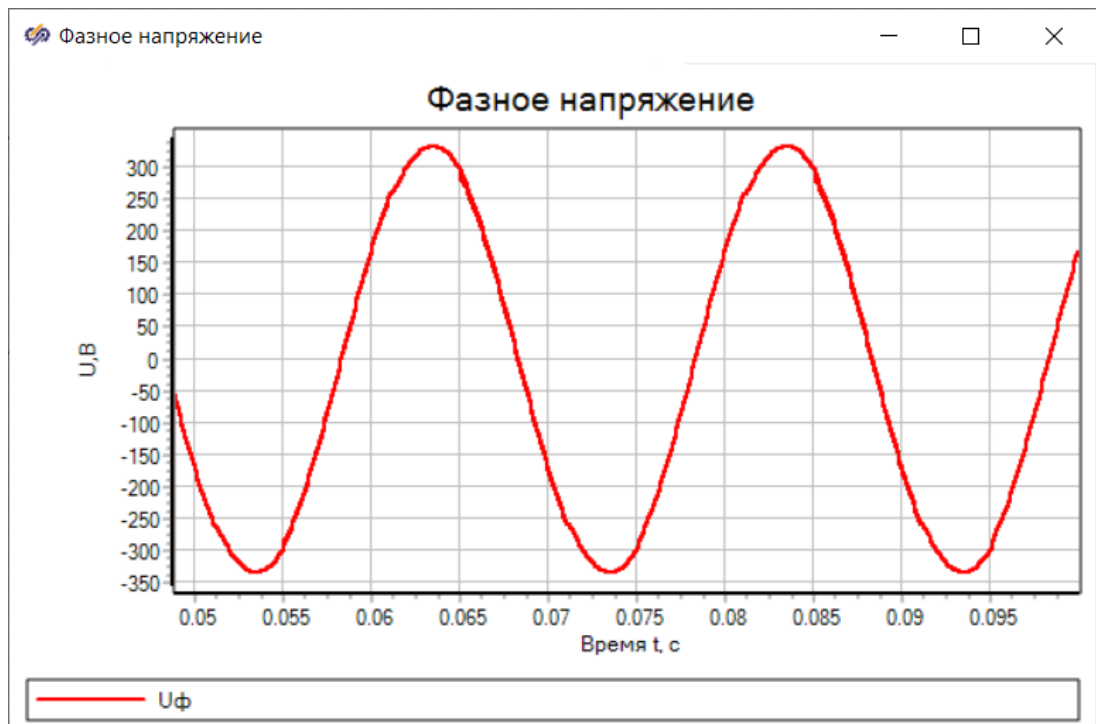


Рисунок 40 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=10$  представлены на рисунках 41-43.

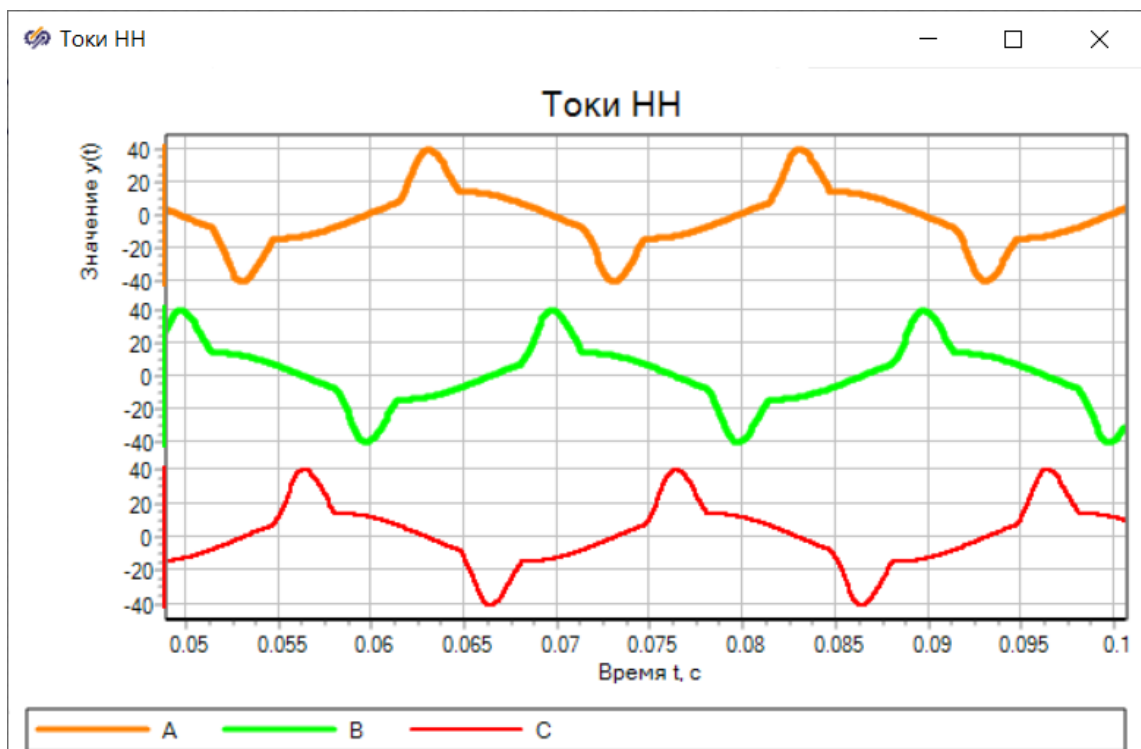


Рисунок 41 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , D/Y

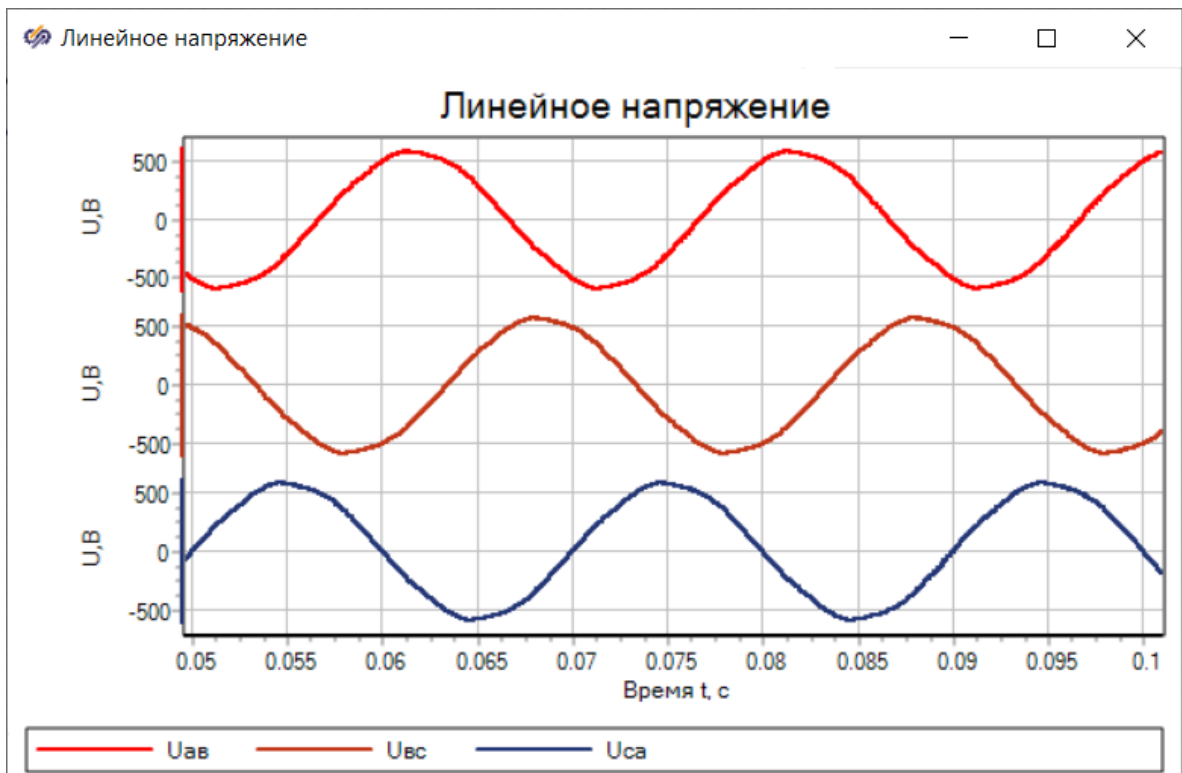


Рисунок 42 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , D/Y

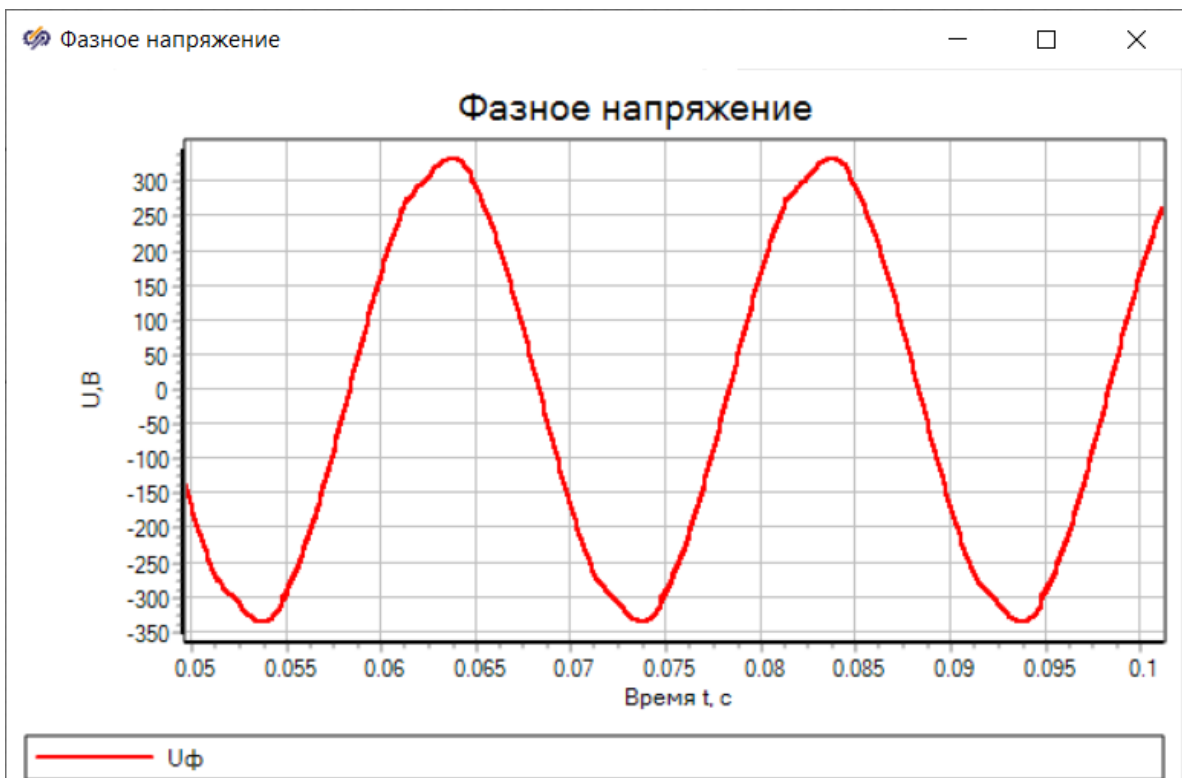


Рисунок 43 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=50$  представлены на рисунках 44-46.

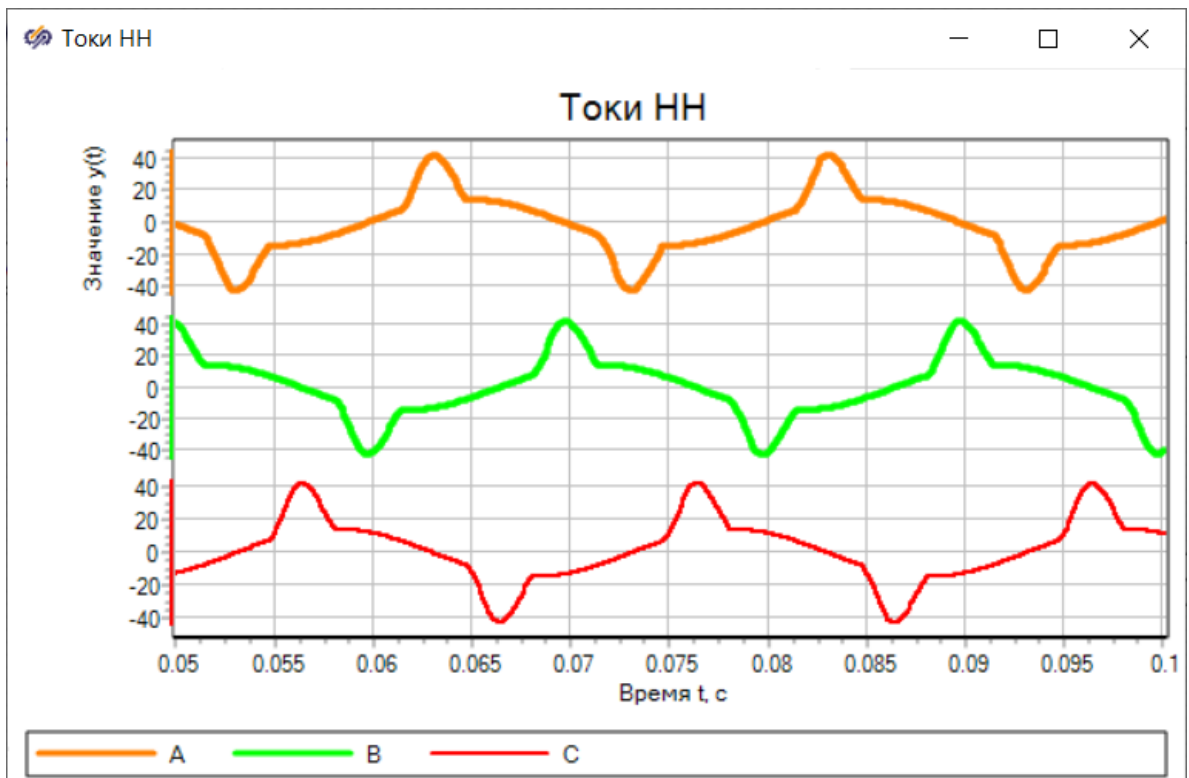


Рисунок 44 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , D/Y

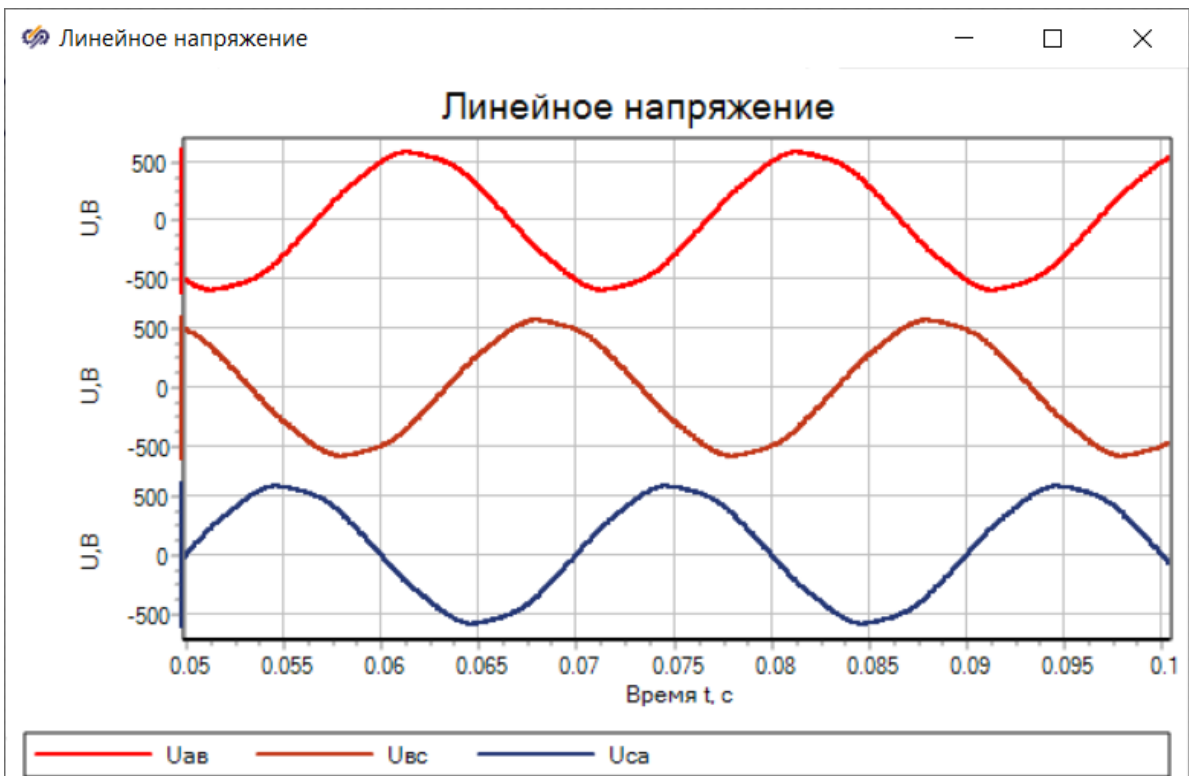


Рисунок 45 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , D/Y

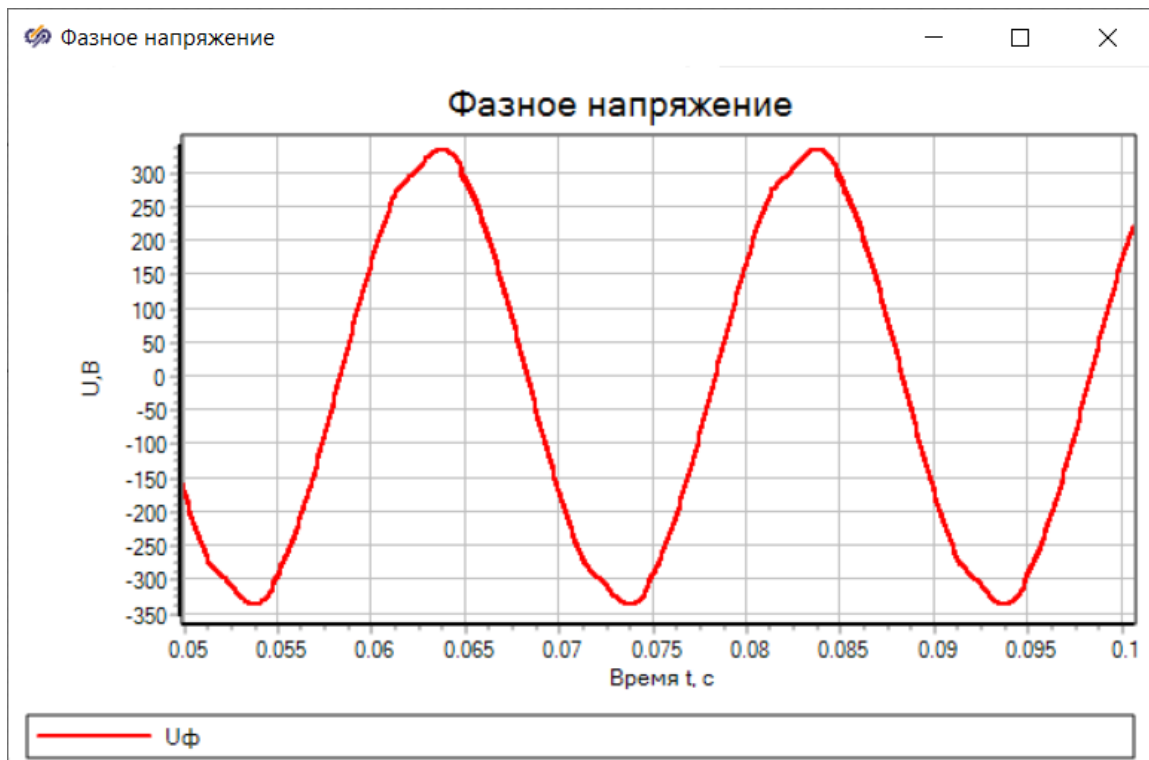


Рисунок 46 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=100$  представлены на рисунках 47-49.

