

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

БЕЛИЦКИЙ АНТОН АРНОЛЬДОВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ТОКА
В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ–
доктор технических наук,
доцент Я.Э. Шклярский

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ.....	10
1.1 СИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ.....	10
1.2 НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ ...	12
1.3 РЕЖИМ РАБОТЫ С СИММЕТРИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ	19
1.4 РЕЖИМ РАБОТЫ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ	21
1.5 СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ И НЕСИММЕТРИИ	22
1.5.1 СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕСИММЕТРИИ	25
1.5.1.2 ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ И ПОЛУЗАМКНУТЫХ СХЕМ.....	28
1.5.1.3 ОСОБЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	28
1.5.1.4 СОВРЕМЕННЫЕ СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА.....	31
1.5.1.5 ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ..	31
1.5.2 УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ.....	32
1.5.2.1 ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДРОССЕЛЕЙ	32
1.5.2.2 ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ.....	33
1.5.2.3 ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК	35
1.5.2.4 ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК	37
1.6 ХАРАКТЕРНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	38
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1	50
ГЛАВА 2 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ НУЛЕВОГО ТОКА	52
2. 1 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	52
2.2 ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ И НАКЛАДЫВАЮЩИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ТОК НУЛЕВОГО ПРОВОДА	60
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2	63

ГЛАВА 3 ВЫЯВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА	65
3.1 ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ	65
3.2 ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ	69
3.3 ВЗАИМОВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТОКОВ ФАЗ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НУЛЕВОГО ПРОВОДА, А ТАКЖЕ ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ЭТО ВЗАИМОВЛИЯНИЕ	73
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	77
ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА	79
4.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	79
4.2 ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА В НУЛЕВОМ ПРОВОДЕ ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ В ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ	80
4.3 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБОРА УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА	89
4.4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА	97
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А	121
ПРИЛОЖЕНИЕ В	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В электротехнических системах в последнее время все чаще используются мощные электроприемники, которые вносят значительные искажения в напряжение питающей электросети.

Это оборудование часто требует высококачественного питания для их безупречной работы. Но, так как оно само является основным генератором нарушений, то в конечном итоге очевидно взаимовлияние работы оборудования и качества электроэнергии. Дополнительной проблемой в этом случае для 4-х проводной системы является увеличение нагрузки на нулевой провод. Асимметрия нагрузки по фазам усиливает негативный эффект. Особенно существенное влияние это имеет на эксплуатируемые сети, к которым подключается новая нелинейная нагрузка. Это значительно влияет на срок службы кабельных линий и надежность электроснабжения. В 2013 году при замене ГОСТ Р 50571.15-97 на ГОСТ Р 50571.5.52-2011 были изменены требования к нулевому проводнику. Если в ГОСТ Р 50571.5.52-2011 нет ограничения на величину сечения нулевого провода, то в ГОСТ Р 50571.15-97 оно ограничивалось сечением фазного проводника. Таким образом возникла новая ситуация относительно тока нулевого провода, сечения провода и других факторов, влияющих на величину тока. В этих условиях для действующего предприятия, модернизирующего свою электрическую нагрузку, ток нулевого провода в 4-х проводной системе которого может в несколько раз превышать фазный, отсутствует комплексное решение задачи уменьшения тока нулевого провода в зависимости от параметров, влияющих на его величину.

Применение компенсирующих устройств по подавлению высших гармоник, способов компенсации несимметрии или увеличения сечения нулевого провода – это те способы, которые предлагаются ведущими учеными. Среди них следует выделить: A.Baggini, Z.Hanzelka, M.Ramos,

С.Тahan, И.В. Жежеленко и др. Однако никем не предложено решение, учитывающее влияние всех определяющих факторов на величину тока нулевого провода в комплексе.

Отсюда следует, что тема работы является актуальной, так как связана с энергоэффективностью предприятий и с обеспечением бесперебойной работы оборудования.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки):

п.2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем»

п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Цель работы

Обеспечение бесперебойной работы оборудования электротехнического комплекса предприятия путем оптимизации величины тока в нулевом проводе в его низковольтной четырехпроводной системе электроснабжения.

Основные задачи исследования

1. Выявление основных параметров, определяющих изменение тока нулевого провода в 4-х проводной системе электроснабжения;
2. Определение зависимости величины тока нулевого провода от взаимовлияния выявленных параметров;

3. Разработка критерия выбора параметров электроснабжения устройств, обеспечивающих бесперебойность работы оборудования;

4. Разработка алгоритма выбора параметров устройств, обеспечивающих бесперебойность работы оборудования;

5. Оценка эффективности применения разработанного алгоритма.

Идея работы

Минимизация степени влияния на бесперебойность работы оборудования гармонического состава тока и несимметрии нагрузки достигается применением разработанного критерия выбора технических решений и параметров компенсирующих устройств.

Научная новизна

1. Выявлены основные факторы, влияющие на величину тока нулевого провода в низковольтной 4-х проводной сети с учетом изменчивости нагрузки предприятия;

2. Выявлена взаимозависимость основных факторов, определяющих величину тока нулевого провода, в виде универсальных аналитических выражений;

3. Разработан критерий выбора параметров компенсирующих устройств, обеспечивающих бесперебойность работы электрооборудования при наличии значительных величин тока нулевого провода;

4. Разработан алгоритм выбора параметров технических устройств, обеспечивающих устойчивую работу электрооборудования при изменении его характеристик.

Достоверность выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов математического и имитационного моделирования и достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований значения тока в нулевом проводе.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что результаты, полученные на основе применения разработанного метода выбора оптимального технического решения для минимизации влияния тока нулевого провода на бесперебойность работы электрооборудования предприятия, могут лежать в основе промышленной реализации на предприятиях, содержащих вновь подключаемую несимметричную и (или) нелинейную нагрузку. За счет внедрения метода по разработанному алгоритму можно исключить перерывы в электроснабжении, вызванные превышением допустимого значения тока нулевого провода.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, математического моделирования электрических сетей с использованием пакета MATLAB, интерполяции и аппроксимации данных, экспериментальные исследования режимов работы электрической сети.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Алгоритм применения критерия выбора параметров компенсирующих устройств, обеспечивающих минимальное значение тока в нулевом проводе, апробирован на четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения СЗГМУ им. И. И. Мечникова.

Личный вклад автора

1. Проведены экспериментальные исследования на предприятии по определению показателей несимметрии и несинусоидальности в электрической сети низкого напряжения;
2. Разработана имитационная модель электрической сети с несимметричной и нелинейной нагрузкой;
3. Проведены аналитические исследования, на основе которых были разработаны критерий и метод выбора параметров технических устройств, обеспечивающих устойчивую работу электрооборудования при наличии значительных величин тока нулевого провода;
4. Проведены практические расчеты для действующего предприятия по разработанному методу уменьшения тока нулевого провода до заданного значения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Расчетную величину тока нулевого провода в четырехпроводной низковольтной сети следует определять в зависимости от коэффициента несимметрии тока по нулевой последовательности и коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода с учетом состава и параметров нагрузки, параметров распределительной сети, уровня напряжения, конфигурации сети и сечения нулевого провода, что повысит эффективность выбора технических решений по обеспечению заданного значения тока.
2. Выбор устройств компенсации высших гармоник тока нулевого провода и несимметрии в трехфазной четырехпроводной распределительной системе с нелинейной нагрузкой определяется соотношением коэффициентов несимметрии и несинусоидальности по разработанному критерию эффективности компенсации, учитывающему сечение нулевого провода, что

позволит обеспечить снижение влияния тока нулевого провода на работу электротехнического комплекса предприятия.