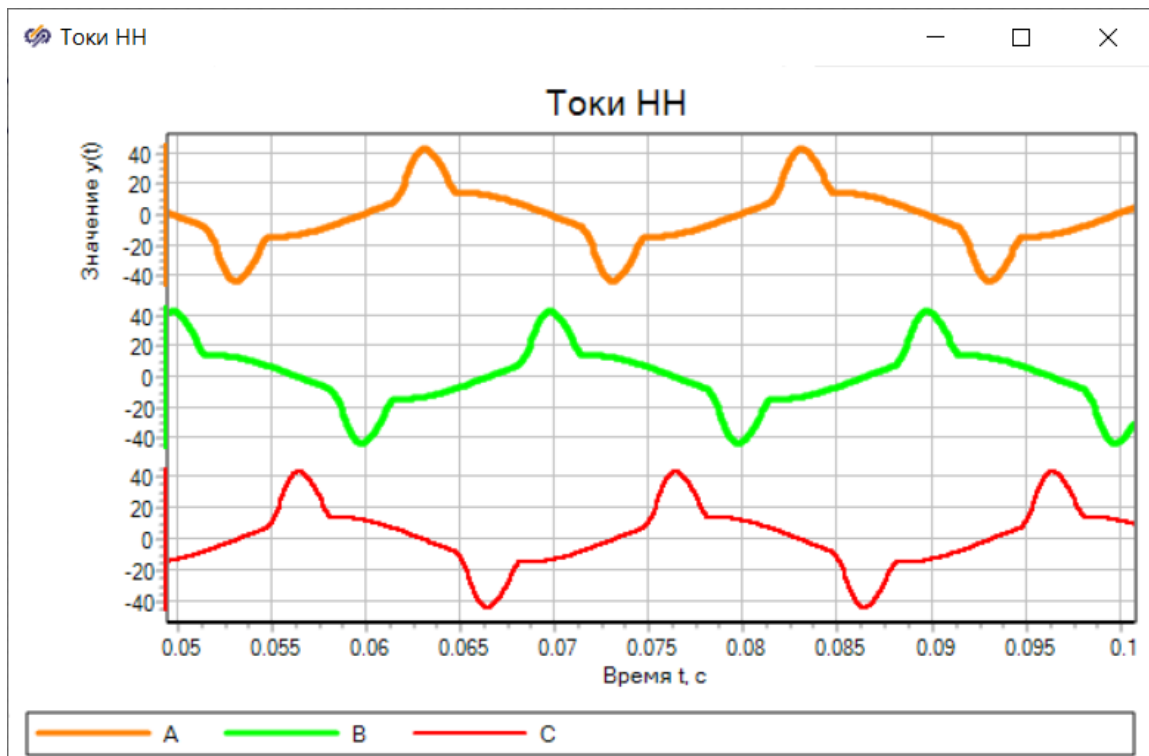


Рисунок 47 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , D/Y

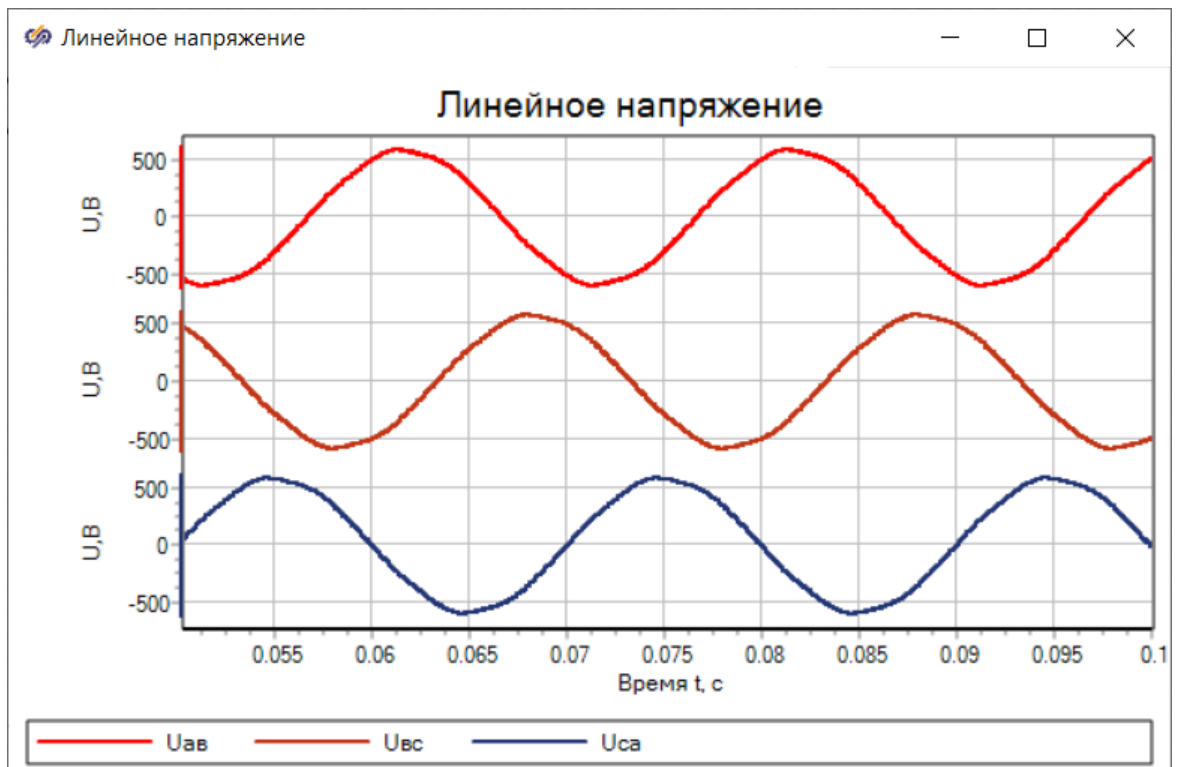


Рисунок 48 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , D/Y

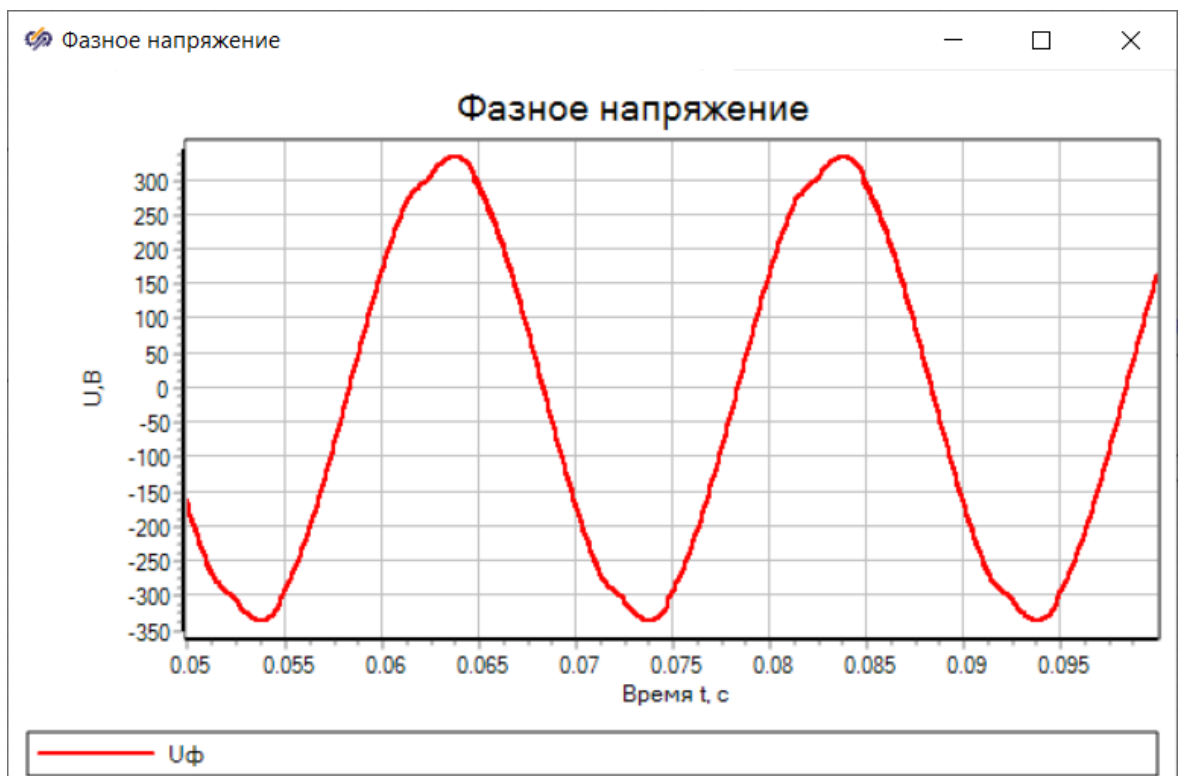


Рисунок 49 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , D/Y

Далее замеры проводятся при количестве электроприемников в одной линии  $n$ : 1,10,50,100, доли нелинейной нагрузки  $k_n=70\%$  и соединение обмоток трансформатора D/Y.

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=1$  представлены на рисунках 50-52.

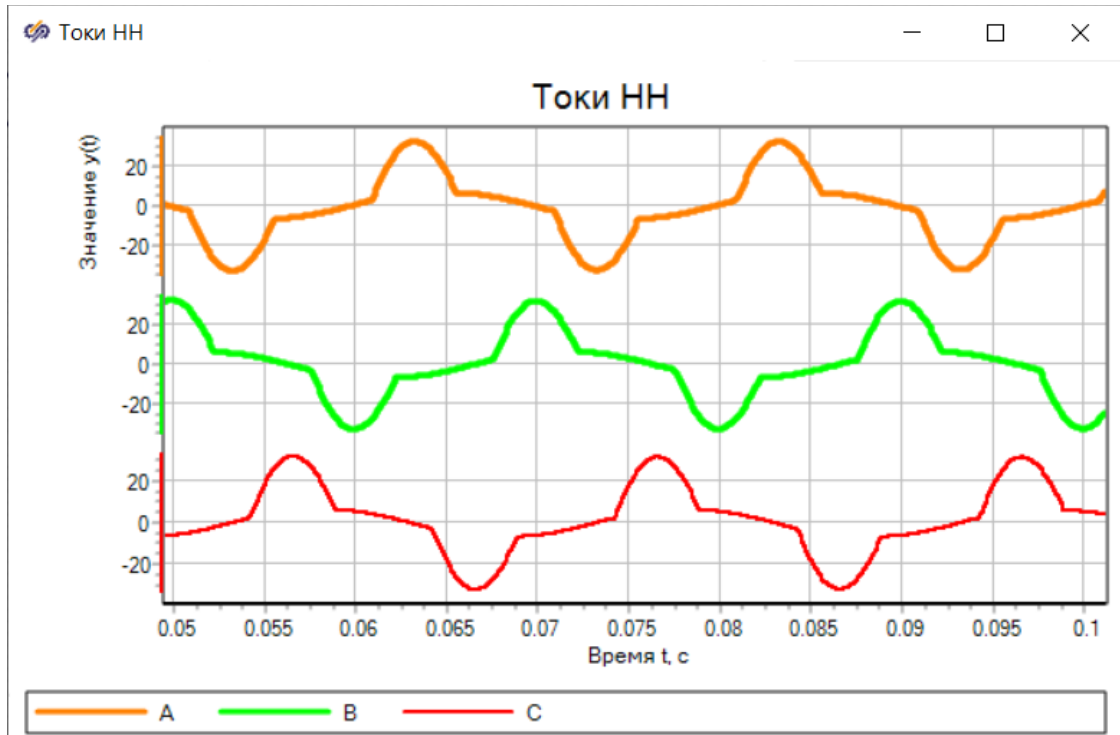


Рисунок 50 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , D/Y

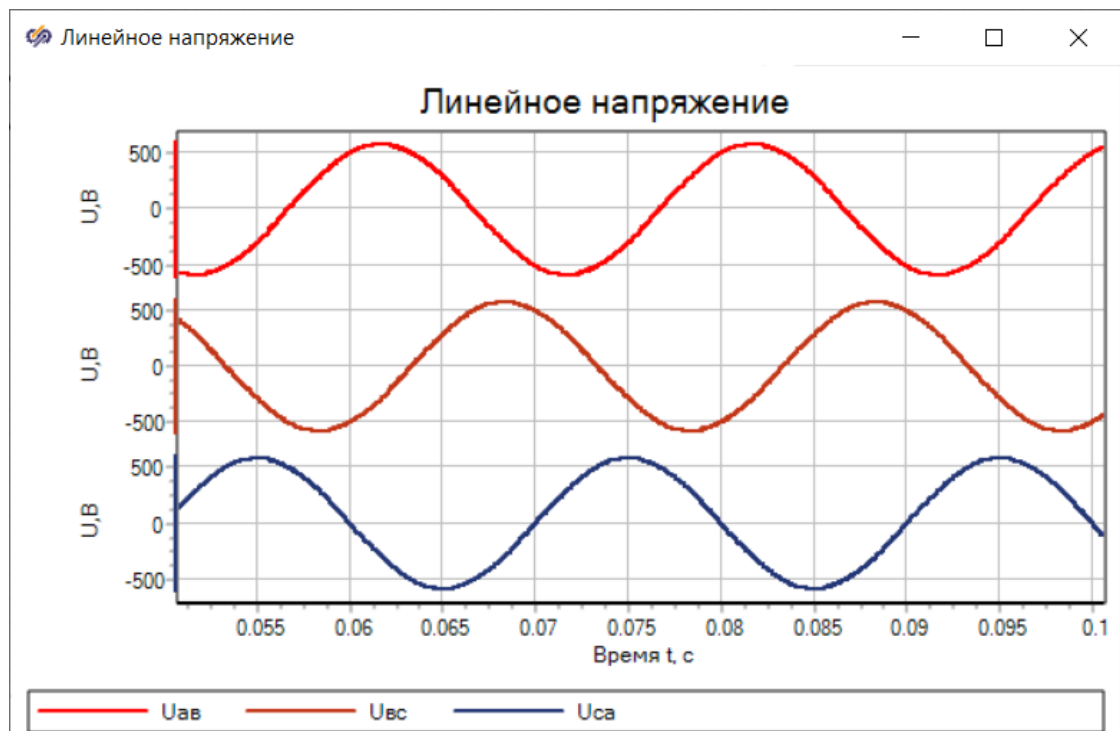


Рисунок 51 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , D/Y



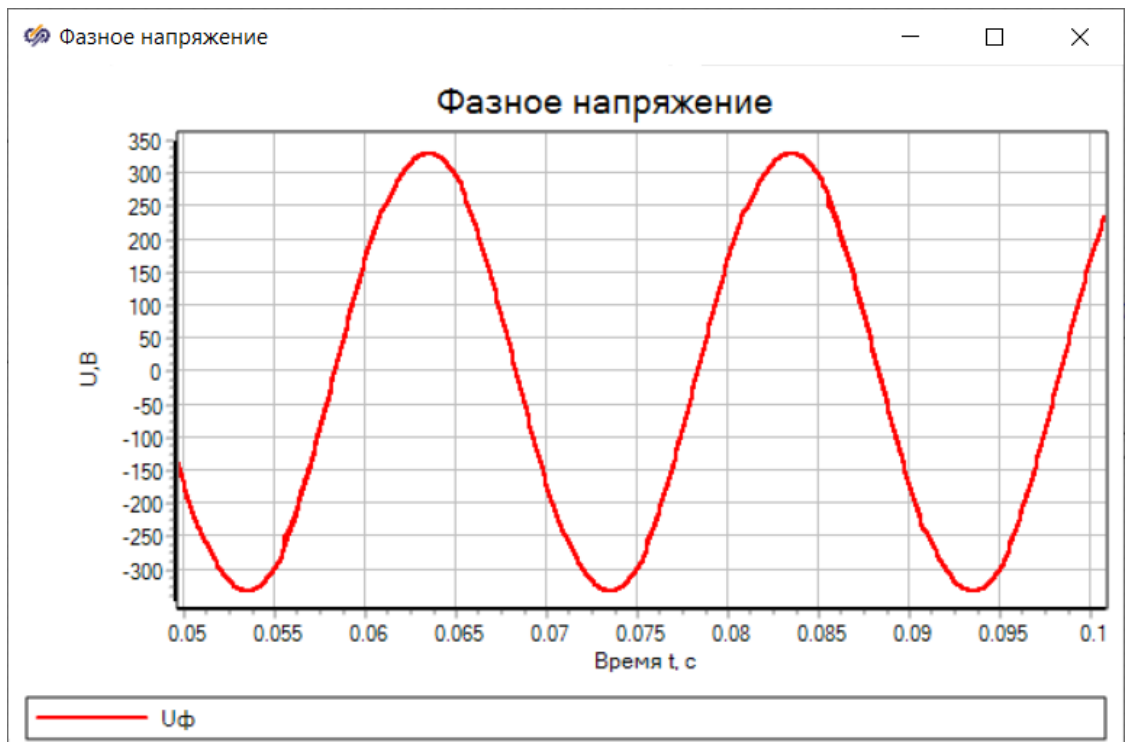


Рисунок 52 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=10$  представлены на рисунках 53-55.

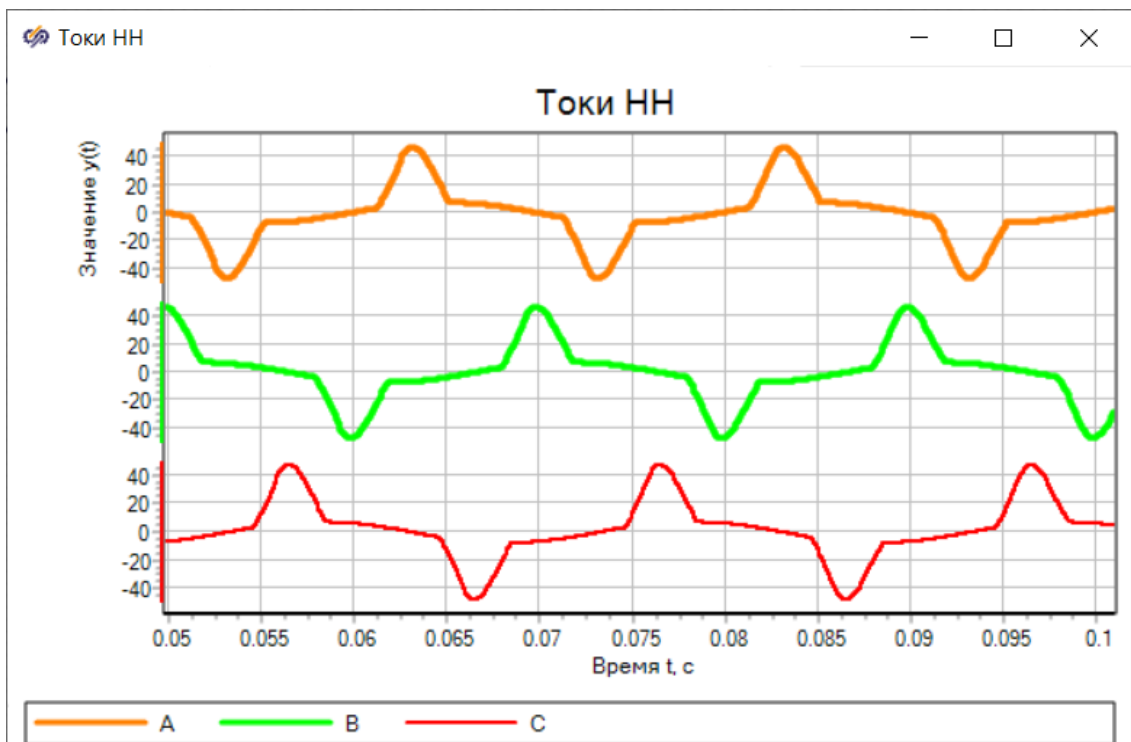


Рисунок 53 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , D/Y

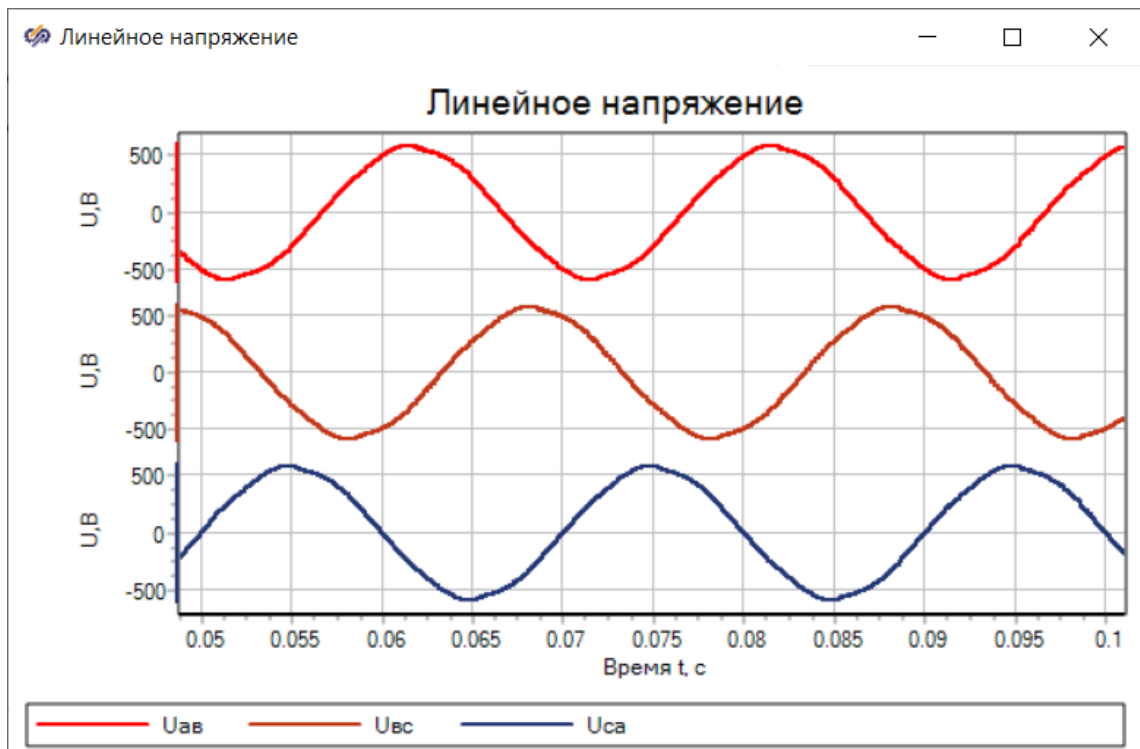


Рисунок 54 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , D/Y

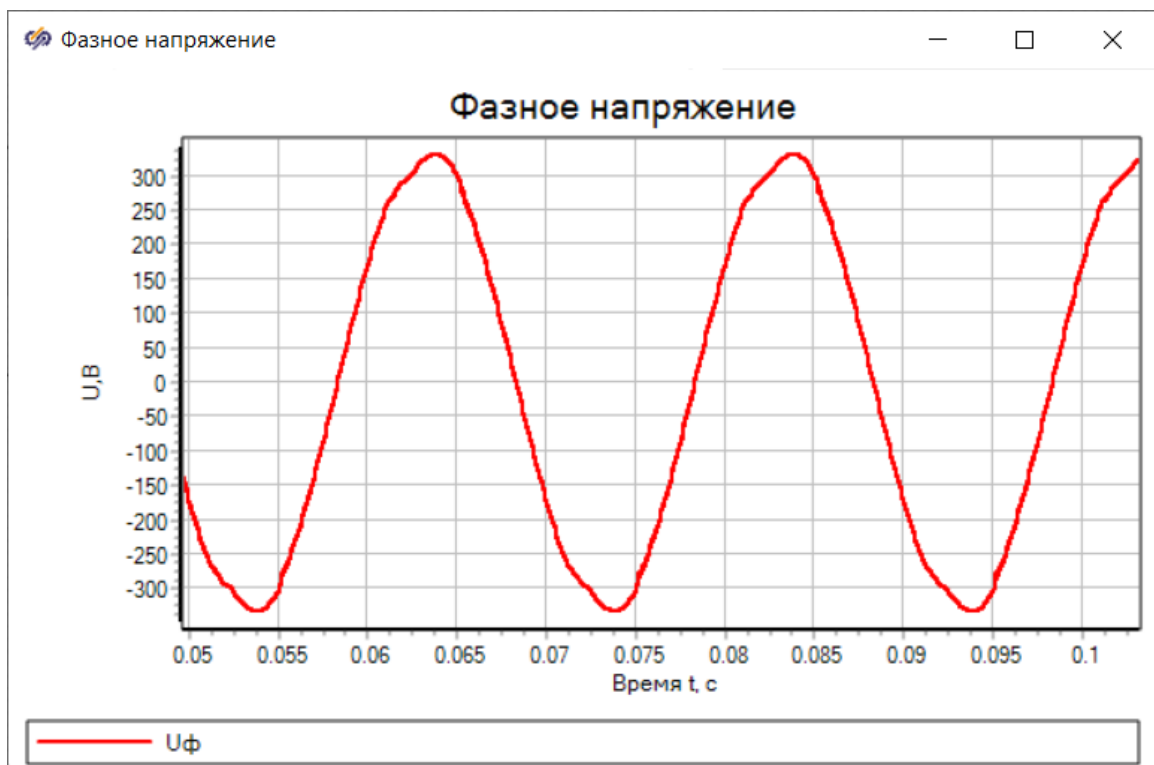


Рисунок 55 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=50$  представлены на рисунках 56-58.

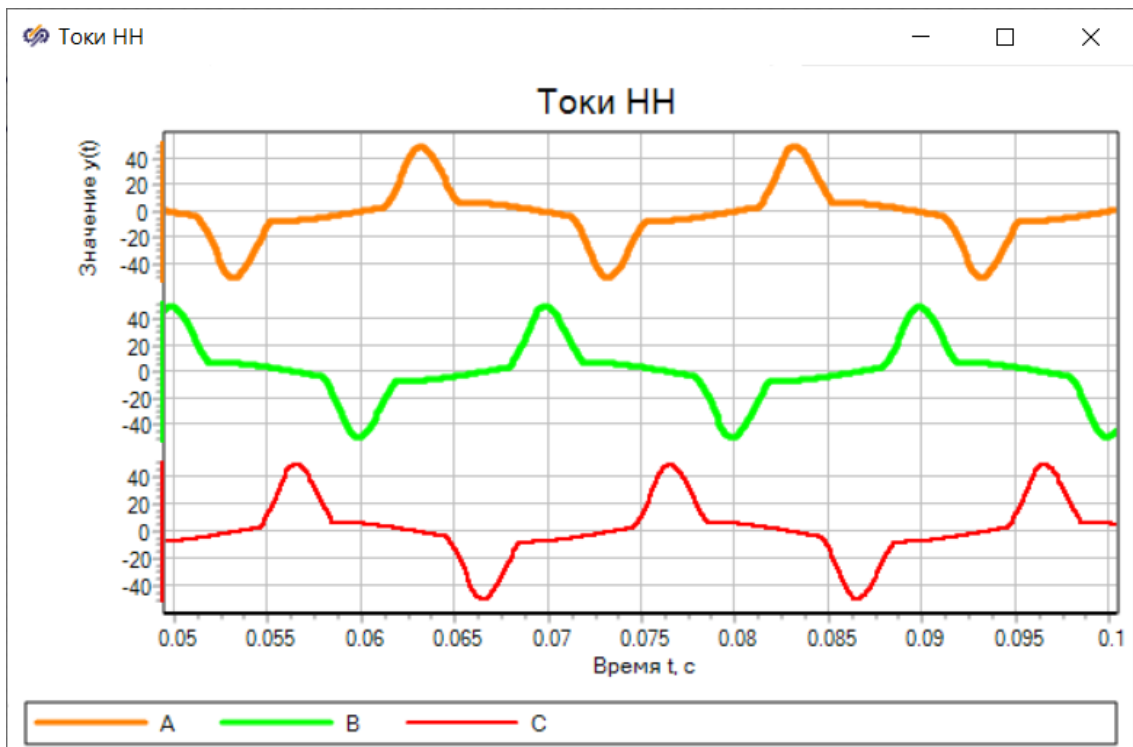


Рисунок 56 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , D/Y

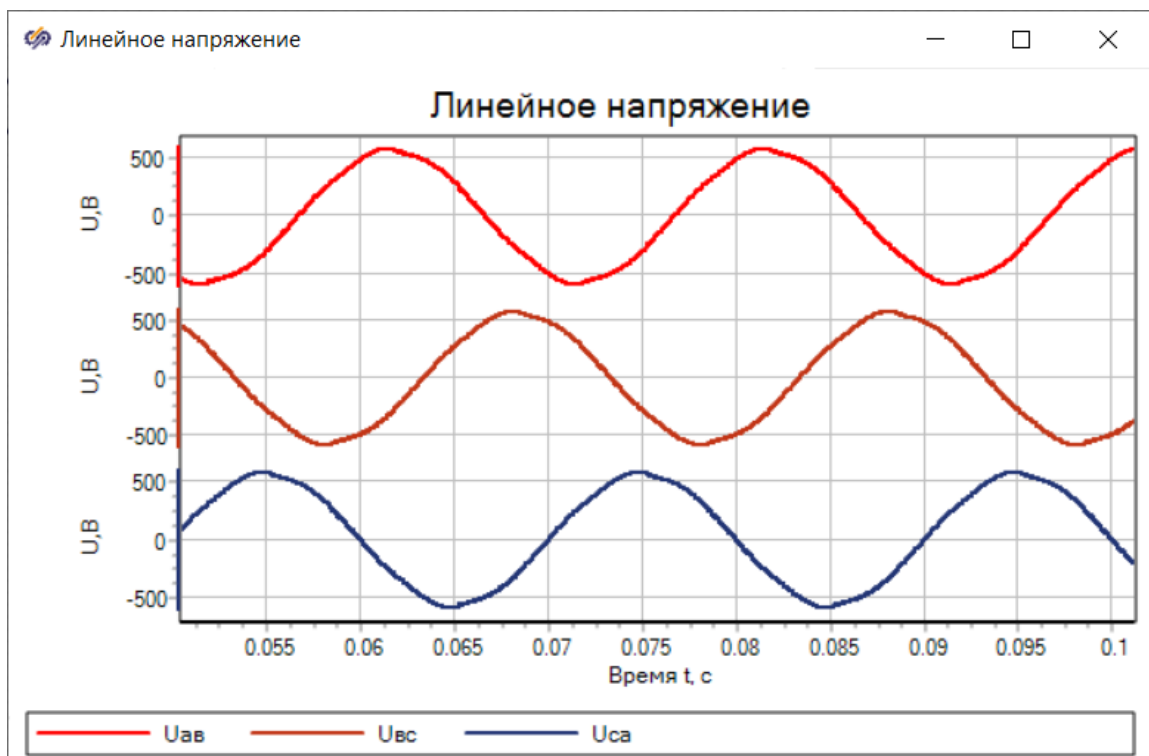


Рисунок 57 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , D/Y

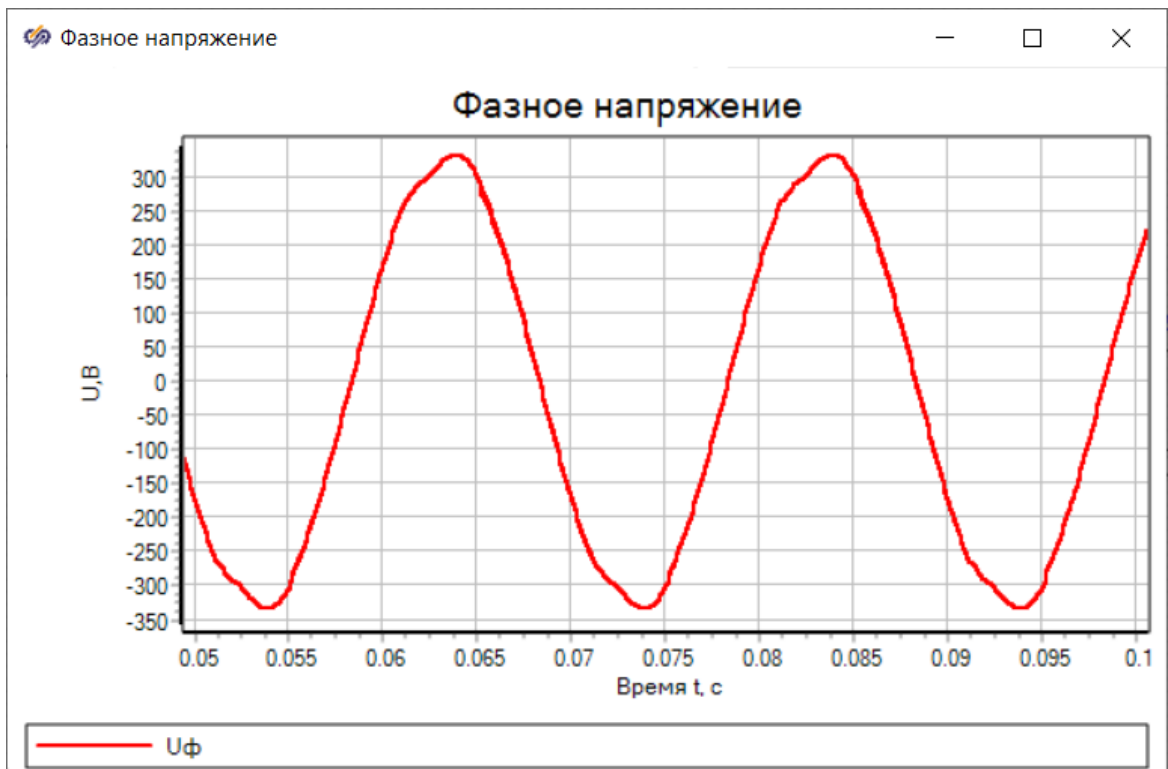


Рисунок 58 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , D/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=100$  представлены на рисунках 59-61.

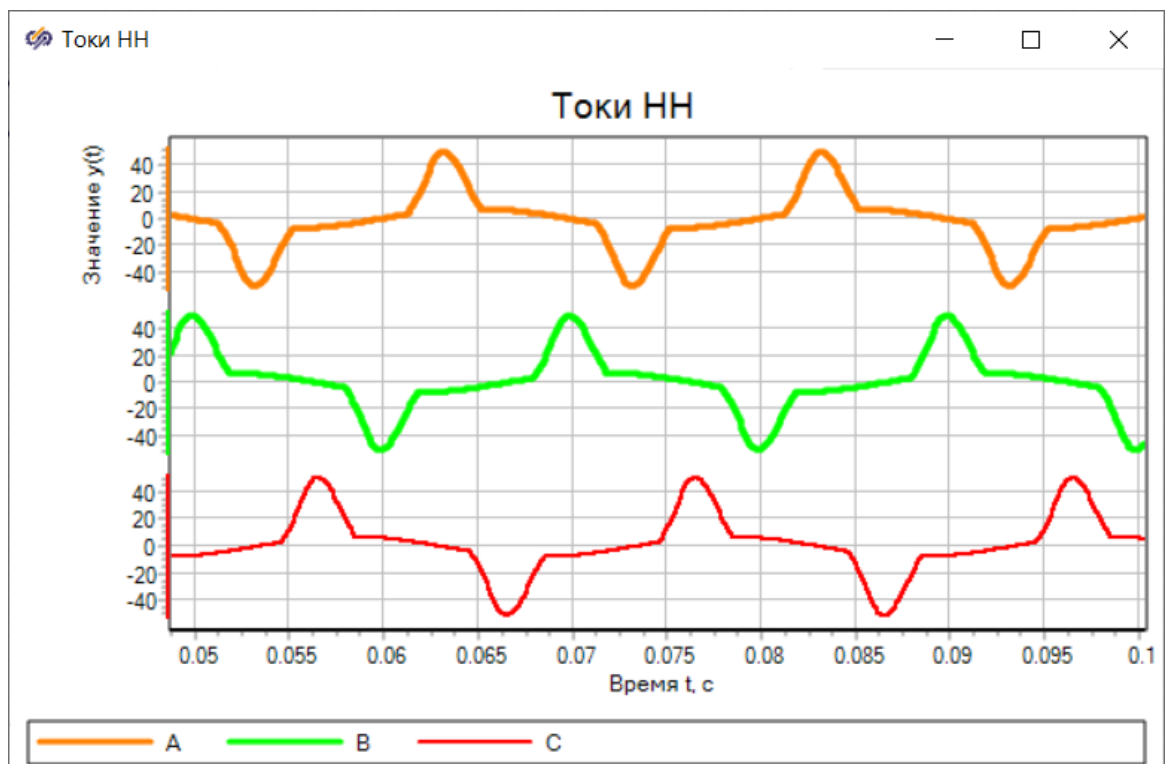


Рисунок 59 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , D/Y

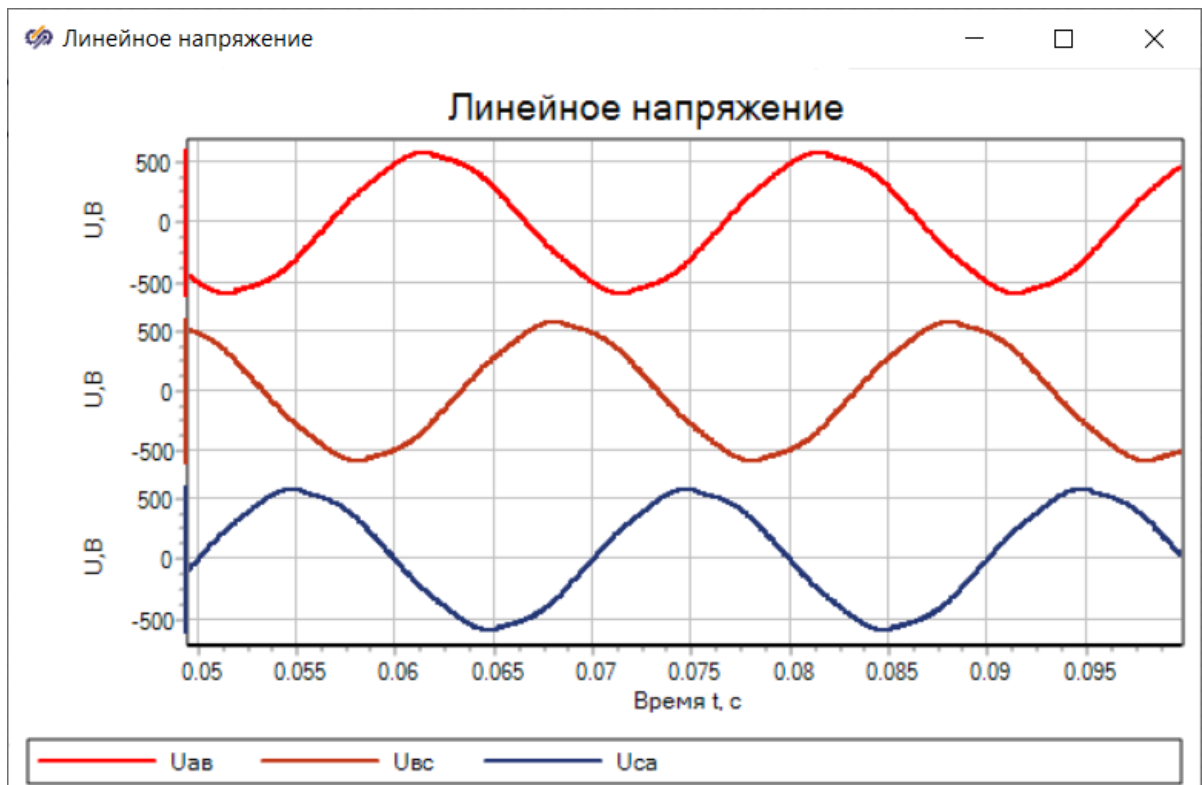


Рисунок 60 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , D/Y

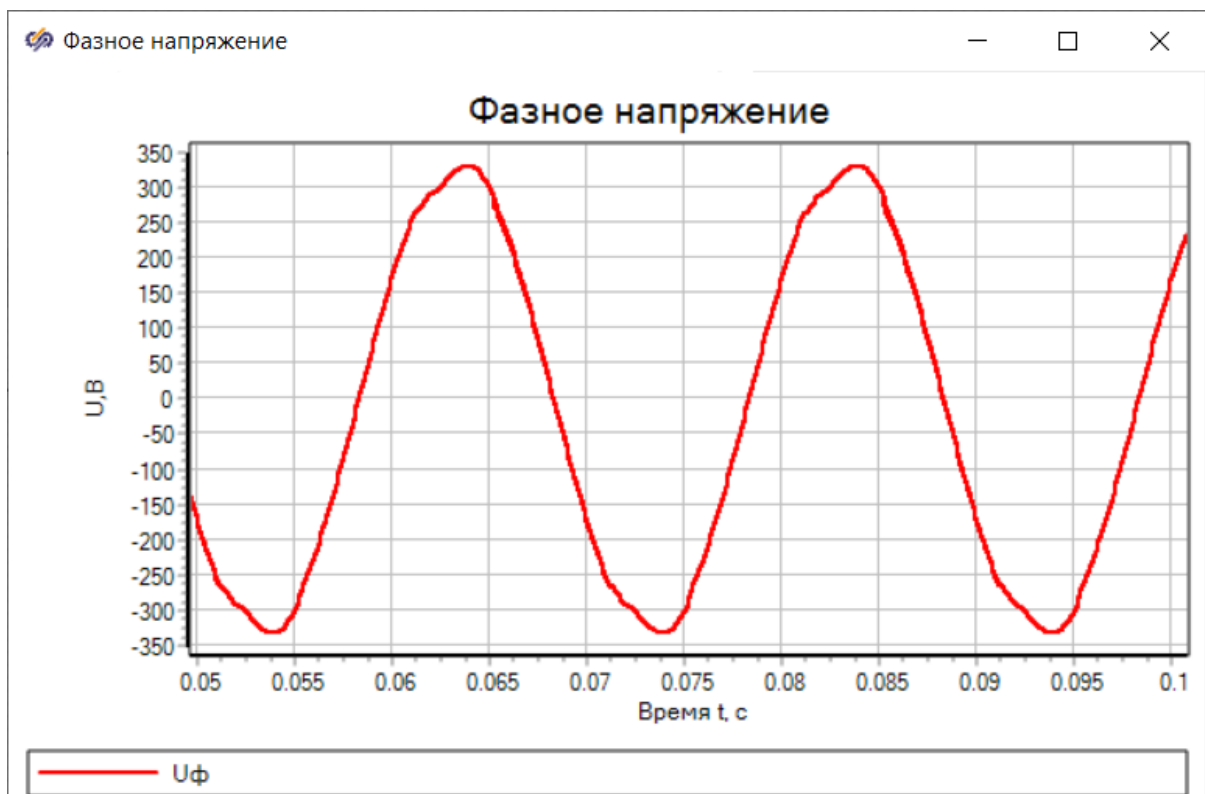


Рисунок 61 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , D/Y

Далее замеры проводятся при количестве электроприемников в одной линии  $n$ : 1,10,50,100, доли нелинейной нагрузки  $k_n=40\%$  и соединение обмоток трансформатора  $Y/Y$ .