Апробация

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на: «II-й Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику», г. Кемерово, 23-25 ноября 2016 г., конференции 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, г. Санкт-Петербург, 1-2 февраля 2017 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 113 наименований, изложена на 123 страницах машинописного текста и содержит 68 рисунков, 8 таблиц, 2 приложения.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЯ

Анализ существующих режимов низковольтной сети [1-21] предприятий с любым характером нагрузки показал, что основными режимами работы сети являются:

1. Симметричный режим работы линейной нагрузки;
2. Несимметричный режим работы линейной нагрузки;
3. Симметричный режим работы нелинейной нагрузки;
4. Несимметричный режим работы нелинейной нагрузки.

Каждый из них имеет различное влияние на ток нулевого провода.

1.1 Симметричный режим работы линейной нагрузки

Рассмотрим идеальный случай работы сети предприятия – с симметричной линейной нагрузкой.

В случае симметричной системы напряжений и симметричной нагрузки: $Z_A = Z_B = Z_C$,

т.е. когда $R_A = R_B = R_C = R_\phi$ и $X_A = X_B = X_C = X_\phi$, токи в фазах и углы сдвига фаз одинаковы:

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = \frac{U_\phi}{z_\phi};$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\phi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi}.$$

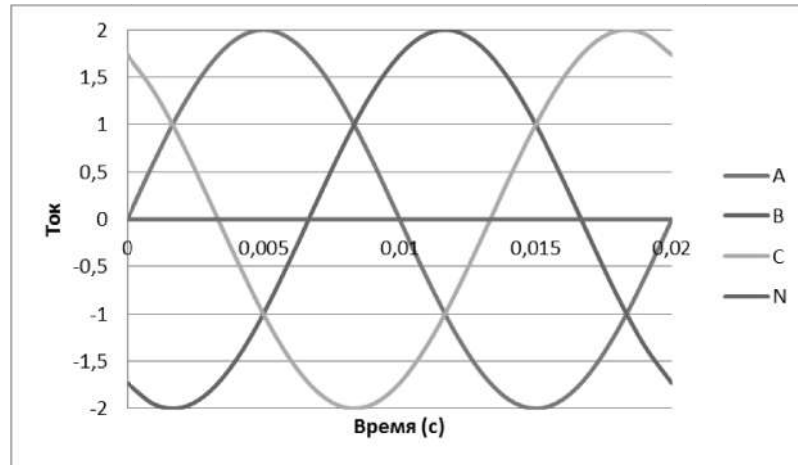


Рисунок 1.1.1 - Осциллограмма фазных токов и тока нулевого провода симметричной линейной нагрузки

На рисунке 1.1.1 показан график зависимости токов фаз и тока нулевого провода от времени при симметричном режиме работы нагрузки. График построен в относительных единицах для произвольно выбранной нагрузки.

При построении векторной диаграммы фазных токов для симметричного режима работы (рис. 1.1.2) геометрическая сумма векторов фазных токов равна нулю: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

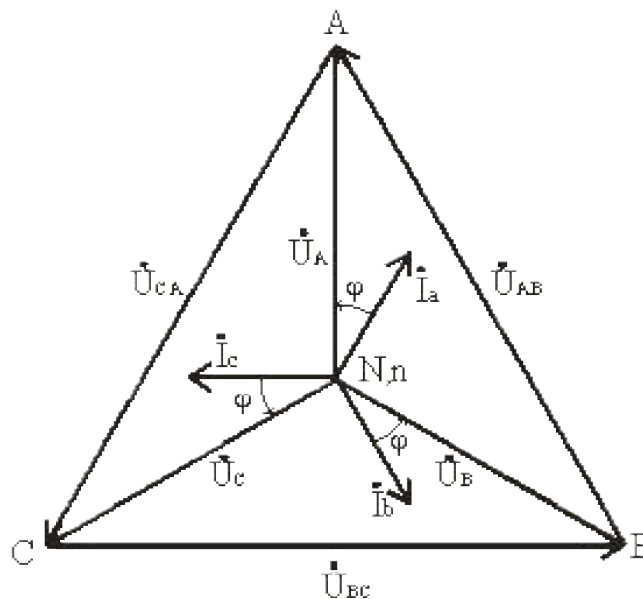


Рисунок 1.1.2 - Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной четырехпроводной симметричной системы

Из анализа графика 1.1.1 получено, что действующие значения фазных токов составили 1.57, тока нулевого провода – 0, чем доказывается, что симметричном режиме работы линейной нагрузки на нулевой провод не приходится никакой нагрузки [22-25], т.к. ток в нейтральном проводе $I_0 = 0$.

1.2 Несимметричный режим работы линейной нагрузки

Симметричный режим работы возможен только при полностью одинаковой нагрузке во всех трех фазах, что в современных условиях зачастую невозможно выполнить.

Как правило, источниками несимметричной нагрузки являются однофазные электроприемники. В меньшей степени наблюдается трехфазная нагрузка с неравномерно распределенной загрузкой фаз [26].

В представленной работе рассматриваются длительные несимметричные режимы, которые, в отличие от кратковременных, представляют собой наиболее распространенный вид несимметрии в установившемся режиме электропотребления. Отметим, что к кратковременным относятся прежде всего аварийные режимы.

Несимметрию напряжений и токов, возникающую из-за несимметрии элементов сети, называют продольной.

Поперечной называют несимметрию токов и напряжений, возникающей из-за подключения к электрической сети несимметричных нагрузок. Поперечная несимметрия также может возникать при неравенстве активных и реактивных сопротивлений отдельных фаз электроприемников.

Несимметрия как по току, так и по напряжению может возникать при следующих обстоятельствах: разные нагрузки в различных фазах; неполнофазная работа линий или других элементов в сети; различные параметры линий в разных фазах.

Установлено, что при значительной несимметрии ток нулевого провода может превышать фазные токи, что создает проблему перегрузки нулевого провода и возможного его повреждения.

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ и $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / Z_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / Z_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / Z_c.$$

Ток в нейтральном проводе \dot{I}_0 равен геометрической сумме фазных токов: $\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$.