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=1$  представлены на рисунках 62-64.

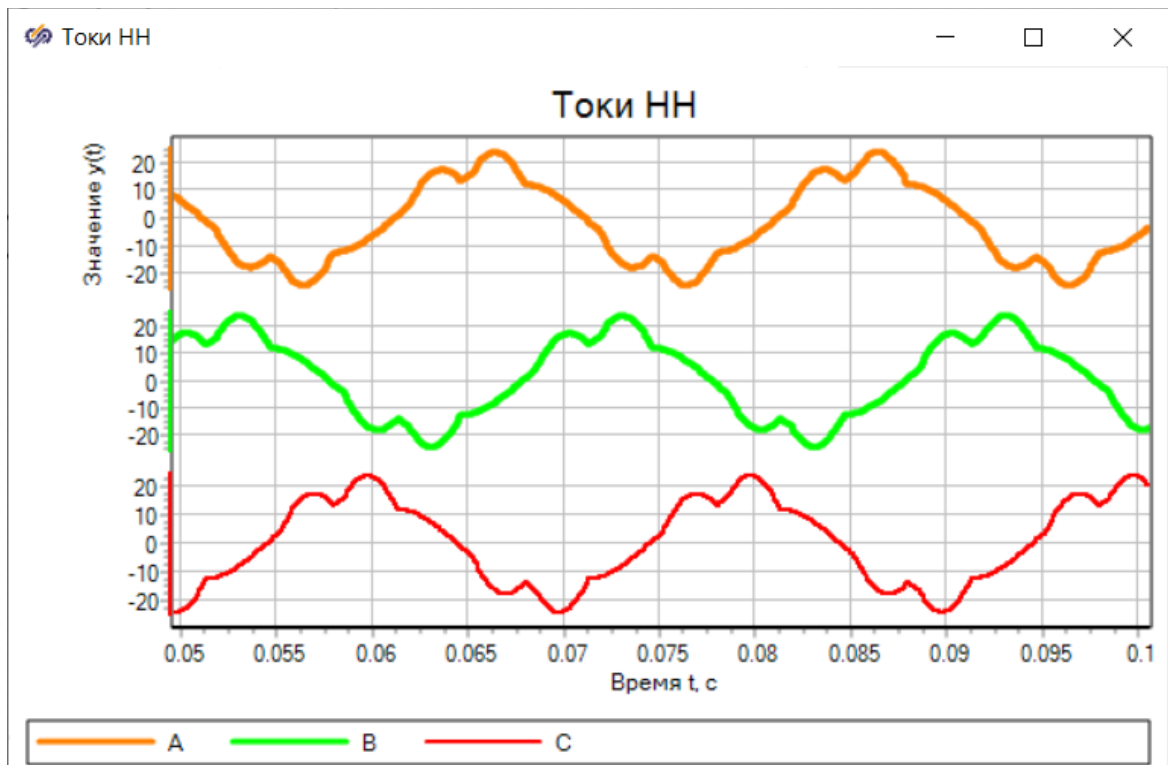


Рисунок 62 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ ,  $Y/Y$

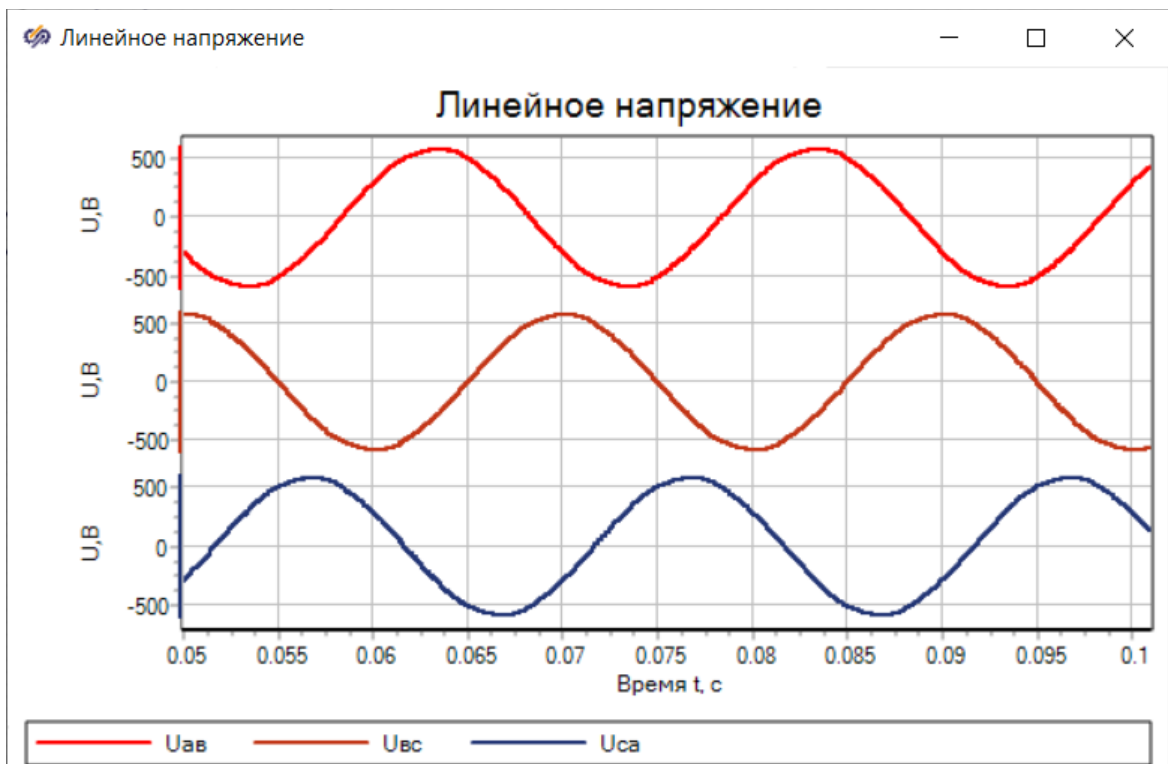


Рисунок 63 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ ,  $Y/Y$

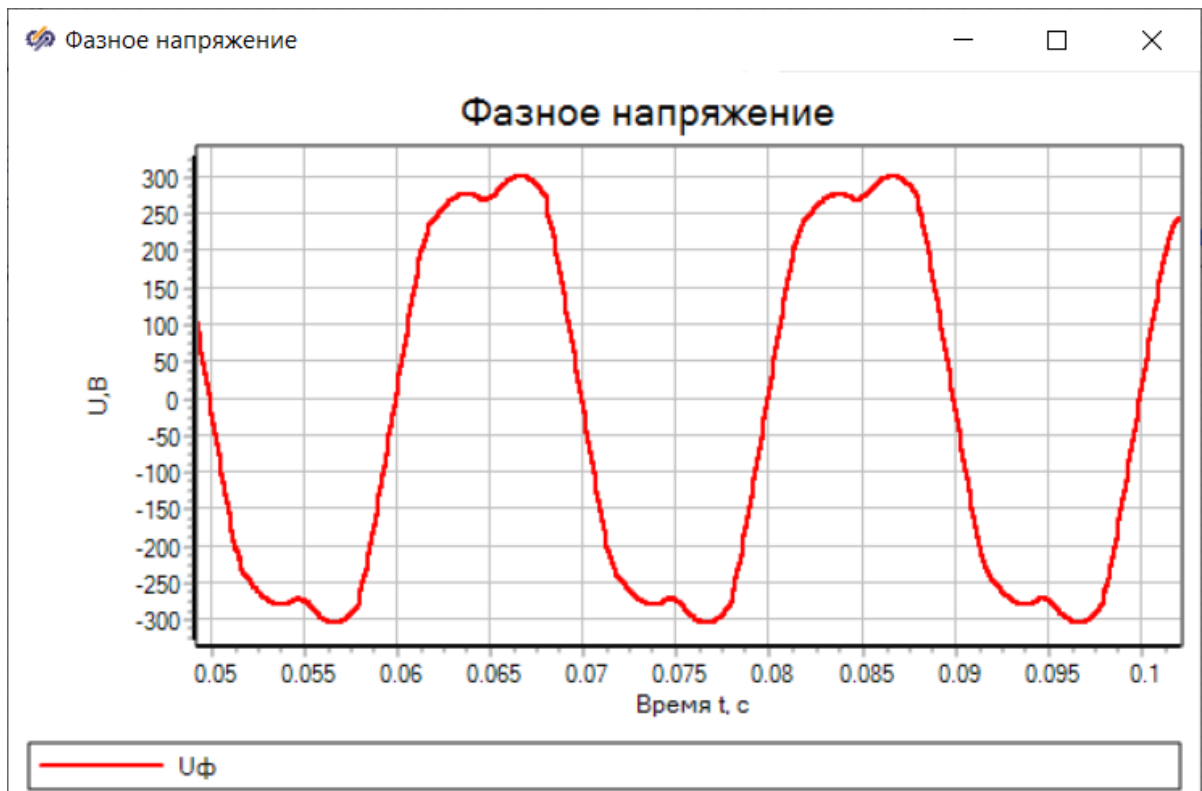


Рисунок 64 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=1$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=10$  представлены на рисунках 65-67.

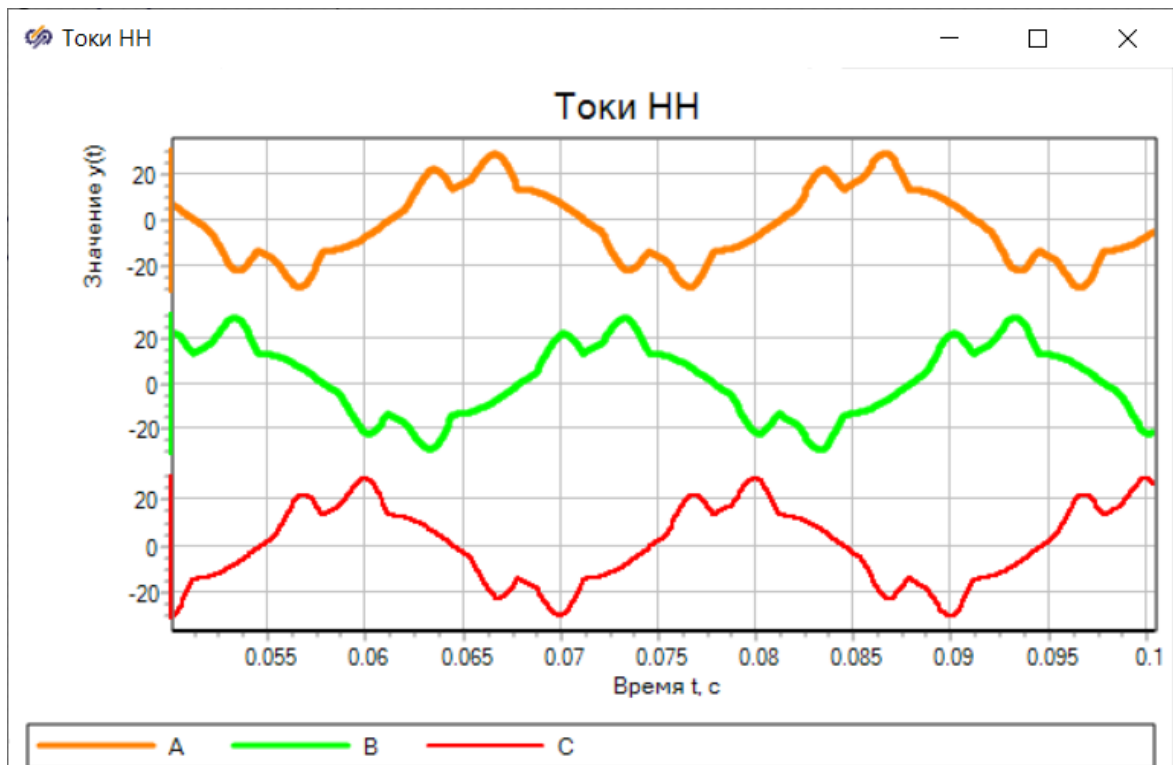


Рисунок 65 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , Y/Y

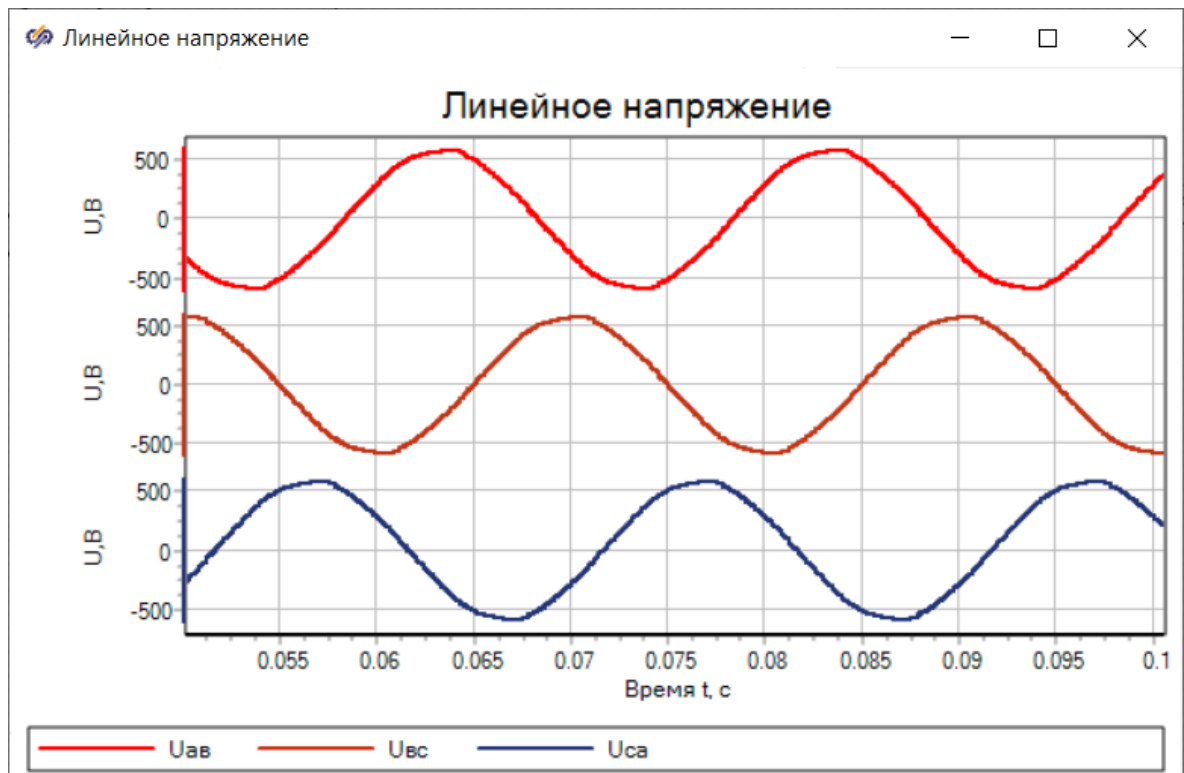


Рисунок 66 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , Y/Y



Рисунок 67 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=10$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=50$  представлены на рисунках 68-70.



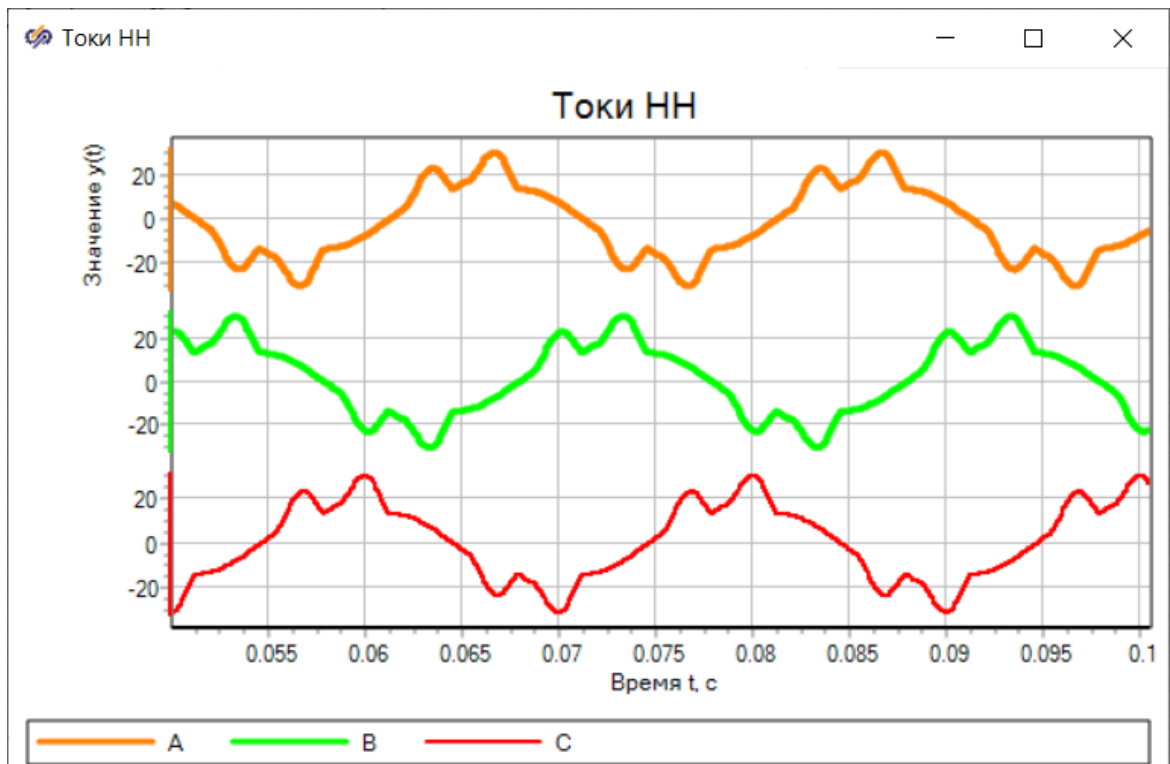


Рисунок 68 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , Y/Y

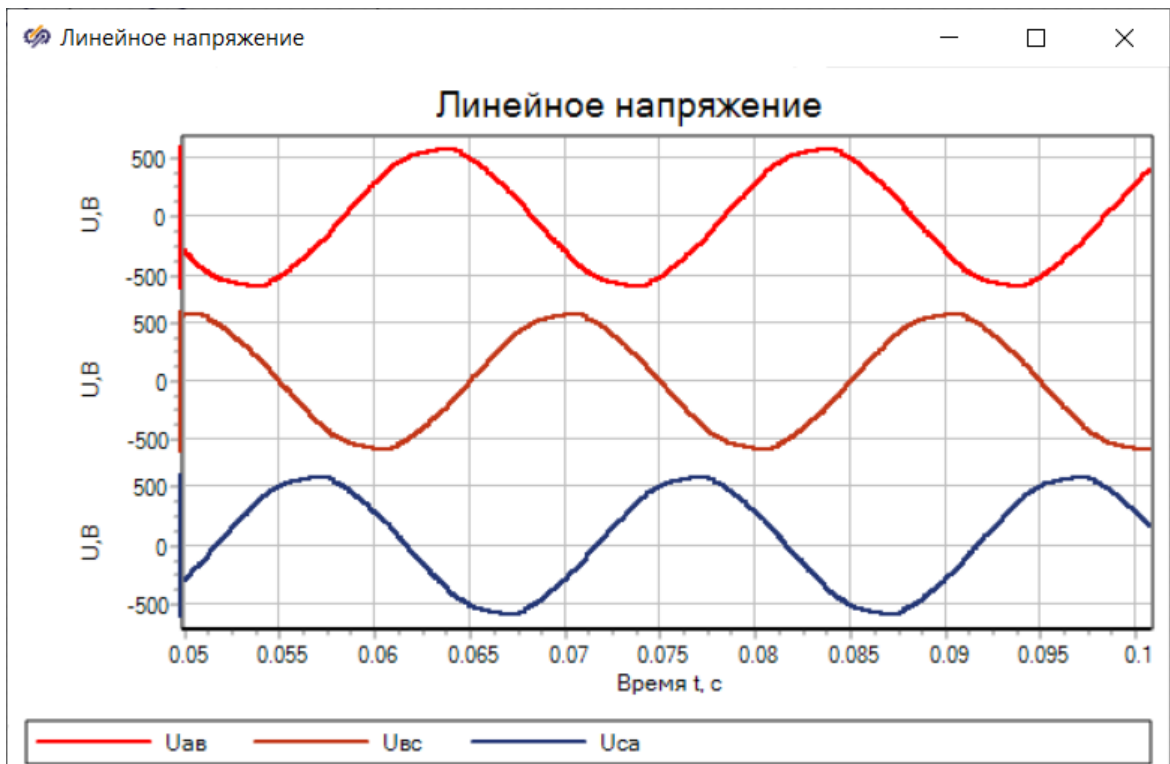


Рисунок 69 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , Y/Y

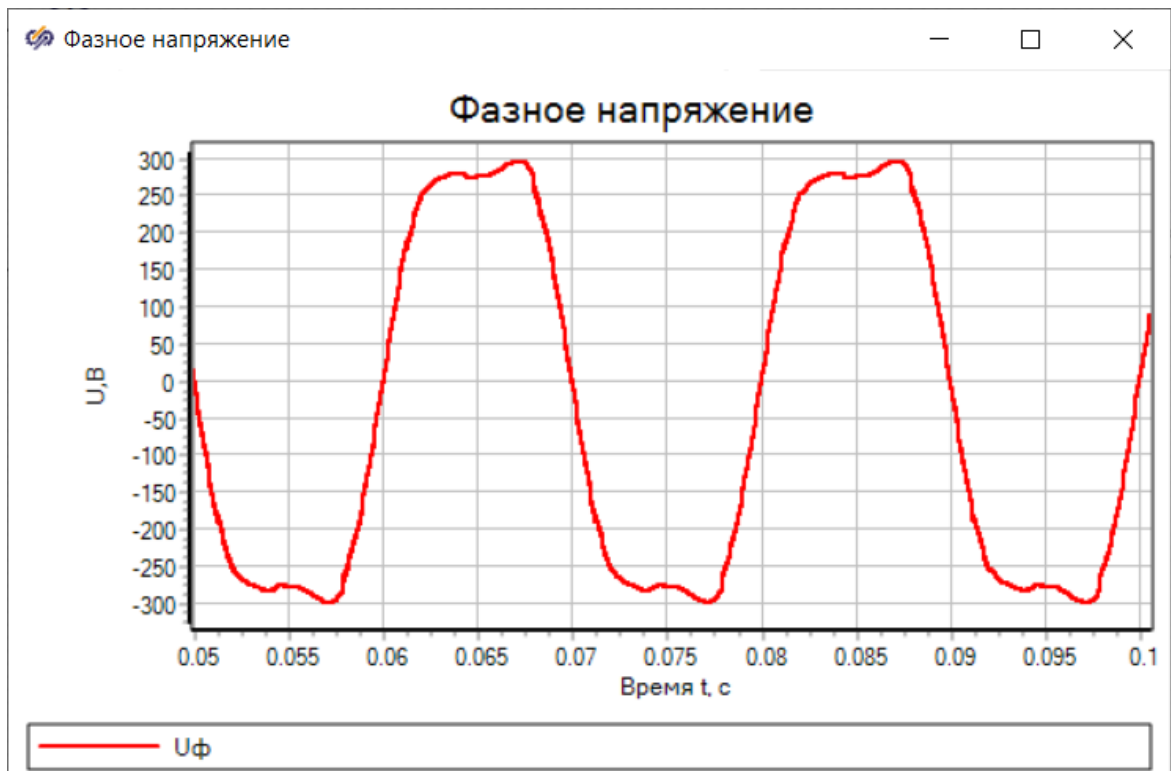


Рисунок 70 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=50$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=40\%$  и  $n=100$  представлены на рисунках 71-73.

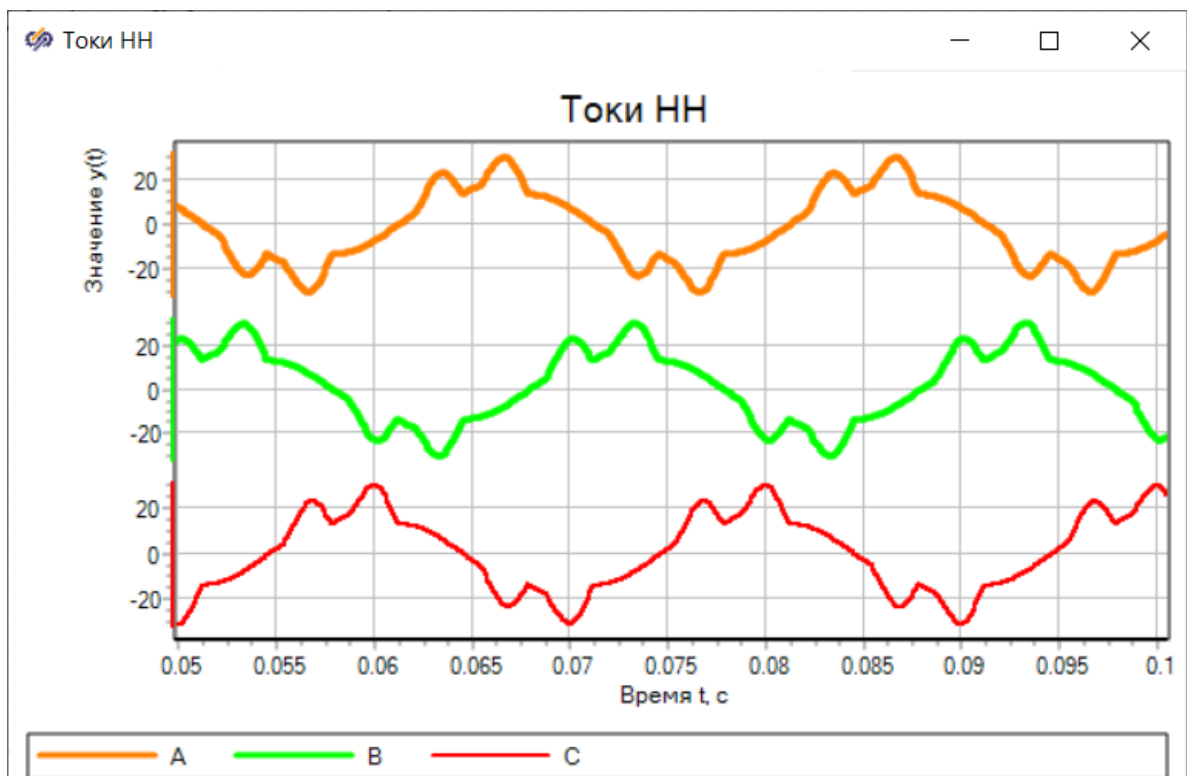


Рисунок 71 – Линейный ток при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , Y/Y

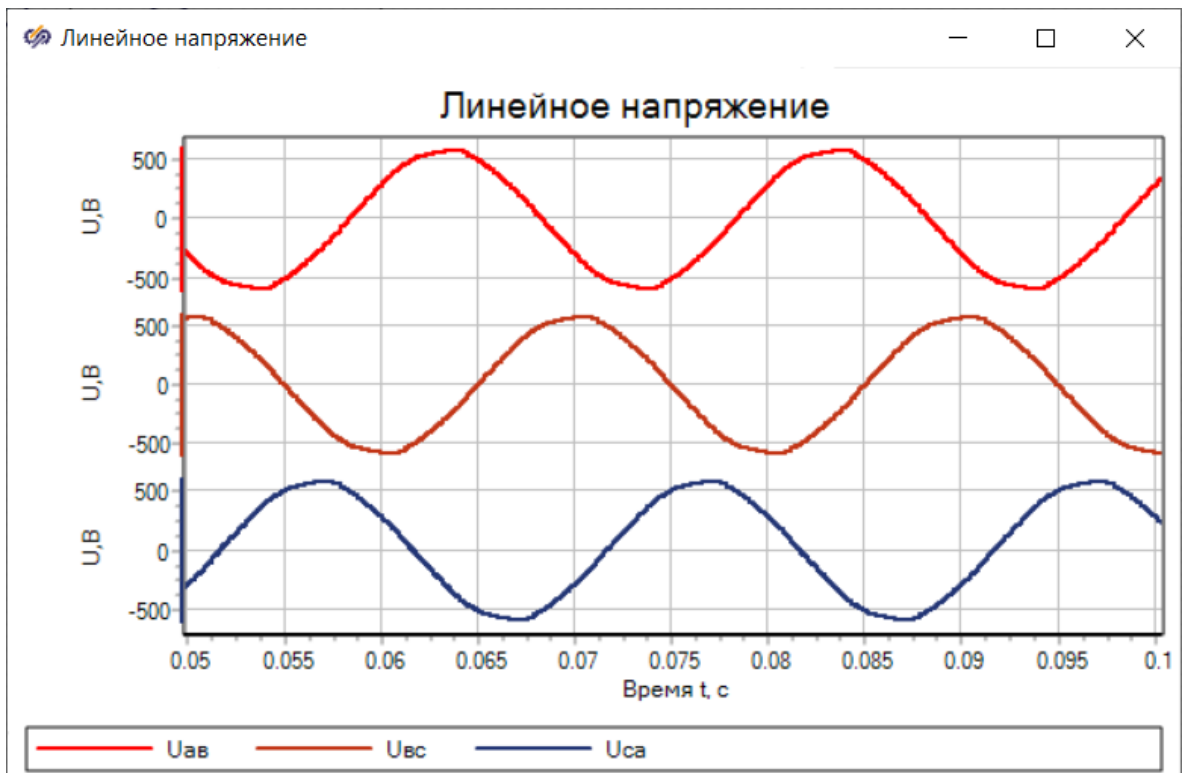


Рисунок 72 – Линейное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , Y/Y

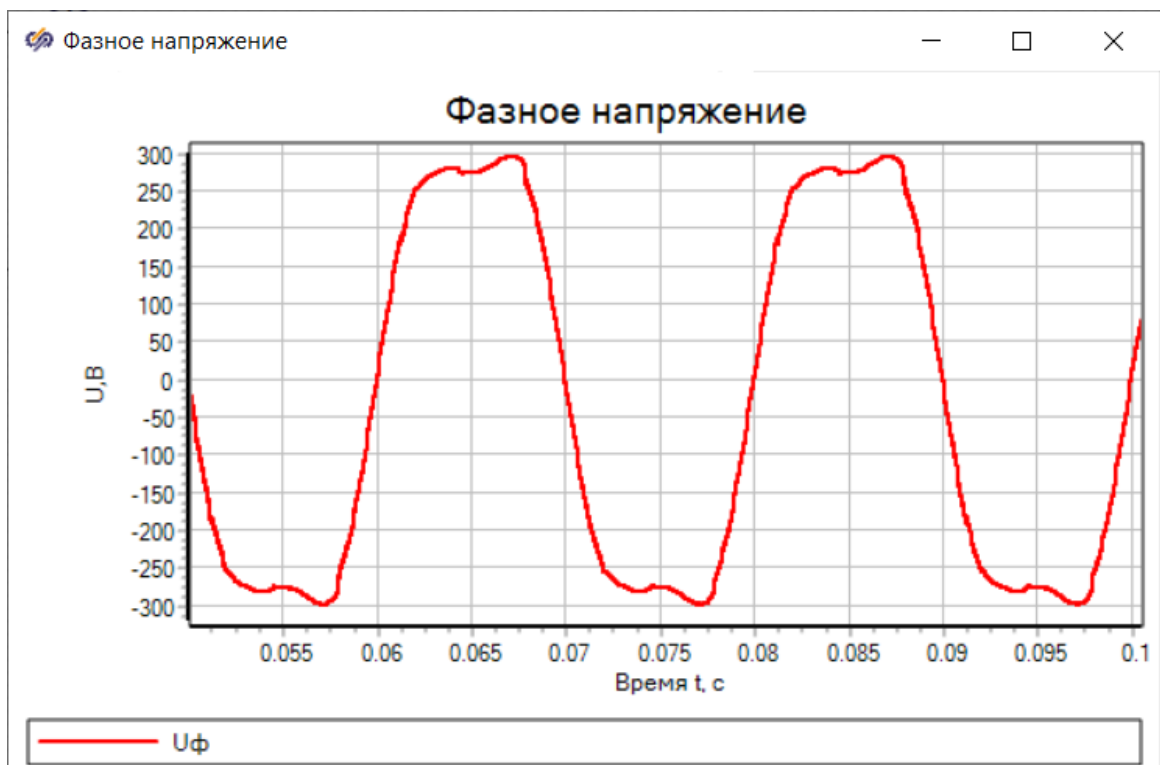


Рисунок 73 – Фазное напряжение при  $k_n=40\%$  и  $n=100$ , Y/Y

Далее замеры проводятся при количестве электроприемников в одной линии  $n$ : 1,10,50,100, доли нелинейной нагрузки  $k_n=70\%$  и соединение обмоток трансформатора Y/Y.

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=1$  представлены на рисунках 74-76.