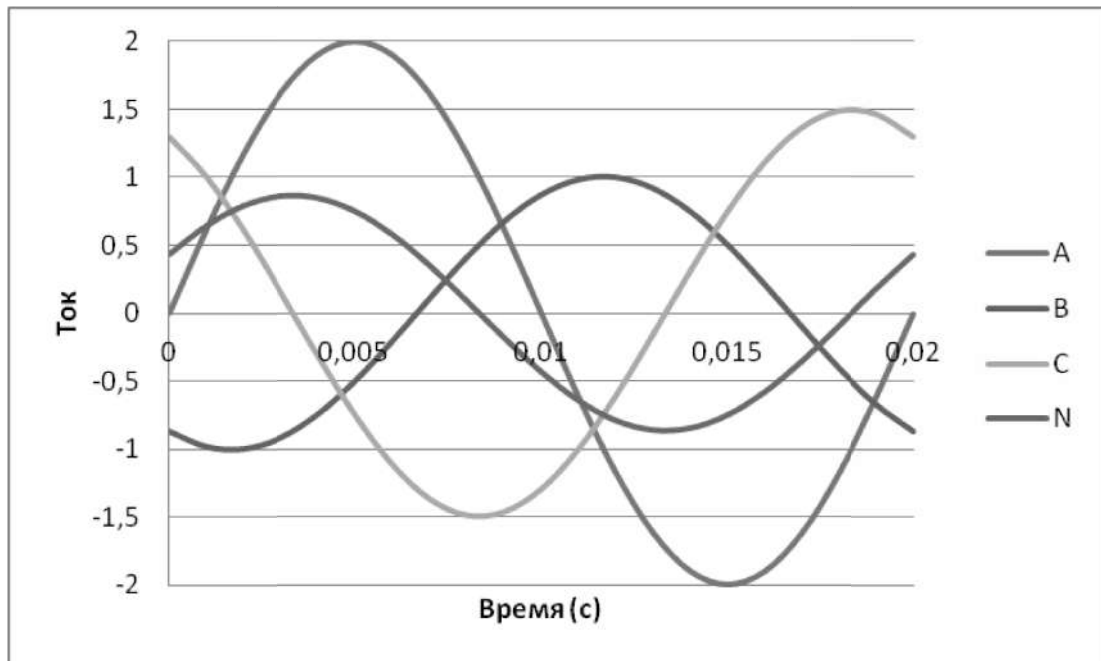


Рисунок 1.2.1 - Осциллограмма фазных токов и тока нулевого провода несимметричной линейной нагрузки

В качестве примера на рисунке 1.2.1 показан график зависимости токов фаз и тока нулевого провода от времени при несимметричном режиме работы линейной нагрузки.

Напряжения будут $U_a = U_A$; $U_b = U_B$; $U_c = U_C$; $U_\phi = U_n / \sqrt{3}$, благодаря нейтральному проводу при $Z_0 = 0$.

Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке приведена на рисунке 1.2.2 [27].

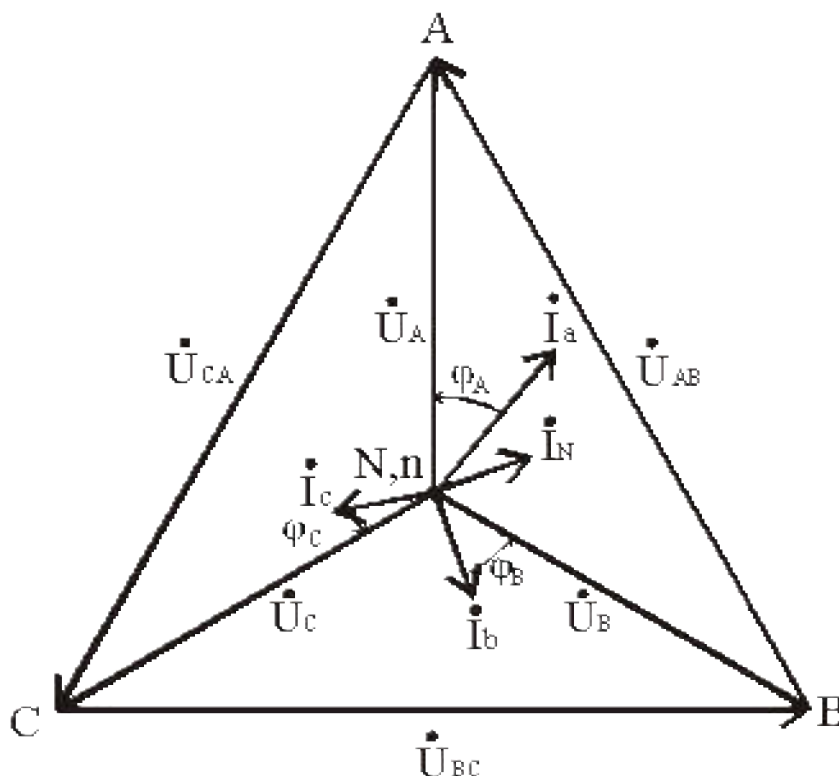


Рисунок 1.2.2 - Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной четырехпроводной несимметричной системы

Несимметрия напряжений и токов характеризуется следующими показателями:

- коэффициентом несимметрии по обратной последовательности;
- коэффициентом несимметрии по нулевой последовательности.

Согласно ГОСТ 32144-2013 [28] «несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями качества электроэнергии (КЭ), относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности k_{0U} .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности k_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности k_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности k_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.»

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности равен $k_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100$, % , (1.2.1)

где $U_{2(1)}$ - действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В;

$U_{1(1)}$ - действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, В.

Допускается вычислять k_{2U} по выражению, % :

$$k_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном.мф.}} \cdot 100 \quad , \quad (1.2.2)$$

где $U_{ном.мф.}$ - номинальное значение междуфазного напряжения сети, В.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности равен, % :

$$k_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100 \quad , \quad (1.2.3)$$

где $U_{0(1)}$ - действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В.

Допускается вычислять k_{0U} по формуле, %

$$k_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{ном.ф.}} 100, \quad (1.2.4)$$

где $U_{ном.ф.}$ - номинальное значение фазного напряжения, В.

Коэффициенты несимметрии для токов определяются аналогично.

В [29] представлены составляющие суммарного ущерба от несимметрии, которые включают в себя дополнительные потери электроэнергии, увеличение капитальных затрат на обновление электрической сети предприятия, технологический ущерб, возникающих из-за простоя оборудования при аварийных режимах, ущерб из-за увеличения реактивной мощности, генерируемой конденсаторными батареями и синхронными двигателями и т.п.

В [30-35] представлен анализ последствий несимметрии напряжений.

Так показано, что при несимметрии напряжений, равной 5%, мощность асинхронных электродвигателей в зависимости от их конструктивного исполнения уменьшается на 5-20%. Также известно, что срок службы асинхронного электродвигателя сокращается в 2 раза при несимметрии напряжений в 4%. Также установлено, «что 1% величины коэффициента несимметрии напряжений соответствует 1,73% дополнительного отклонения напряжения» [36].

Стоит отметить, что значительное воздействие на низкочастотные каналы автоматики, проводной связи и сигнализации оказывает несимметрия фазных токов оказывает [37].

В таблице 1.2.1 приведены примеры потребителей, несимметрия которых обусловлена целесообразностью по технико-экономическим показателям.

Таблица 1.2.1 - Электроприемники, создающие несимметрию напряжения

Вид электроприемника	Uном, кВ	k_{2U} , %
Дуговая сталеплавильная печь 100	220	1,3
	35	4,5
Дуговая сталеплавильная печь 40	110	1,4
	35	4,0
Однофазные электротермические установки	10	18
	110	4,6
Тяговые подстанции переменного тока	6	1,4
	10	2,0
Прокатный стан 1700	0,4	1-5

В энергосистемах Урала и Сибири было проведено исследование, результаты которого показали, что максимальные значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности достигали 1,5% в сетях 220 кВ, 7,5 % - в сетях 27,5 кВ и 9,2 % - в сетях 10,5 кВ. Основной несимметричной нагрузкой данных энергосистем являются электрифицированные железные дороги, горно-обогатительные комбинаты и лесопромышленные комплексы. Аналогичные данные были получены в

сетях Южно-Уральской электрифицированной железной дороги, где был зарегистрирован преждевременный выход из строя крупных синхронных машин, насосных станций, а также нарушения работы устройств сигнализации и блокировки [38].