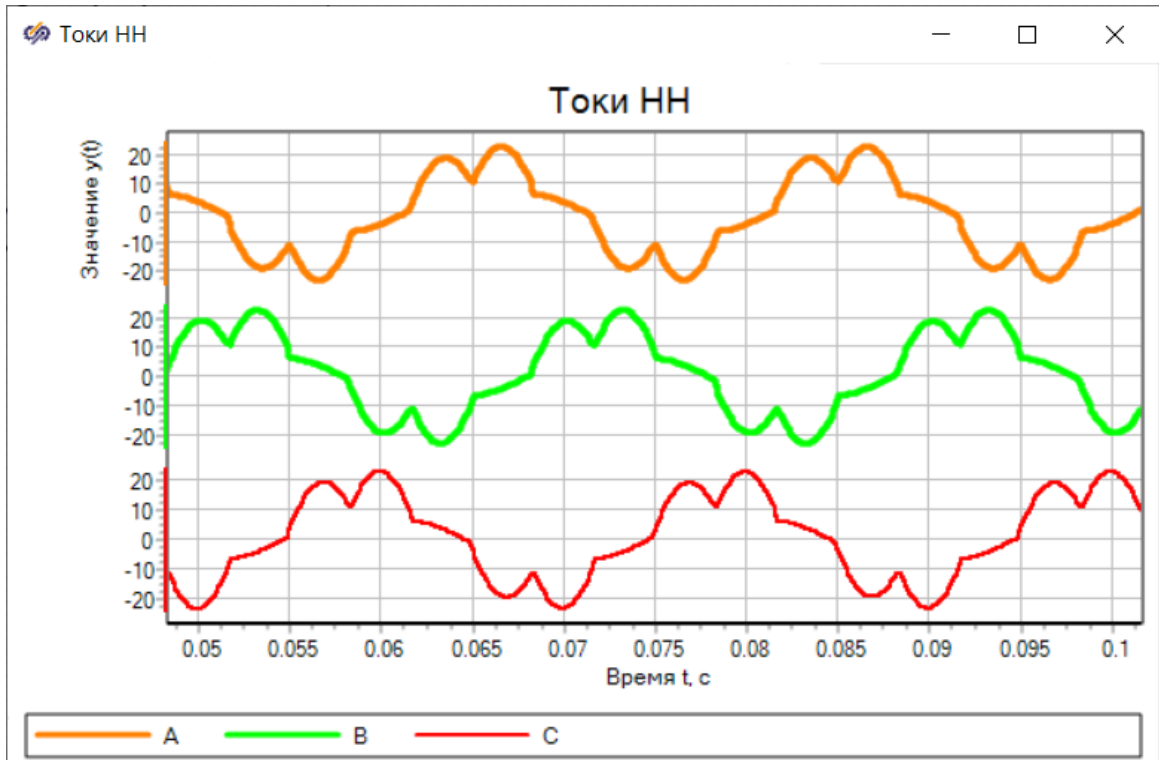


Рисунок 74 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , Y/Y

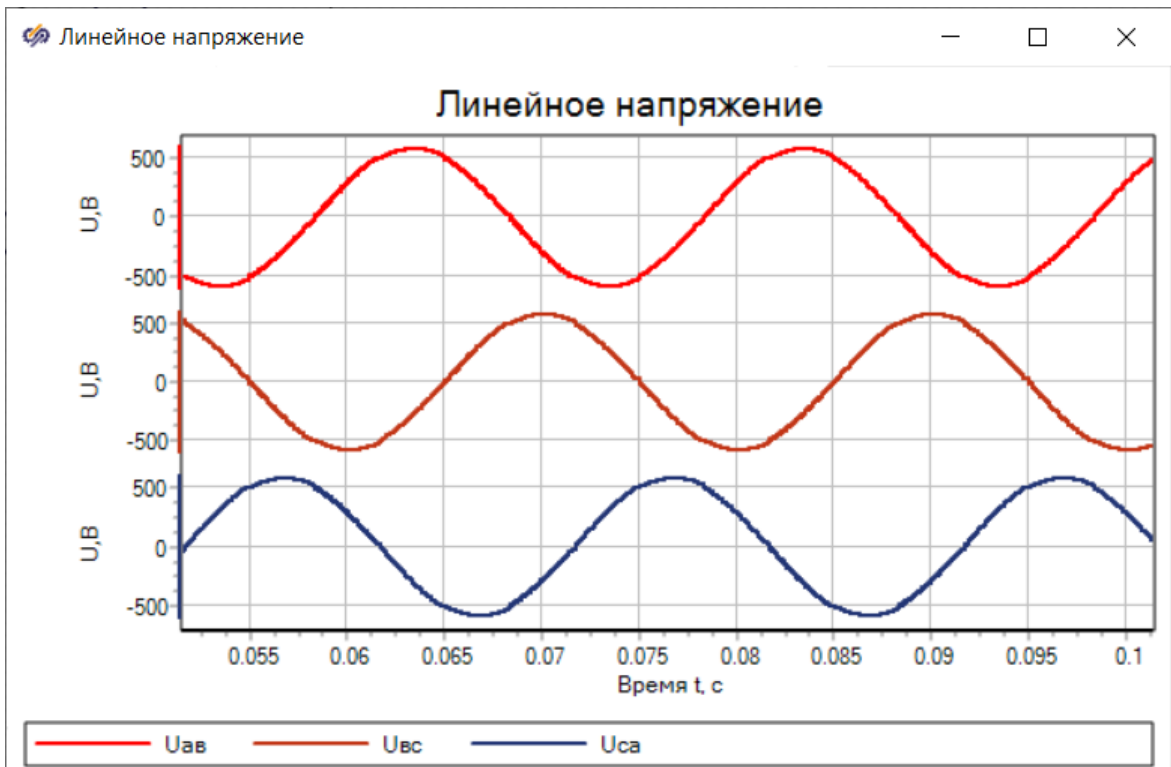


Рисунок 75 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , Y/Y

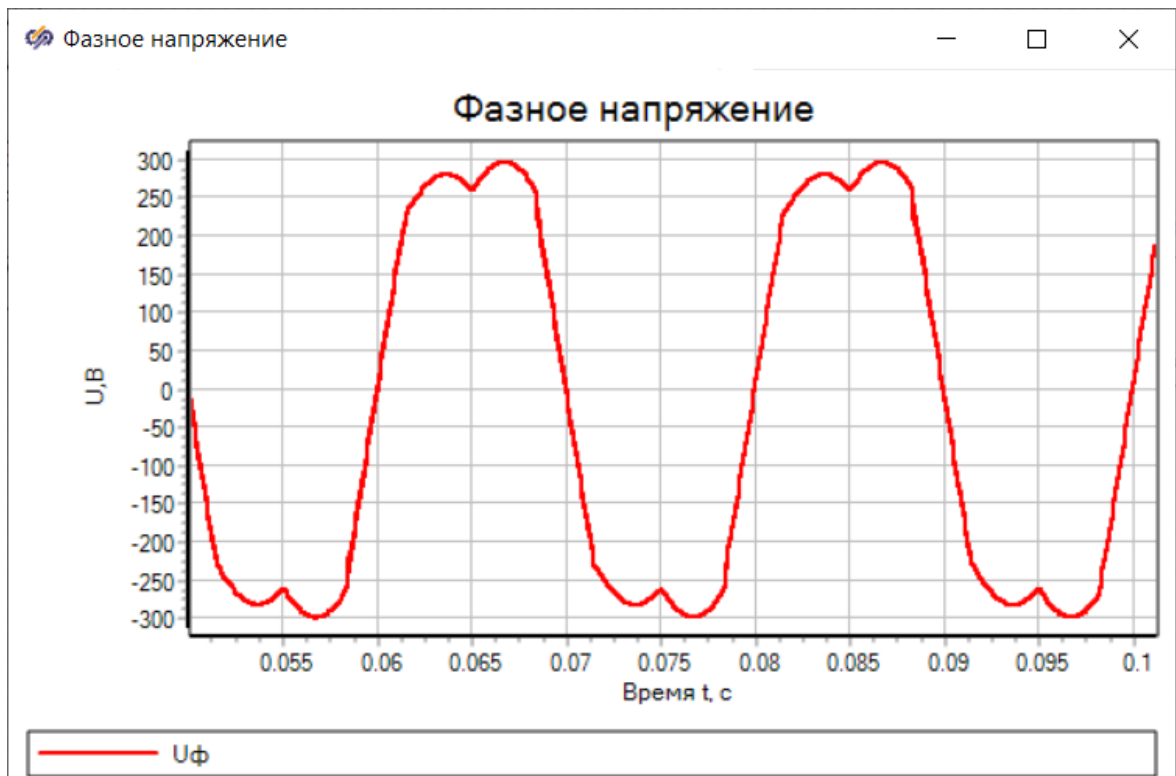


Рисунок 76 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=1$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=10$  представлены на рисунках 77-79.

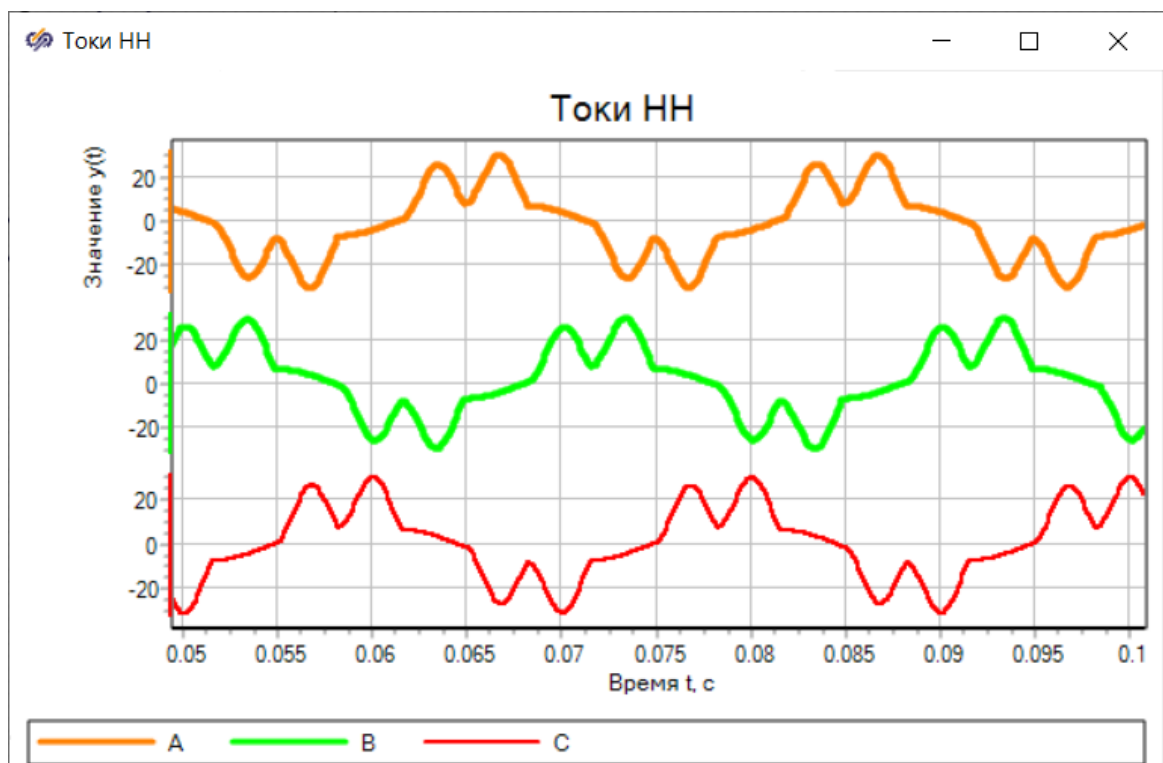


Рисунок 77 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , Y/Y

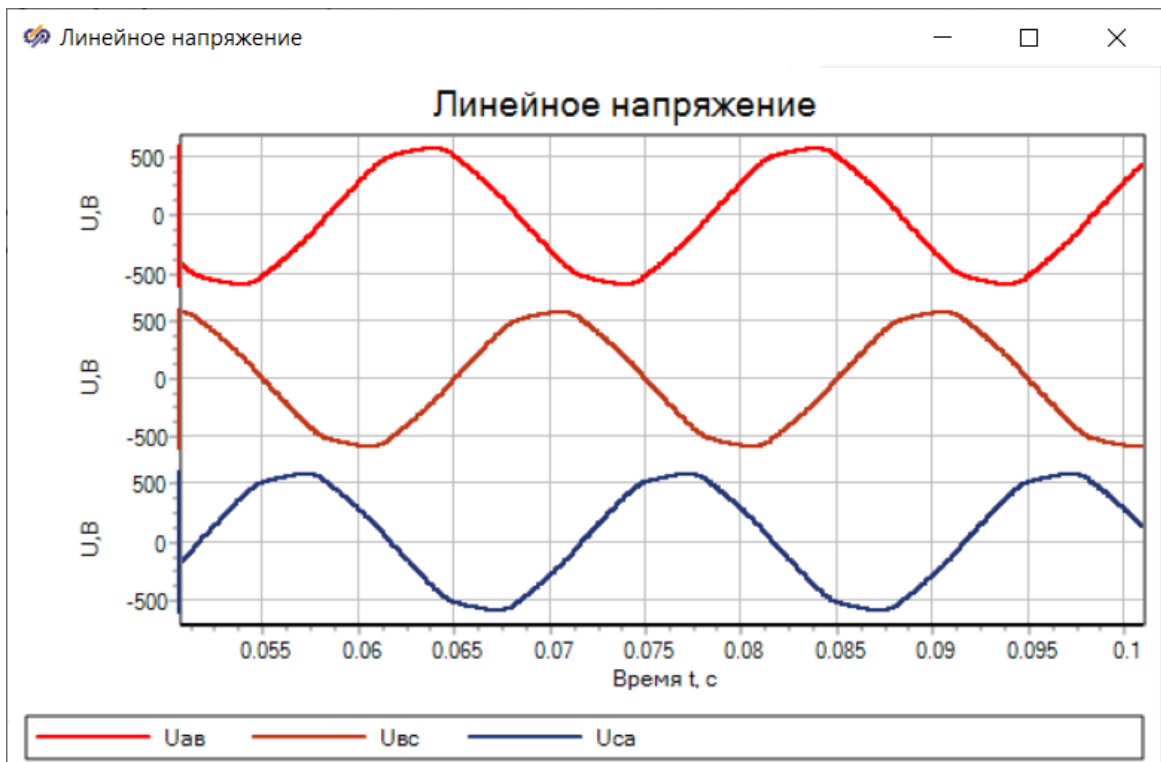


Рисунок 78 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , Y/Y

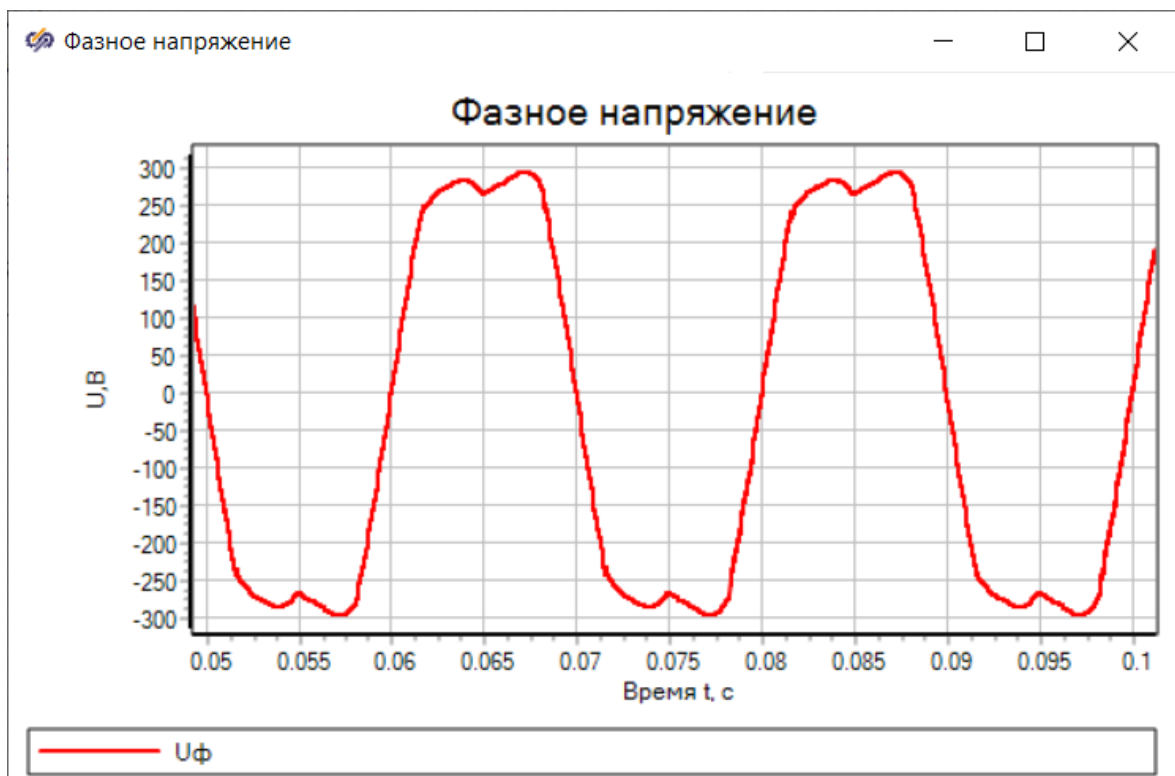


Рисунок 79 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=10$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=50$  представлены на рисунках 80-82.

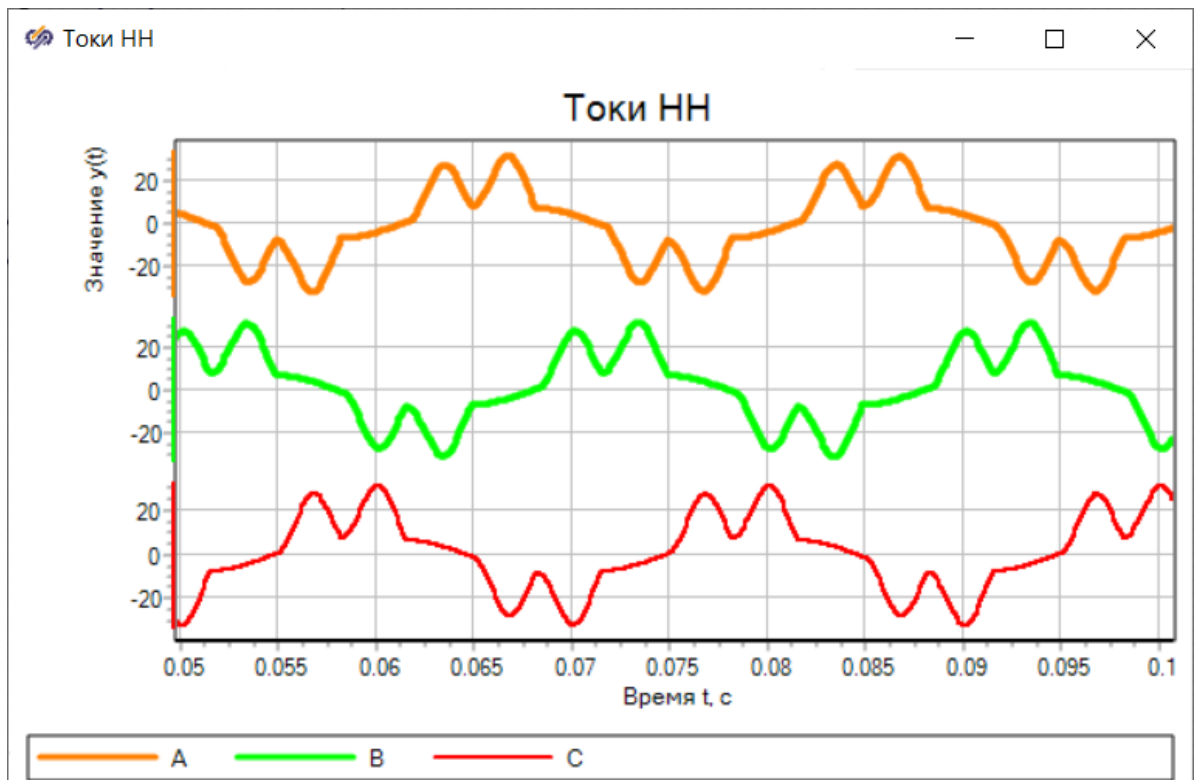


Рисунок 80 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , Y/Y

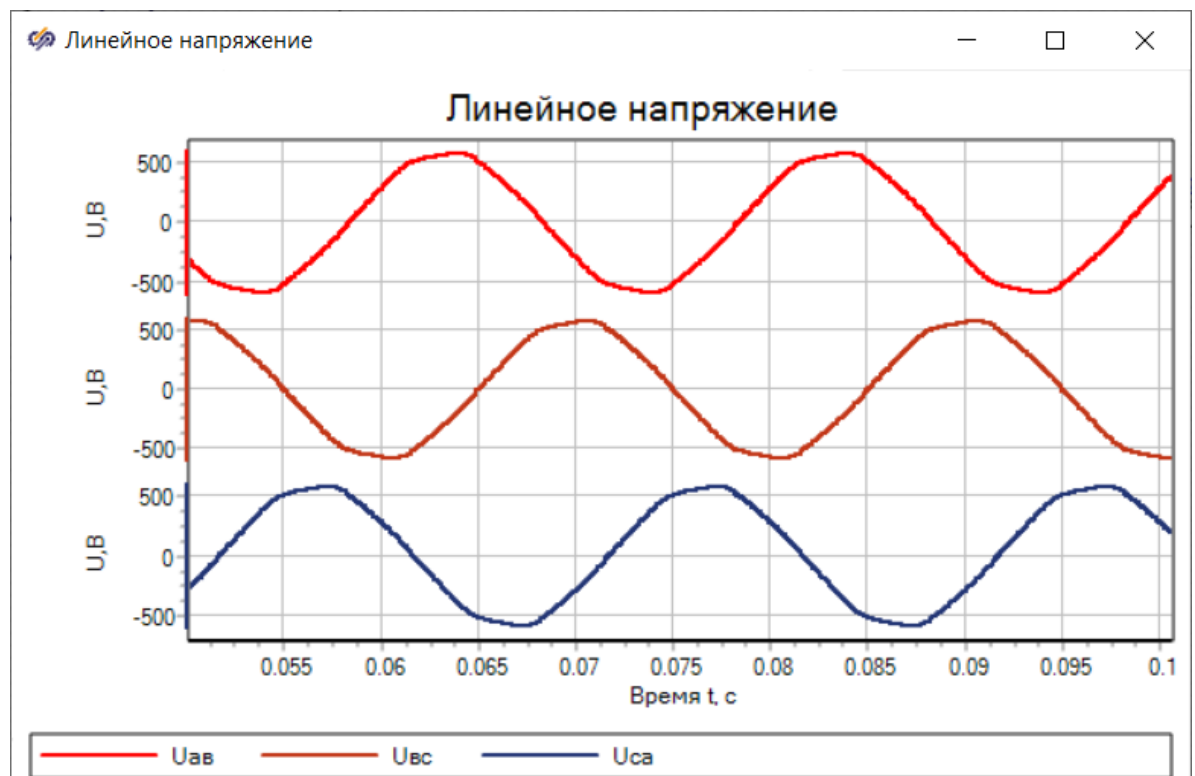


Рисунок 81 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , Y/Y

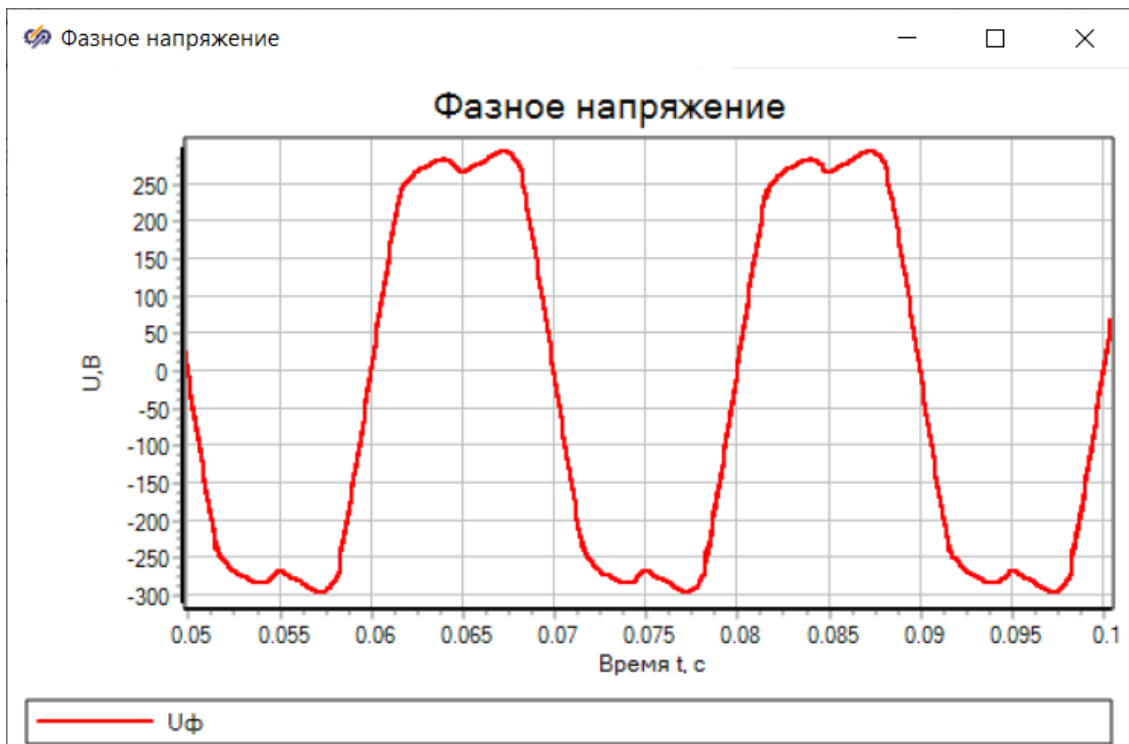


Рисунок 82 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=50$ , Y/Y

Результаты исследования при  $k_n=70\%$  и  $n=100$  представлены на рисунках 83-85.