На рисунке 1.2.3 для примера представлены временные диаграммы изменения фазных токов в ЛЭП [39], где наиболее загруженной является фаза «С», по которой протекает средний ток, равный 35,4 А. В фазах «А» и «В» ток, соответственно составляет 12,8 и 9,3 А. Ток нейтрали в среднем составил 25 А, что значительно превышает токи в фазах А и В.

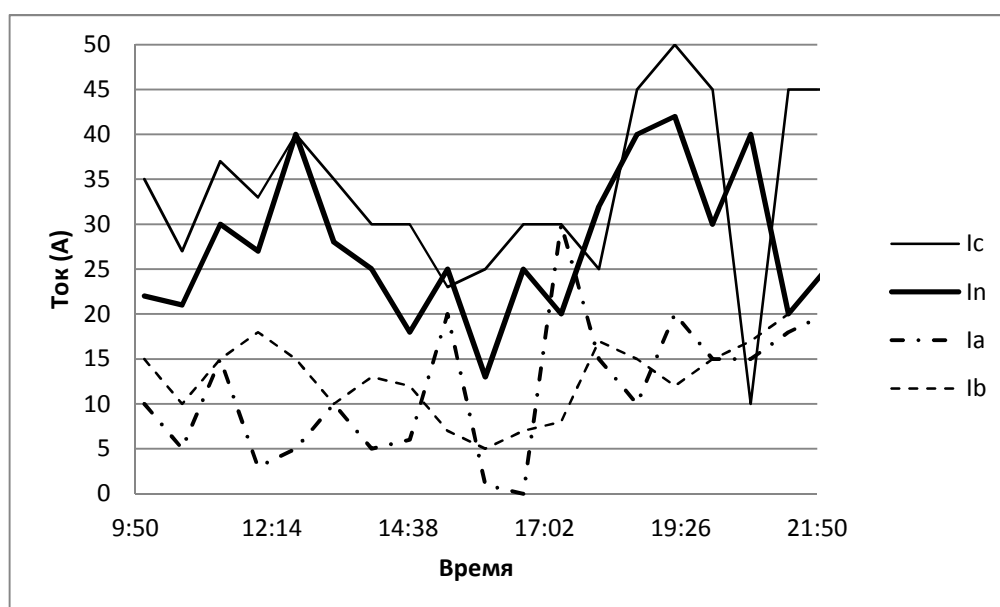


Рисунок 1.2.3 - Временная диаграмма изменения токов в ЛЭП

Такой дисбаланс фаз приводит к ненулевым коэффициентам несимметрии токов по обратной (k_{2l}) и нулевой (k_{0l}) последовательностям. Для вышеприведенного примера их средние значения соответственно равны 0,47 и 0,45. Однако, в отличие от коэффициентов несимметрии по напряжению, коэффициенты несимметрии по току не нормируются.

Из анализа графика 1.2.1 следует, что действующие значения тока составили: фаза А - 1.57, фаза В - 0.71, фаза С - 1.06, нулевой провод - 0.6, коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности - 0.19, чем

доказывается, что при работе несимметричной линейной нагрузки возникает ток в нулевом проводе, который состоит только из токов основной гармоники.

1.3 Режим работы с симметричной нелинейной нагрузкой

В современных условиях практически невозможно встретить линейную нагрузку, так как большинство электроустановок содержат полупроводниковые элементы, которые по принципу работы не могут быть линейными. Поэтому рассмотрим работу нелинейной симметричной нагрузки.

Стоит отметить, что высшие гармоники тока кратные трем (то есть 3, 9,...), как правило, определяют значение амплитуды тока, обусловленного однофазной нагрузкой и имеют значительное влияние на режимы трехфазной сети. В трехфазной симметричной сети синусоидальные токи во всех трех фазах сдвинуты на 120° по отношению друг к другу. Сумма токов в этом случае в нулевом проводнике равна нулю. Это относится к большинству гармоник, кроме гармоник, кратных трем:

$$n = 3(2k + 1), \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots$$

В трехфазных сетях они совпадают по фазе, а значит обуславливают нулевую последовательность тока. Гармоники тока, кратные трем, суммируются в проводнике нейтрали по следующему принципу:

$$I_{A(3)} = \sin(3 \cdot \omega t), I_{B(3)} = \sin(3 \cdot (\omega t + 240)), I_{C(3)} = \sin(3 \cdot (\omega t + 120));$$

$$I_{A(3)} = \sin(3\omega t), I_{B(3)} = \sin(3\omega t + 720), I_{C(3)} = \sin(3\omega t + 360);$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C = I_{A(3)} + I_{B(3)} + I_{C(3)} = 3 \cdot I_{A(3)}.$$

В ряде случаев, когда эти гармоники составляют большую часть в амплитудном спектре, ток нулевого провода может иметь значительно большую величину по сравнению с фазными токами [40].

Так, например, при доле 3-ей гармоники в фазном токе в 35%, ток нейтрали составит 105% от фазного тока. Отсюда можно сделать вывод, что при наличии в сети высших гармоник, кратных трем, ток в нейтрали может превышать фазные токи, что вызывает необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных четырехпроводных систем, которое как правило составляет 0,5 сечения фазного проводника. Кроме этого токи третьей и кратных ей гармоник могут привести к потере напряжения как в нулевом проводе, так и в фазах. При этом будет иметь место искажение формы напряжения в электрической сети.

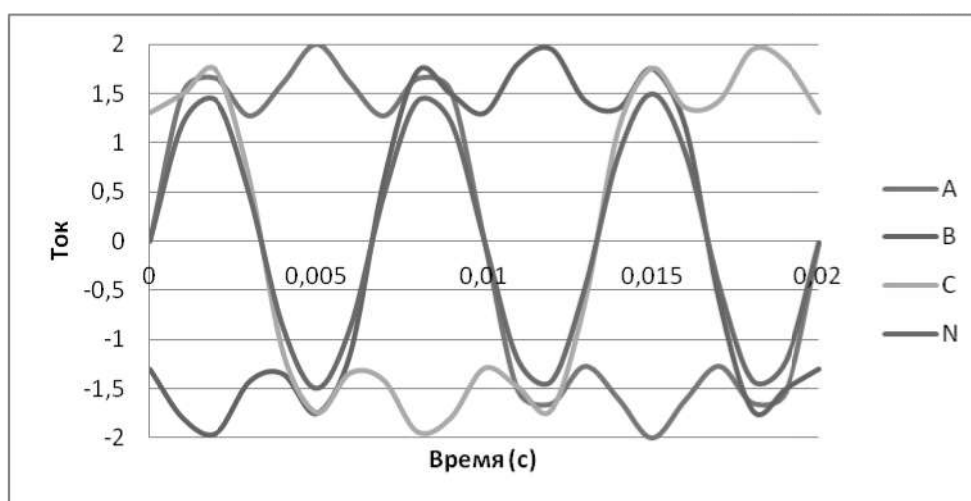


Рисунок 1.3.1 - Осциллограмма фазных токов и тока нулевого провода симметричной нелинейной нагрузки

На рисунке 1.3.1 показан график зависимости токов фаз и тока нулевого провода от времени при симметричном режиме работы нелинейной нагрузки.