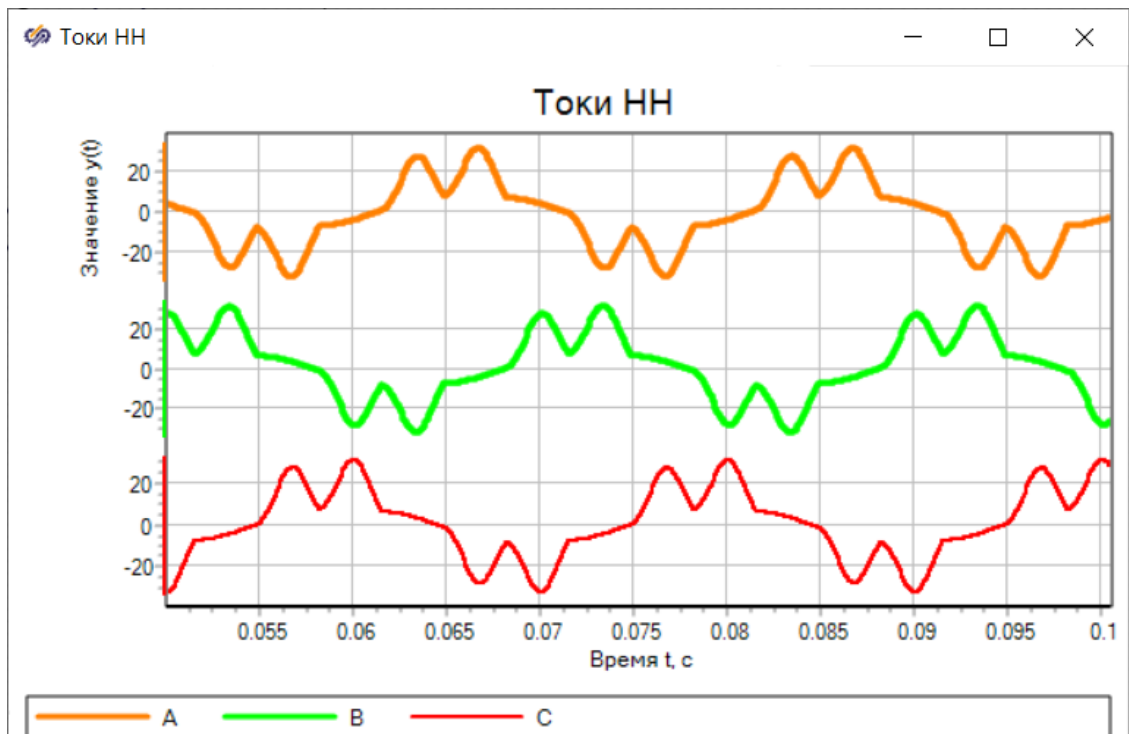


Рисунок 83 – Линейный ток при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , Y/Y



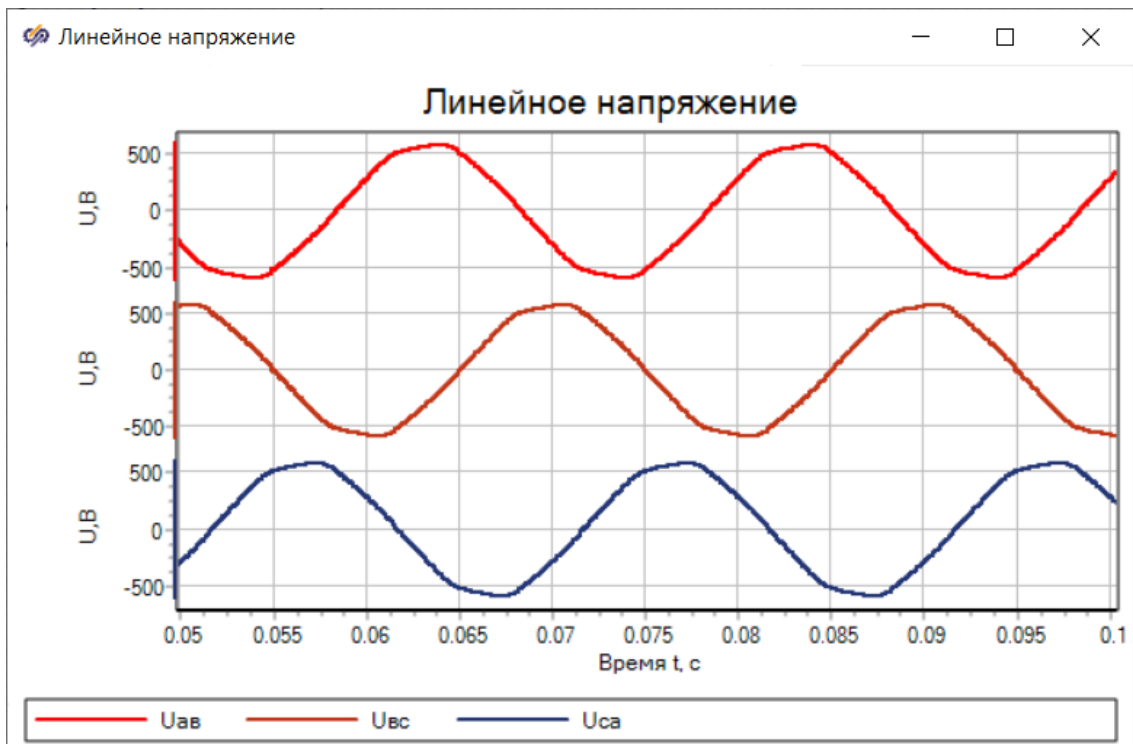


Рисунок 84 – Линейное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , Y/Y



Рисунок 85 – Фазное напряжение при  $k_n=70\%$  и  $n=100$ , Y/Y

Результаты спектрального анализа представлены на рисунках 86-93.

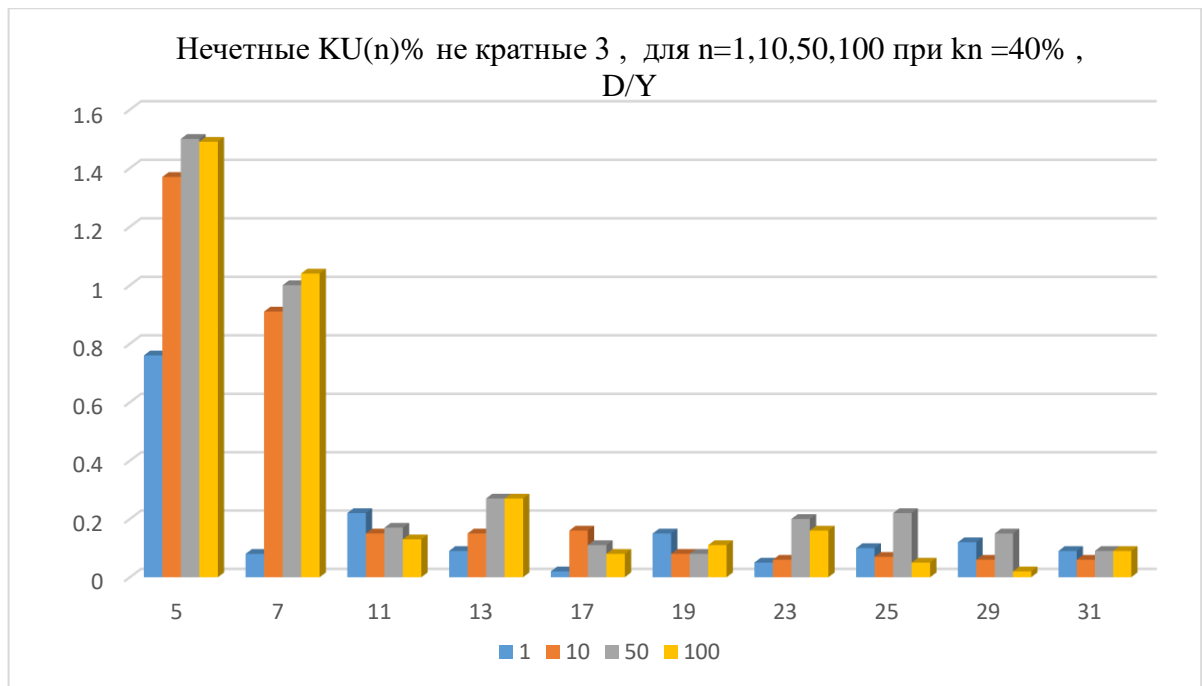


Рисунок 86 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих не кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_n = 40\%$ ,  $D/Y$

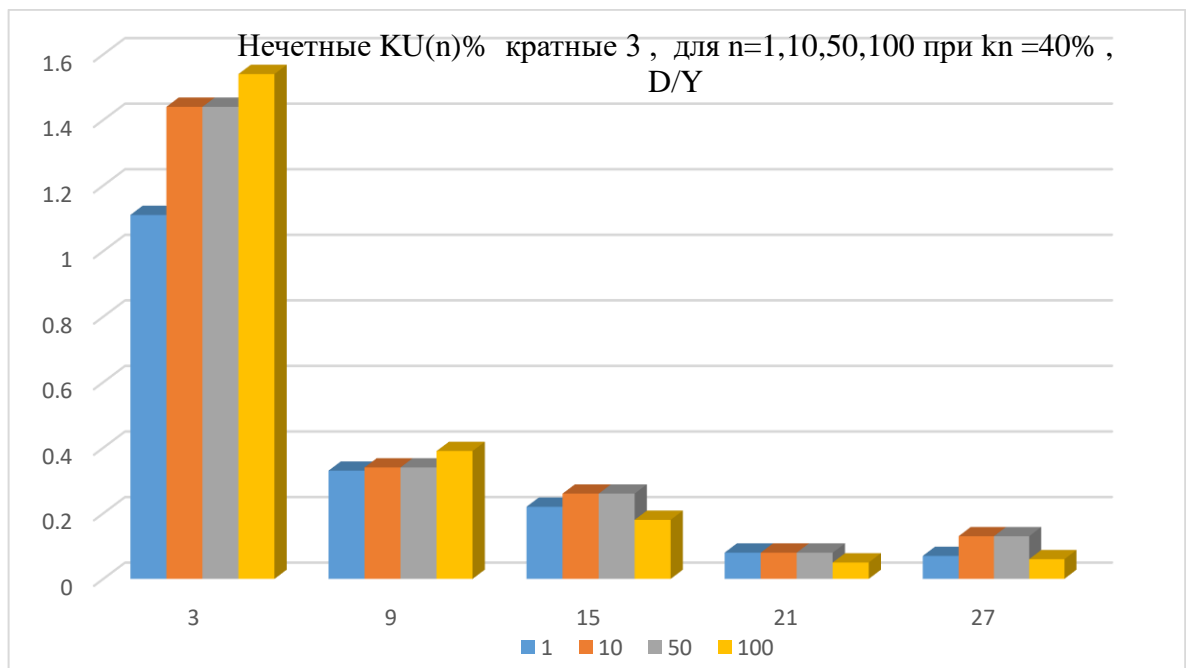


Рисунок 87 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_n = 40\%$ ,  $D/Y$

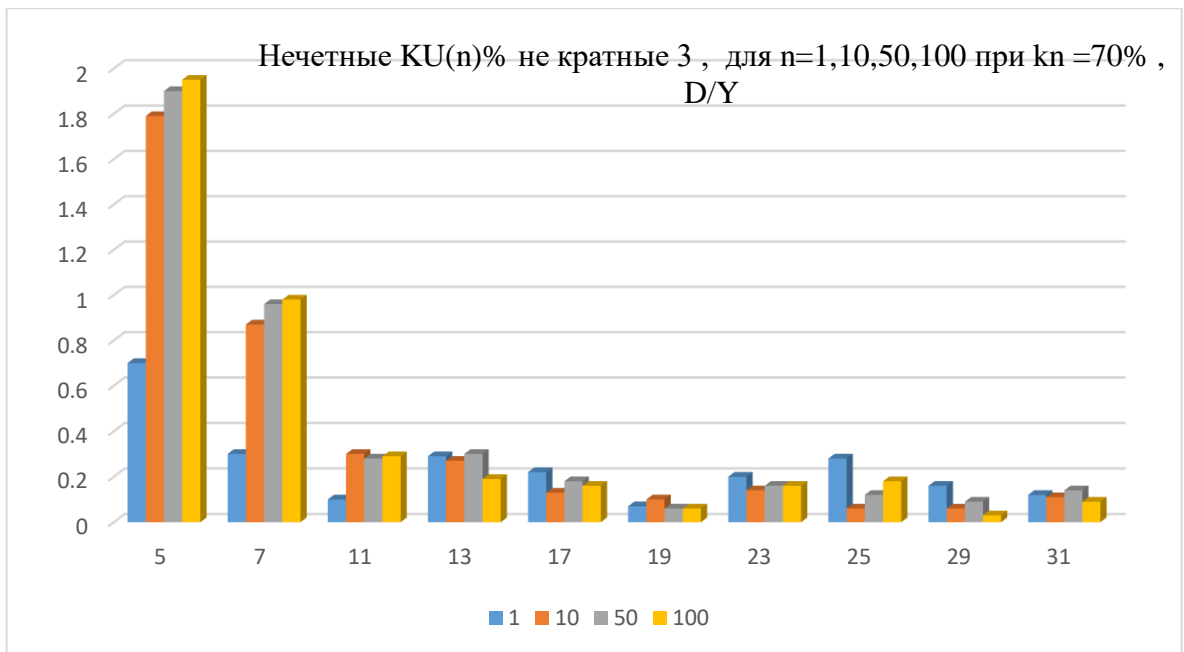


Рисунок 88 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих не кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $kn = 70\%$ ,  $D/Y$

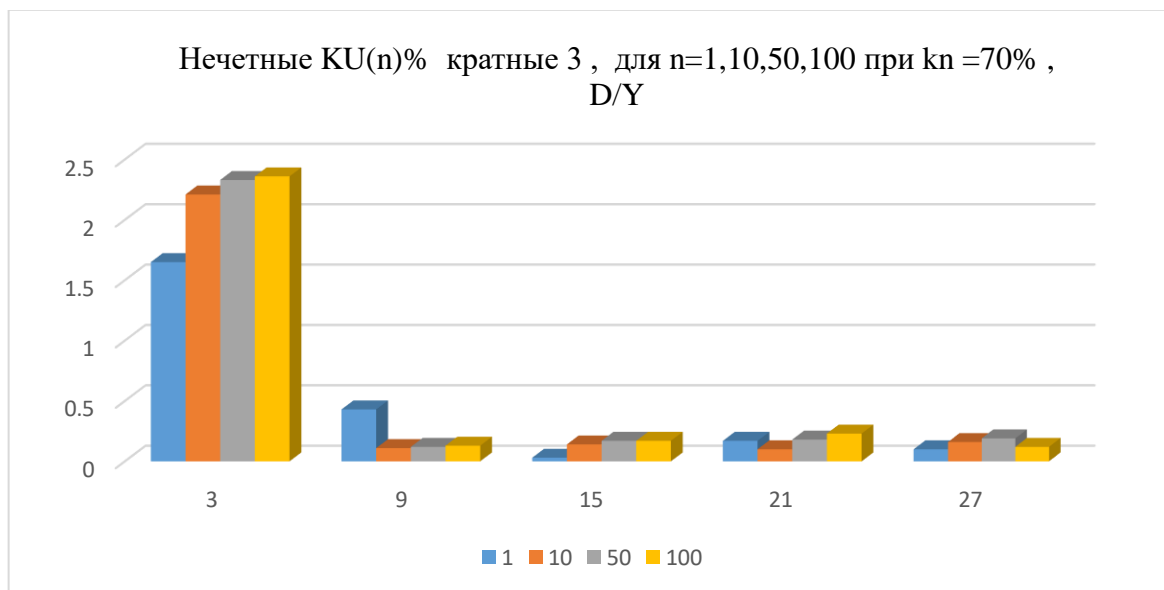


Рисунок 89 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $kn = 70\%$ ,  $D/Y$

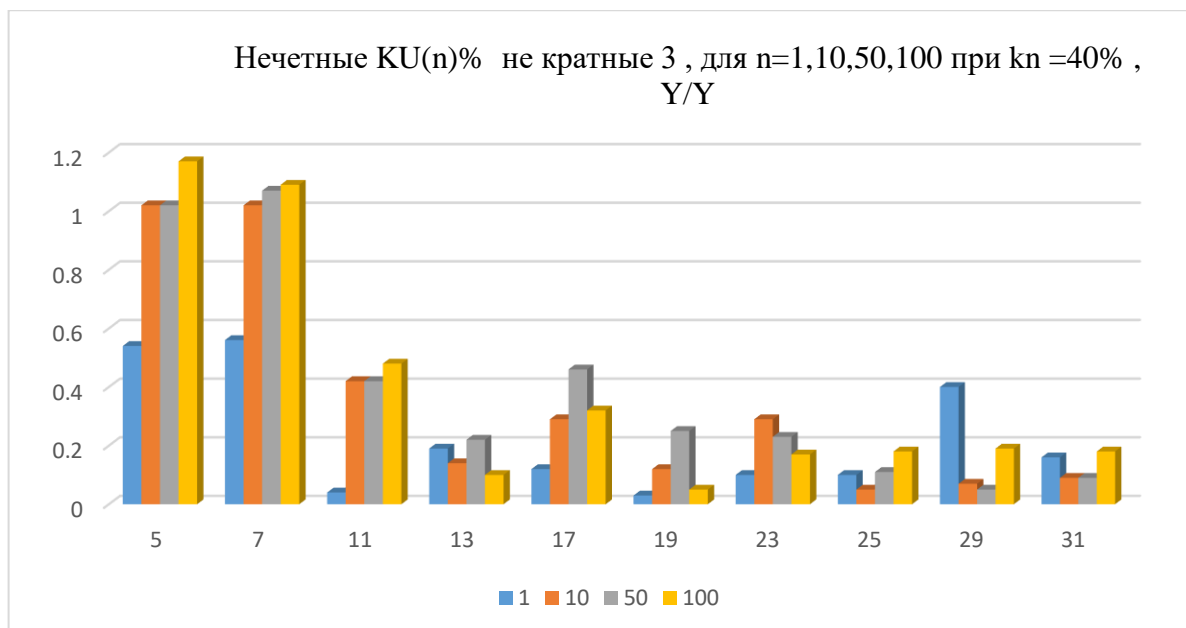


Рисунок 90 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих не кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_p = 40\%$ ,  $Y/Y$

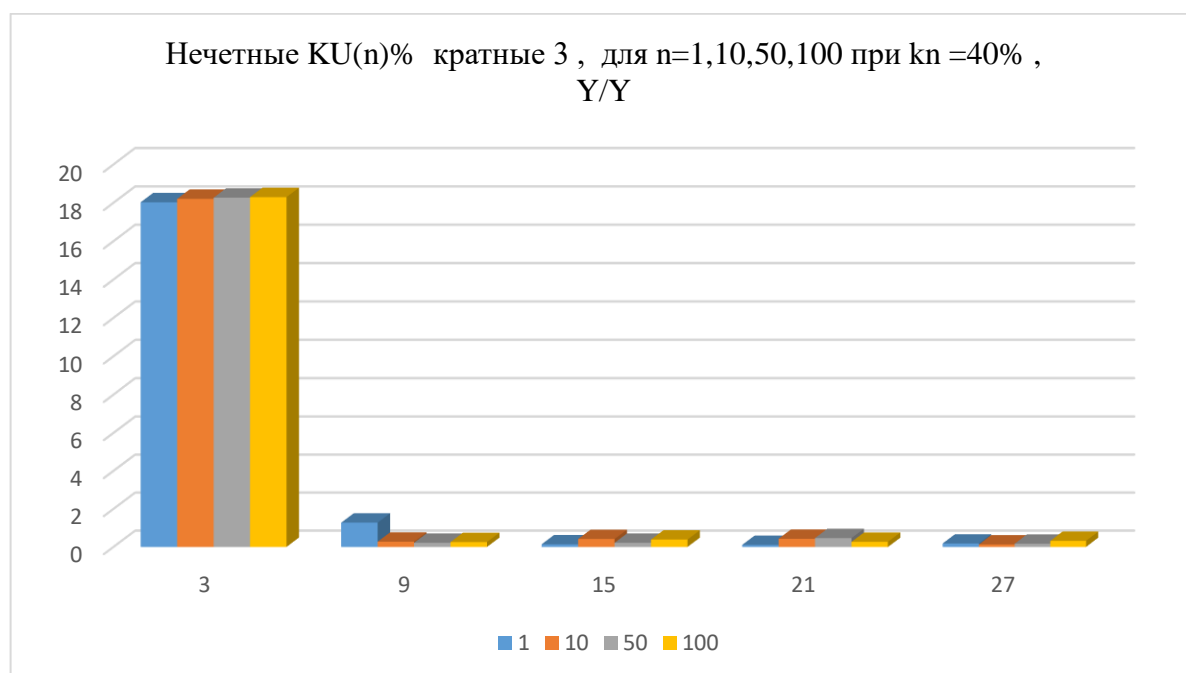


Рисунок 91 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_p = 40\%$ ,  $Y/Y$