Из анализа графика 1.3.1 получено, что действующие значения тока составили: фаза А - 1,5, фаза В - 1,5, фаза С - 1,5, нулевой провод - 1,03, коэффициент несинусоидальности токов фаз А,В,С - 35%, доля третьей гармоники - 23,6%, ток нулевого провода полностью состоит из тока 3-ей гармоники, чем доказывается, что при работе симметричной нелинейной

нагрузки возникает ток в нулевом проводе, который состоит из токов гармоник, кратных трем.

Отсюда следует сделать вывод, что при симметричном режиме работы нелинейной нагрузки ток в нулевом проводе состоит из токов гармоник, кратных трем, и при их доле в фазном токе свыше 33%, ток нулевого провода может значительно превышать значения фазных токов.

1.4 Режим работы с несимметричной нелинейной нагрузкой

Для промышленных предприятий и бытовых потребителей наиболее характерна нелинейная и несимметричная нагрузка, что приводит к необходимости рассмотрения несимметричного режима работы нелинейной нагрузки.

В случае нелинейной и несимметричной нагрузки ток в нулевом проводе будет образовываться не только за счет первой гармоники (полученной за счет несимметрии) и третьей гармоники (полученной за счет нелинейности) токов, но и за счет остальных гармоник, которые уже не будут полностью сокращаться по правилам сложения гармоник из-за их несимметрии.

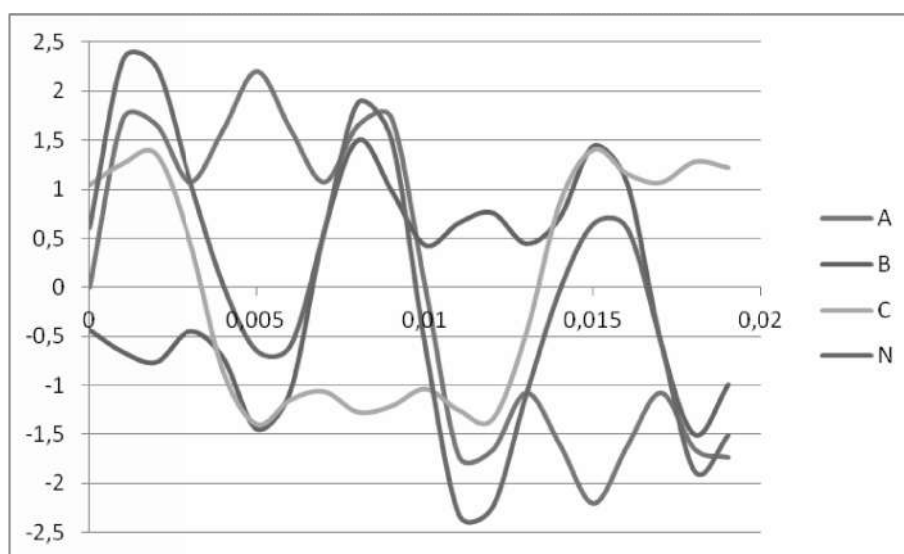


Рисунок 1.4.1 - Осциллограмма фазных токов и тока нулевого провода несимметричной нелинейной нагрузки

На рисунке 1.4.1 показан график зависимости токов фаз и тока нулевого провода от времени при симметричном режиме работы нелинейной нагрузки.

Из данных, полученных из рисунка 1.4.1 коэффициент несинусоидальности фазных токов составил: для фазы А – 43%, для фазы В – 86%, для фазы С – 39%. Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности – 19%. Действующее значение токов: фаза А – 1.54, фаза В – 0.93, фаза С – 1.14, нейтраль N – 1.37. Коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода – 198%, доля тока 3-ей гармоники – 76.4%, 1-й гармоники – 20,3%, 5-й гармоники – 3.3%.

Обобщая представленные в разделах 1.1-1.4 выводы, можно утверждать, что на величину тока нулевого провода влияет несимметрия и несинусоидальность, однако не определено взаимовлияние несимметрии фазных токов и несинусоидальности тока нулевого провода. Также не выявлено как именно влияет несимметрия и несинусоидальность на ток нулевого провода при их совместном воздействии.

1.5 Современные способы компенсации несинусоидальности и несимметрии

Разработка подхода к выбору средств по уменьшению токов нулевого провода позволит не только существенно снизить расходы на обслуживание электрической сети, но и уменьшить влияние несинусоидальных и несимметричных режимов работы на сеть в целом.

В таблице 1.5.1 приведены основные средства по уменьшению указанных выше явлений, применяемые в настоящее время [41-64], где АПФ – активный последовательный фильтр, АПрФ – активный параллельный фильтр, ГФ – гибридный фильтр.

Таблица 1.5.1 - Современные технические средства по улучшению показателей качества электроэнергии

	Специфика применения	Тип фильтра			
		АПФ	АПрФ	ГФ из АПФ и ППрФ	ГФ из АПФ и АПрФ
1	Гармоники напряжения	+		+	+
2	Фликер напряжения	+	+		+
3	Провал напряжения	+	+	+	+
4	Стабилизация напряжения	+	+	+	+
5	Компенсация реактивной мощности		+	+	+
6	Гармоники тока		+	+	+
7	Компенсация тока нулевого провода		+	+	
8	Обеспечение симметрии		+		
9	Гармоники и стабилизация напряжения	+			+
10	Гармоники, фликер, провал и стабилизация напряжения	+			+
11	Гармоники тока и напряжения, стабилизация напряжения и компенсация реактивной мощности			+	+

Продолжение таблицы 1.5.1

	Специфика применения	Тип фильтра			
		АПФ	АПрФ	ГФ из АПФ и ППрФ	ГФ из АПФ и АПрФ
12	Гармоники напряжения и компенсация реактивной мощности			+	+
13	Гармоники тока и компенсация реактивной мощности		+	+	+
14	Компенсация реактивной мощности, тока нулевого провода, гармоники тока и обеспечение симметрии		+		
15	Компенсация реактивной мощности, гармоники тока и обеспечение симметрии		+		+
16	Гармоники тока и обеспечение симметрии		+		
17	Компенсация реактивной мощности, тока нулевого провода и обеспечение симметрии		+		

Приведенные в таблице 1.5.1 средства представляют собой достаточно эффективные мероприятия по компенсации несимметрии и несинусоидальности. Однако, до сих пор, в этих условиях отсутствуют четкие рекомендации по применению того или иного средства компенсации.

Рассмотрим более детально различные способы компенсации несимметрии и несинусоидальности.

1.5.1 Способы компенсации несимметрии

Режим работы трехфазной электрической сети называется несимметричным, если в сети существуют различные условия работы фаз сети. Степень несимметрии трехфазной четырехпроводной системы характеризуется коэффициентами напряжения и тока обратной и нулевой последовательностей. Потери мощности, возникающие в трехфазной электрической сети из-за несимметрии фазных токов определяются коэффициентом потерь мощности. Коэффициент потерь мощности рассчитывается как отношение потерь мощности при несимметричном режиме работы к потерям мощности, определяемым протеканием токов прямой последовательности [65-69].

На стадии проектирования какого-либо объекта при рассмотрении способов расположения схемы низковольтной распределительной сети необходимо учитывать характер нагрузки и установленную мощность отдельных потребителей электроэнергии для того, чтобы осуществить их равномерное распределение по фазам сети. Также необходимо учитывать, что в течение срока эксплуатации низковольтной сети электроснабжения из-за модернизации оборудования предприятий происходит подключение большого количества новых потребителей, которое также необходимо распределять с учетом равномерности загрузки фаз.

В качестве примера можно привести наблюдения в низковольтных распределительных сетях отдельных предприятий Иркутской области [70-73], которые показали, что более чем в 85% случаев происходит нарушение симметричности подключения мощных однофазных потребителей.

Вопросы, связанные с определением тока в нулевом проводе четырехпроводной трехфазной сети, тесно связаны с решением задач по управлению графиками нагрузки.

Такого рода задачи, как правило, решаются либо путем изменения технологии производства [74], либо путем перераспределения нагрузки на основе применения аккумулирующих энергию устройств [75], либо изменением конфигурации сети, обеспечивающей симметризацию однофазной нагрузки по отдельным фазам [76]. Что касается тока в нулевом проводе, то один из способов уменьшения является обеспечение максимальной симметрии нагрузки в трехфазной системе, что представляет собой один из способов выравнивания нагрузки.

1.5.1.1 Переключение нагрузки

Выравнивание фазных нагрузок в условиях стабильности суточного графика нагрузки может быть достигнуто путем переключения нагрузки с наиболее загруженной фазы на недогруженную в целях снижения несимметрии напряжения в трехфазной электрической сети.

Зачастую этот способ применяется для трехфазной сети с индивидуальными однофазными нагрузками. Однако не всегда перераспределение нагрузки позволяет снизить нормируемые показатели качества электроэнергии для несимметрии напряжений до допустимых значений, так как на производстве мощные однофазные электроприемники часто находятся в профилактическом или капитальном ремонте и, кроме того, его невозможно реализовать для несимметричной трехфазной нагрузки.

Уменьшая величину тока нулевой последовательности (I_0) и снижая сопротивление нулевой последовательности элементов сети Z_0 , можно добиться снижения несимметрии в трехфазных четырехпроводных сетях 0,38 кВ. Снижение I_0 достигается в первую очередь за счет перераспределения

нагрузки. Снижение Z_0 легко достигается в сетях воздушных линий 0,38 кВ, сооружаемых в районах с малой плотностью потребителей, однако для кабельных линий уменьшение Z_0 необходимо обосновывать технико-экономическими расчетами, так как для уменьшения Z_0 необходимо увеличивать сечения нулевого провода.

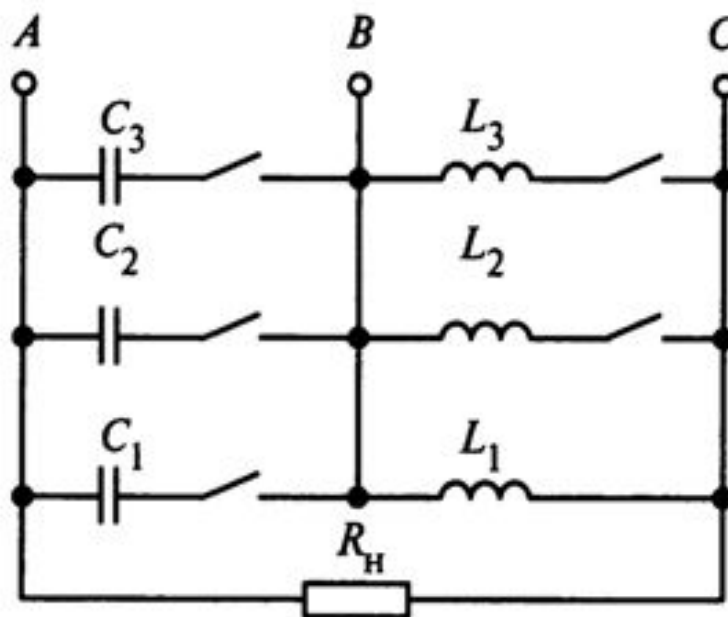


Рисунок 1.5.1.1.1 - Типовая схема симметрирующего устройства

Реализация способа автоматического подключения однофазной нагрузки к наименее загруженной фазе осуществляется с помощью применения специальных устройств симметризации нагрузки, подключаемых в сеть 0,38 кВ [77-81]. Эти устройства позволяют достичь более равномерного распределения нагрузки в фазах трехфазной электрической сети, что позволяет уменьшить токи нулевой последовательности и снизить потери в сети 0,38 кВ. Необходимо учитывать основной недостаток данного метода – невозможно точно подобрать автоматически переключаемую однофазную нагрузку требуемой мощности. Кроме того, при применении устройств автоматической симметризации снижается надежность

электроснабжения однофазной переключаемой нагрузки из-за сложности измерительного и коммутационного комплекса подобных устройств. С учетом приведенных недостатков применение подобных устройств не позволяет значительно уменьшить несимметрию нагрузок.

1.5.1.2 Применение замкнутых и полужамкнутых схем

Перевод сети 0,38 кВ в полужамкнутый или замкнутый режим подразумевает: для полужамкнутого режима - замыкание сети, питающейся от одного распределительного трансформатора; для замкнутого режима – замыкание сети, питающейся от нескольких распределительных трансформаторов. За счет дополнительного выравнивания нагрузок достигается снижение несимметрии токов фаз [82]. Наибольший эффект достигается при применении полужамкнутого режима работы электрической сети.

Также за счет выравнивания нагрузок фаз в замыкаемых линиях достигается снижение несимметрии напряжений вдоль линий. Так как значения симметричных составляющих токов и напряжений фаз являются случайными величинами, то математическое ожидание напряжения в замкнутых линиях как обратной, так и нулевой последовательности составляет 33% от максимального [36].

Особенно благоприятно данный метод сказывается на уравнивании нагрузок фаз и перераспределении симметричных нагрузок между участками сети. Основным недостатком является то, что в замкнутой сети, содержащей несколько распределительных трансформаторов, неизбежны дополнительные потери мощности и электрической энергии из-за протекания уравнивающих токов. В связи с этим экономическая эффективность применения замкнутых линий уменьшается с увеличением их числа [38].

1.5.1.3 Особые соединения обмоток распределительных трансформаторов

В трехфазной электрической сети не меньшее влияние на несимметрию напряжений оказывает схема соединения обмоток распределительного трансформатора 6-10/0,4 кВ. Основным достоинством наиболее часто применяемых трансформаторов с схемой соединения обмоток звезда - звезда с нулем (У/У₀) является их дешевизна, однако необходимо учитывать основной недостаток такой конструкции – большое значение Z_0 . Этому недостатку лишены конструкции трансформаторов со схемами обмоток треугольник - звезда с нулем (Д/У₀) или звезда - зигзаг (У/З), которые могут применяться для снижения несимметрии напряжений фаз.

Наиболее эффективно в целях снижения несимметрии выступают распределительные трансформаторы со схемой соединения обмоток звезда-зигзаг. Однако при их применении необходимо учитывать их основной недостаток - трудоемкость их изготовления, что отрицательно сказывается на их стоимости.