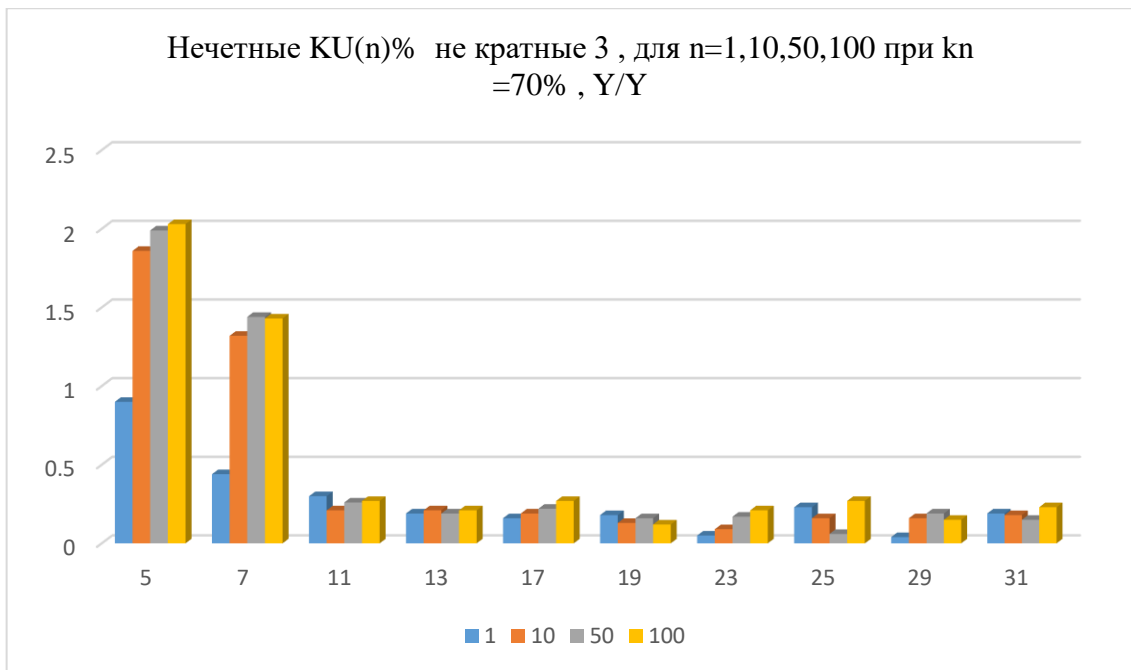


Рисунок 92 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих не кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_n = 70\%$ , Y/Y

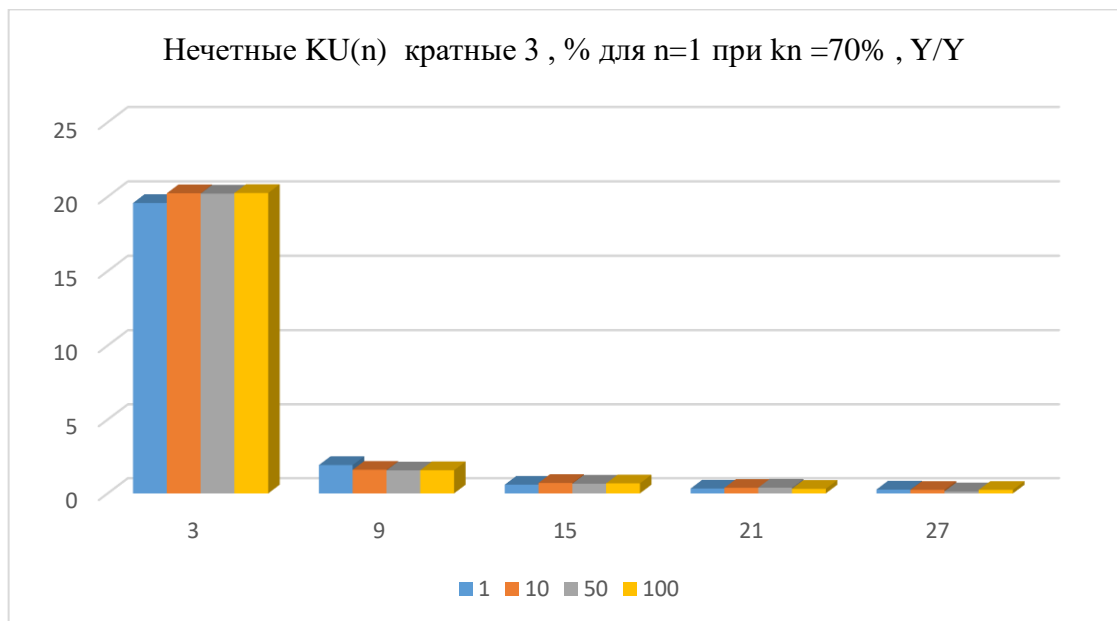


Рисунок 93 – Диаграмма коэффициентов  $K_{U(n)}$ , % нечетных гармонических составляющих кратных 3, для  $n = 1,10,50,100$  при  $k_n = 70\%$ , Y/Y

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

При соединении обмоток трансформатора D/Y наблюдаются незначительные искажения напряжения, но появляется ток преимущественно 3 гармонике в нейтральном проводе равный по амплитуде фазному. Фазные напряжения искажаются в больше степени, чем линейные.

При соединении обмоток трансформатора  $Y/Y$  наблюдаются значительны искажения фазного напряжения, где гармоники напряжения кратные трём превышают значения допустимые ГОСТ. Причем 3 гармоническая составляющая превышает нормированное значение более чем в 3 раза.

При увеличении доли нелинейной нагрузки в сети наблюдается рост коэффициентов нечетных гармонических составляющих. Наибольший рост наблюдается для нечетных гармоник не кратных 3. При соединении обмоток  $Y/Y$  данный эффект наиболее заметен и при увеличении с 40% до 70% коэффициенты гармонических составляющих не кратных 3 могут возрасти практически в 2 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние гармонических составляющих разного порядка в электроэнергетической сети занимают особое место при анализе качества электроэнергии. Обеспечение потребителей должным качеством электроэнергии является одной из главных задач электроэнергетики в целом. Мониторинг данных показателей имеет особую важность для обеспечения эффективного функционирования электрических сетей. Поэтому необходимо наблюдать за гармоническими составляющими разного порядка и использовать различные методы борьбы от превышения данных показателей, которые возникают из-за нелинейных нагрузок в электрических сетях.

В выпускной квалификационной работе проведено моделирование сетей нелинейной нагрузки в программном обеспечении «SimInTech», что позволило провести глубокий анализ возможных искажений в низковольтной сети с нелинейными коммунально-бытовыми потребителями

При выполнении выпускной квалификационной работы были получены следующие результаты:

- разработана модель нелинейной нагрузки в «SimInTech»;
- проведён анализ влияния количества числа нелинейных потребителей на искажение напряжения в сети и последствий появления коэффициентов гармоник высшего порядка;
- разработана модель участка сети 0,4 кВ с задаваемой долей нелинейной коммунально-бытовой нагрузки в «SimInTech», позволяющая исследовать влияние нелинейной нагрузки на сеть;
- проведён анализ влияния доли и числа потребителей с нелинейной нагрузкой при разном соединении обмоток трансформатора  $\Delta/Y$  и  $Y/Y$ -о.

Практическим применением может служить использование созданной модели в «SimInTech» для оценки качества электроэнергии и искажений в низковольтной сети с коммунально-бытовыми потребителями.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Моргунов, Д. Н. Влияние не линейной нагрузки на качество электрической сети / Д. Н. Моргунов // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – № 17(99). – С. 39-43.
2. Platonova, E.V. Modeling of nonlinear electrical loads of low-voltage distribution electrical networks / A. Kolovsky, Platonova E., Toropov A., Shcherbachevich V. //Applied physics, information technology and engineering. – APITECH2023. - 2023.
3. Наумкин, И. Б. Влияние нелинейной нагрузки на качество электроэнергии / И. Б. Наумкин, В. М. Завьялов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сборник материалов I всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 03–05 декабря 2014 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2014. – С. 8.
4. Кузьмин, Д. А. Исследование качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейными нагрузками / Д. А. Кузьмин, В. Я. Горячев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1(17). – С. 148-155.
5. ГОСТ Р 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введен впервые: дата введения 1999-01-01 / разработан Техническим комитетом по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств (ТК 30 ЭМС). – 1999.
6. Особенности работы трехфазных систем электроснабжения 0,4 кВ в условиях нелинейной нагрузки / Д. Н. Моргунов, Е. В. Добрынин, О. Н. Козменков, А. М. Батищев // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 3(93). – С. 21-27.
7. Юндин, М. Анализ сверхнормативных потерь мощности в силовых трансформаторах 10/0,4 кВ, имеющих нагрузку с преобладанием нелинейных потребителей / М. Юндин, Т. Пономаренко, К. Юндин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № S1(20). – С. 6-12.
8. Гунько, С. Ю. Разработка имитационной модели для оптимизации режимов в трехфазных сетях с нелинейной нагрузкой / С. Ю. Гунько // Научно-практические исследования. – 2020. – № 2-2(25). – С. 34-38.
9. Юдин, М. А. Экспериментальные исследования несинусоидальности токов и напряжений в сети 0,38кВ / М. А. Юндин, С. В. Нехаев// Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008.
10. Орлов, А. И. Перспективы применения параллельных активных фильтров гармоник в распределительных сетях низкого напряжения / А. И. Орлов, Д. В. Бортник // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017: Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара,



02–06 октября 2017 года. Том 1. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 164-167.

11. Арутюнян, А. Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях / А. Г. Арутюнян // Электричество. – 2015. – № 10. – С. 55-58.

12. Toropov, A. The problem of heating power transformers when working with a non-linear load / Toropov, A., Platonova, E., Chistyakov, G., Kolovsky, A., Malikova, A. // AIP Conference Proceedings this link is disabled, 2021, Vol. 2402 .

13. Борисов, П.А Учебное пособие: Расчет и моделирование выпрямителей / П.А. Борисов, В.С. Томасов // Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009.

14. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введен впервые: дата введения 2014-07-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва: Стандартинформ, 2014. – 62с.

15. Коваленко, Д. В. Негативное воздействие токов высших гармоник на элементы системы электроснабжения / Д. В. Коваленко, Д. И. Плотников, Е. Е. Шакенов, И. О. Кулинич. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 28 (132). — С. 102-105. — URL: <https://moluch.ru/archive/132/36981/> (дата обращения: 26.06.2024).

16. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон// пер. с англ. Рабодзея А. Н. — М.: Издательский дом «Додэка — XXI», 2008. — 333 с.

17. Мятёж, Т. В. Способ выявления источника высших гармоник в энергосистеме / Т. В. Мятёж, Д. Е. Шевцов, С. В. Родыгина // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 5. – С. 60-65.

18. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев: Наукова Думка, 2005. – 211 с.

19. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер ; пер. с англ. Е. А. Васильченко. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.

20. Боярская, Н. П. Гармонический анализ процессов в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Н. П. Боярская, В. П. // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск, 2010. — № 2. — С. 135–141.

21. Боярская, Н. П. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, С. А. Темербаев // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский

государственный аграрный университет. — Красноярск, 2012. — № 3. — С. 169–182.

22. Матвиенко В.А. Основы теории цепей / В.А. Матвиенко // Учебное пособие для вузов – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. – 162 с.

23. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н. Н. Портнягин, М. С. Ершов, П. Ю. Барбасов, М. Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 61-66. – DOI 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66.

24. Чернышов, М. О. Мониторинг качества электроэнергии в распределительных сетях 0,4 кВ / М. О. Чернышов, Е. С. Звягинцев, М. А. Надымов // Пром-Инжиниринг: Труды III международной научно-технической конференции, С.Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток, 16–19 мая 2017 года. – С.Петербург-Челябинск-Новочеркасск-Владивосток: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 228-233.

25. Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / В. И. Сысун, О. В. Олещук, Н. В. Соболев, А. А. Тихомиров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2019. – № 2(80). – С. 20-23. – DOI 10.23670/IRJ.2019.80.2.003.

Текст скрипта субмодели «Нелинейная нагрузка»

```

initialization
  Udn=submodel.Udn
  Idn=submodel.Idn;
  kp=submodel.kp;
  U1=submodel.U1

  Rn=Udn/Idn;

  Ufd=0.8;
  Rd=1e-5;

  kr=3.5; kl=5e-3;
  Bm=1;
  f=50;

  rt=kr*Udn/(Idn*f*Bm)*(f*Bm/(Idn*Udn))^0.25;
  Lt=kl*Udn/(Idn*f*Bm)*(Idn*Udn/(f*Bm))^0.25;
  Xt=2*pi*f*Lt;
  St=Udn*Idn/0.813;

  U2n=Udn*(1+Kp)/sqrt(2)+Idn*sqrt(rt^2+Xt^2)+Ufd
  r'=rt*St/U1^2;
  X'=Xt*St/U1^2;
  Kt=U1/U2n

  dUt=Idn*sqrt(rt^2+Xt^2) // для проверки
  Um=(U2n-dUt-Ufd)*sqrt(2); // для проверки
  Kpвх=2/3;
  Kpвых=kp
  q=Kpвх/Kpвых
  Ud0=Um/(1+Kpвых); // для проверки
  dUd=(Udn-Ud0)/Udn*100; // для проверки

  C= 3*q/(2*2*pi*50*(Rn+rt));
end

```

Текст скрипта субмодели «Размножающаяся субмодель»

initialization

```

var endportid: string, objid: integer, i: integer, sub_count: integer, sublist:
intarray;
endportid = Nel + 1;

// contentfile
// Скрипт размножения субмоделей и привязки содержимого
// Удаляем лишние если надо
sub_count = 0;
for(i=1, getobjcount) begin
  objid = getobj(i);
  if getprop(objid, "tag") > 0 then begin
    sub_count = sub_count + 1;
  end;
end;

sublist = sub_count#0;
sub_count = 0;
for(i=1, getobjcount) begin
  objid = getobj(i);
  if getprop(objid, "tag") > 0 then begin
    sub_count = sub_count + 1;
    sublist[sub_count] = objid;
  end;
end;

if Nel < cols(sublist) then
  for(i=cols(sublist),Nel+1,-1) begin
    removeprimitiv(sublist[i]);
  end;

for(i=1,min(Nel,cols(sublist))) begin
  setprop( sublist[i], "tag", i );
  reloadsubmodel(sublist[i], contentfile);
end;

//Создаём недостающие
if sub_count < Nel then begin
  for(i=sub_count+1,Nel) begin
    objid = createblock(SELF_CONTAINER_ID , "Субмодель");

```

```

        setprop( objid, "tag", i );
        reloadsubmodel(objid, contentfile);
    end;
end;

var p: point;

//Расставляем координаты
sub_count = 0;
for(i=1, getobjcount) begin
    objid = getobj(i);
    if getprop(objid, "tag") > 0 then begin
        real(p) = real(COMMON_COONNECTOR.Points[1]) +
64*sub_count;
        imag(p) = imag(COMMON_COONNECTOR.Points[1]) + 128;
        setobjpoint(objid, 1, p);
        storeposition(objid);
        sub_count = sub_count + 1;
    end;
end;
end;
end;

```

Текст скрипта модели «Участок сети»

initialization

```
var INPORTNAME: string, OUTPORTNAME: string;
INPORTNAME = IntToStr( submodel.Tag );
OUTPORTNAME = IntToStr( submodel.Tag + 1);
```

```
N=5 // число секций линии
```

```
Ps=10e3 // мощность суммарная, кВт
```

```
cosf=0.9
```

```
kn=0.7 // доля нелинейной нагрузки
```

```
Pn=Ps*kn // мощность нелинейной нагрузки, кВт
```

```
Pl=Ps*(1-kn) // мощность линейной нагрузки, кВт
```

```
Plc=Pl/3/N; // мощность одного линейного ЭП, кВт
```

```
Qlc=Plc/cosf*sqrt(1-cosf^2) // реактивная мощность одного ЭП квар
```

```
Pdc=Pn/3/N; // мощность одного нелинейного ЭП, кВт
```

```
Udn=12;
```

```
Idn=Pdc/Udn;
```

```
kp=0.05;
```

```
U1=220;
```

```
// параметры участка сети
```

```
Rprog=2.7e-3 // Ом/м
```

```
L=500 // длина линии, м
```

```
Ls=L/N // длинна секции линии
```

```
Rs=Ls*Rprog // сопротивление секции линии
```

```
// параметры трансформатора, выпрямителя и цепи постоянного тока
```

```
Rn=Udn/Idn;
```

```
Ufd=0.8;
```

```
Rd=1e-5;
```

```
kr=3.5; kl=5e-3;
```

```
Bm=1;
```

```
f=50;
```

```
rt=kr*Udn/(Idn*f*Bm)*(f*Bm/(Idn*Udn))^0.25;
```

```
Lt=kl*Udn/(Idn*f*Bm)*(Idn*Udn/(f*Bm))^0.25;
```

```
Xt=2*pi*f*Lt;
```

```
St=Udn*Idn/0.813;
```

```

Ix=2;
Px=0.0005*St;
Zx = 1/(0.01*Ix);
Rx = St/Px;
Xx = Rx/(sqrt((Rx/Zx)*(Rx/Zx) - 1));
Zm=[Xx, Rx]

U2n=Udn*(1+Kp)/sqrt(2)+Idn*sqrt(rt^2+Xt^2)+Ufd
r'=rt*St/U1^2;
X'=Xt*St/U1^2;

Kt=U1/U2n

dUt=Idn*sqrt(rt^2+Xt^2) // для проверки
Um=(U2n-dUt-Ufd)*sqrt(2); // для проверки
Kрвх=2/3;
Крвых=кp
q=Крвх/Крвых
Ud0=Um/(1+Крвых); // для проверки
dUd=(Udn-Ud0)/Udn*100; // для проверки

C= 3*q/(2*2*pi*50*(Rn+rt));
end;

```

Диплом лауреатов конференции «Перспектив свободный – 2024»





Сертификат участника конференции «Перспектив свободный – 2024»



## СЕРТИФИКАТ

подтверждает, что

**Михайлюк Алёна Андреевна**

принял(-а) очное участие в юбилейной XX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ – 2024», с докладом на тему:

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА НИЗКОВОЛЬТНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ В SIMINTECH**

В заседании секции:

87. Интеллектуальные энергетические системы в промышленности и на транспорте

Руководитель направления  
по молодежной науке  
Офиса развития научной  
деятельности СФУ


К. А. Кистерский

№ 32230 -2024

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 А. С. Торопов  
подпись      инициалы, фамилия  
«01» 07 2024 г.

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

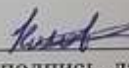
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

Исследование влияния нелинейной коммунально-бытовой нагрузки на  
низковольтную электрическую сеть

тема


Руководитель

 20.06.2024  
подпись, дата

доцент каф. ЭМиАТ, к.т.н.  
должность, ученая степень

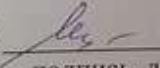
А. В. Коловский  
инициалы, фамилия

Выпускник

 28.06.2024  
подпись, дата

А. А. Михайлюк  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

 28.06.2024  
подпись, дата

И. А. Кычакова  
инициалы, фамилия

Абакан 2024