Помимо применения распределительных трансформаторов с особым соединением обмоток стоит рассмотреть применение специальных трансформаторов, в частности трансформаторов схемы Скотта и схемы Штайнмеца:

- трансформатор схемы Скотта можно представить в следующем виде: к трехфазной системе присоединены два однофазных трансформатора, соединенных таким образом, что на выходе образуется две однофазные системы, которые избавляют трехфазную сеть от влияния несимметричной нагрузки фаз;

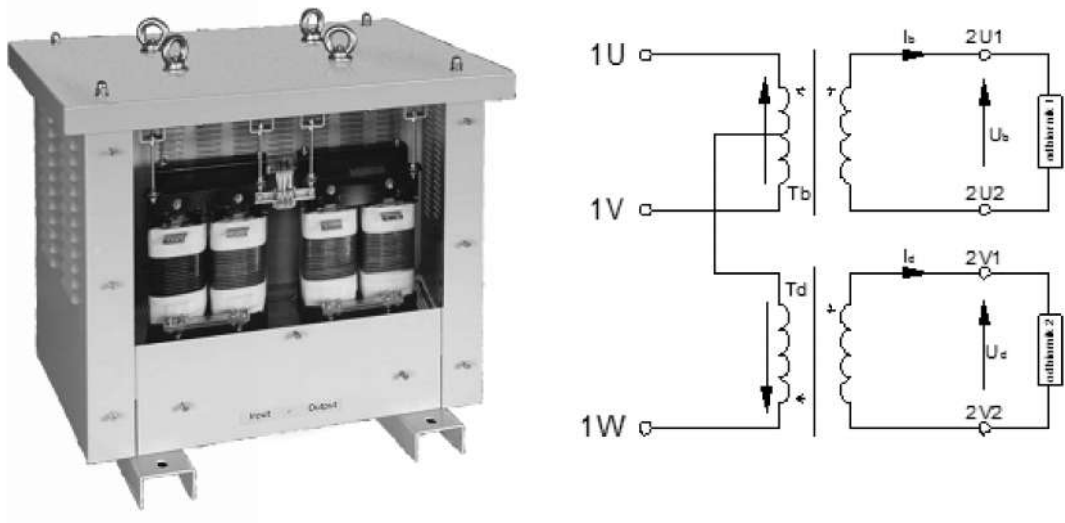


Рисунок 1.5.1.3.1 - Внешний вид и принципиальная схема трансформатора Скотта

- в трехфазном трансформаторе Штайнмеца для симметризации используется дополнительная нагрузка, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности, которые пропорциональны однофазным нагрузкам (рис. 1.5.1.3.2). Номинальная трехфазная мощность такого трансформатора совпадает с активной мощностью однофазной нагрузки. Основным недостатком подобной схемы является необходимость в неизменности нагрузки, выбранной при проектировании системы электроснабжения.

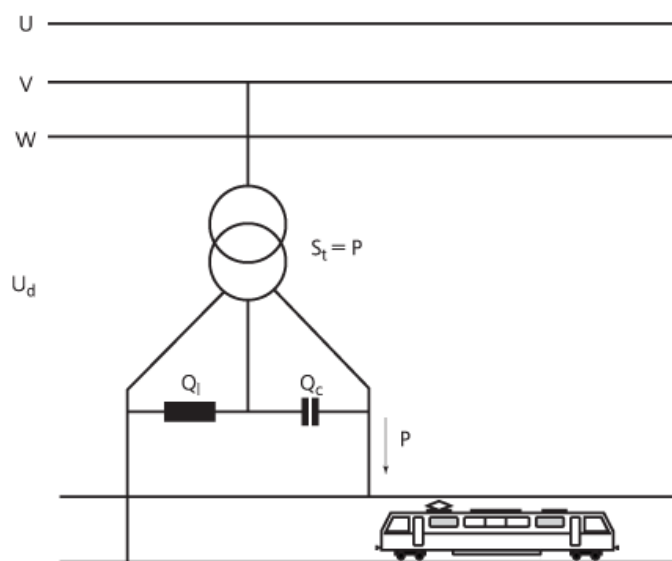


Рисунок 1.5.1.3.2 - Однофазная нагрузка, присоединенная к трехфазной сети при помощи трансформатора по схеме Штайнмеца

1.5.1.4 Современные силовые электронные устройства

Для ограничения дисбаланса фазных токов и напряжений могут применяться специальные быстродействующие электронные силовые устройства. За счет оперативного изменения величины дополнительного сопротивления достигается эффект компенсации отклонений тока и напряжения как на недогруженных, так и на перегруженных фазах. Также основным преимуществом данного типа устройств является возможность компенсации реактивной мощности наряду с симметризацией трехфазной сети. Силовые симметрирующие электронные устройства в основном применяются для очень больших нагрузок, поскольку остальные способы компенсации несимметрии для них неэффективны (например, для дуговых печей) [83].

1.5.1.5 Применение электромашинных преобразователей

При применении электромашинных преобразователей числа фаз происходит электрическое разделение трехфазной питающей сети и однофазной нагрузки за счет преобразования энергии трехфазного электродвигателя в энергию однофазного генератора. Основным недостатком данного метода является значительное увеличение установленной мощности и удорожание оборудования. Также в ходе многоступенчатого преобразования энергии увеличиваются потери, величина которых доходит до 20% [33].

В подразделе 1.5.1 были рассмотрены различные способы компенсации несимметрии. Рассмотренные методы позволяют устранить несимметрию напряжений в трехфазных системах, однако не ясно, применимы ли они к четырехпроводным системам.

Если метод переключения нагрузок можно применять в четырехпроводных системах, то остальные технические средства

компенсации несимметрии используются только в трехпроводных системах и никак не учитывают влияние несимметрии на ток нулевого провода.

1.5.2 Устройства компенсации несинусоидальности

Рассмотрим основные способы подавления высших гармоник тока путем применения:

- линейных дросселей;
- пассивных фильтров;
- активных фильтров;
- гибридных фильтров.

1.5.2.1 Применение линейных дросселей

Включение линейных дросселей последовательно нелинейной нагрузке, генерирующей высшие гармоники во внешнюю сеть, является простейшим способом снижения уровня несинусоидальности (рисунок 1.5.2.1.1). Конструктивно дроссель это катушка индуктивности, которая имеет очень малое значения сопротивления на основной гармонике и высокие значения индуктивных сопротивлений для высших гармоник, за счет чего уменьшаются гармонические составляющие токов нагрузки. Недостатком применения линейного дросселя является различная степень компенсации высших гармоник при переменном гармоническом спектре нагрузки.

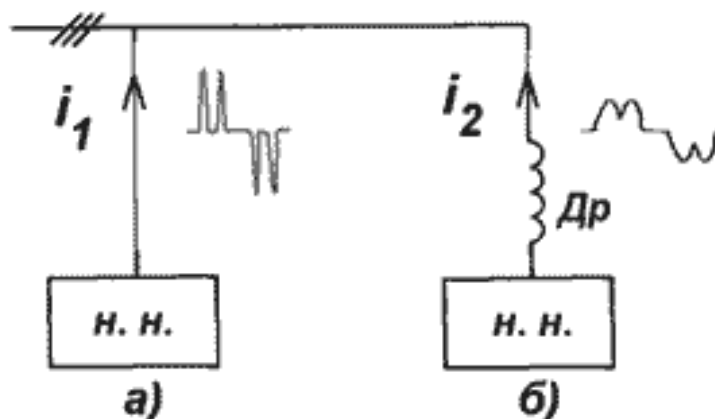


Рисунок 1.5.2.1.1 - Кривые токов нелинейных нагрузок:
а) без дросселя, б) при последовательном включении дросселя

1.5.2.2 Применение пассивных фильтров

Применение пассивных LC-фильтров эффективно в том случае, когда не дает эффекта применение линейных дросселей. Пассивные фильтры конструктивно настраиваются на определенный спектр гармоник за счет комбинаций индуктивностей и ёмкостей. Зачастую такие фильтры применяются в системах с бесперебойными источниками питания, в которых используются шестиполупериодные выпрямители. За счет этого достигается снижение несинусоидальности тока с более чем 30% до 8-10% .

На рисунке 1.5.2.2.1 изображена структура подключения пассивного фильтра.

Пассивные фильтры обладают следующим рядом преимуществ:

- простота проектирования и изготовления по сравнению с другими устройствами компенсации высших гармоник.
- надежность и экономичность конструкции;

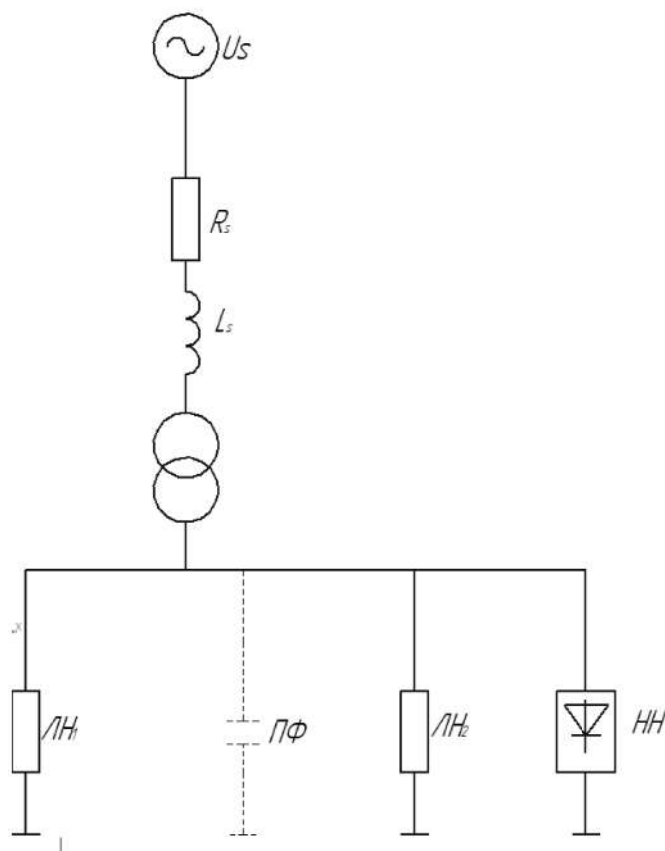


Рисунок 1.5.2.2.1 - Схема подключения пассивного фильтра

- возможность изготовления пассивных фильтров больших мощностей
- в процессе использования пассивные фильтры не требуют дополнительных эксплуатационных затрат;
- в пассивных фильтрах отсутствует возможность короткого замыкания в отличие от синхронных компенсаторов;
- возможность коррекции коэффициента мощности и снижения падения напряжения при запуске мощных асинхронных двигателей.

В связи со всем вышесказанным пассивные фильтры получили широкое распространение во многих отраслях электроэнергетики. Однако необходимо учитывать недостатки пассивных фильтров, которые заключаются в следующем [84,85]:

- узкий спектр компенсируемых гармоник, большие габариты;

- возможность возникновения резонанса с сопротивлением системы питания на основной и/или других частотах;
- невозможность изменения спектра компенсируемых гармоник и габаритов фильтра после установки;
- возможность уменьшения эффективности работы фильтра из-за изменения его параметров, вызванных внешними воздействиями, а также старением изоляции;
- для жестких систем: условие эффективной работы пассивного фильтра - сопротивление фильтра должно быть меньше сопротивления системы;
- необходимость контроля коммутационных перенапряжений;
- невозможность осуществления бесступенчатое управление, так как фильтр может быть либо включен, либо выключен [86].

1.5.2.3 Применение активных фильтров высших гармоник

Активные фильтры получили развитие в результате создания мощных силовых элементов – IGBT и MOSFET транзисторов, несмотря на то, что уже в 1970-х годах были сформированы основные принципы их работы.

В активном фильтре через трансформатор, подключенный параллельно или последовательно нелинейной нагрузке, включается шунтирующий управляемый выпрямитель, в качестве нагрузки которого выступает емкость на стороне постоянного тока. За управление схемы активного фильтра отвечает контроллер, который реагирует на мгновенные значения тока нелинейной нагрузки и вырабатывает сигнал управления силовой части схемы. В свою очередь силовая часть формирует компенсирующий ток, который находится в противофазе с токами гармоник, и передает его через трансформатор связи. В результате работы активного фильтра происходит

подавление токов высших гармоник в зависимости от коэффициента усиления управляющей части схемы [87].

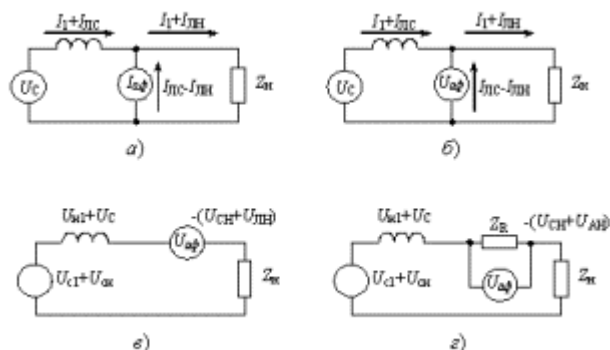


Рисунок 1.5.2.3.1 - Основные типы активных фильтров: а - параллельный источник тока; б - параллельный источник напряжения; в - последовательный источник напряжения; г - последовательный источник тока

При использовании последовательной схемы активного фильтра вырабатывается компенсирующее напряжение, за счет которого происходит подавление гармонических токов. При использовании преобразователей с широтно-импульсной модуляцией активный фильтр может выполняться как по схеме с источником напряжения, так и по схеме с источником тока.

Для снижения гармонического состава тока нагрузки, вызываемого наличием нелинейных устройств, в основном применяется схема включения активного фильтра параллельно нагрузке.

Стоит отметить, что помимо подавления гармоник тока нагрузки последовательный активный фильтр также может использоваться для устранения несимметрии при работе дуговых печей и мощных электродвигателей с частыми пусками и для регулирования напряжения основной гармоники (но только в узком диапазоне).

Основным недостатком применения чисто активных фильтров считается их высокая стоимость.

1.5.2.4 Применение гибридных фильтров высших гармоник

В конце 1980-х годов были предложены первые схемы последовательного (серийного) и параллельного (шунтирующего) гибридных фильтров. По сравнению с параллельным активным фильтром мощность активной части гибридного фильтра в несколько раз ниже, что уменьшает проблему высокой стоимости фильтров. Вместе с тем устраняются такие недостатки пассивного фильтра, как невозможность его применения в динамических системах и высокая добротность, что является особенно важным при необходимости выбора фильтра большой мощности.

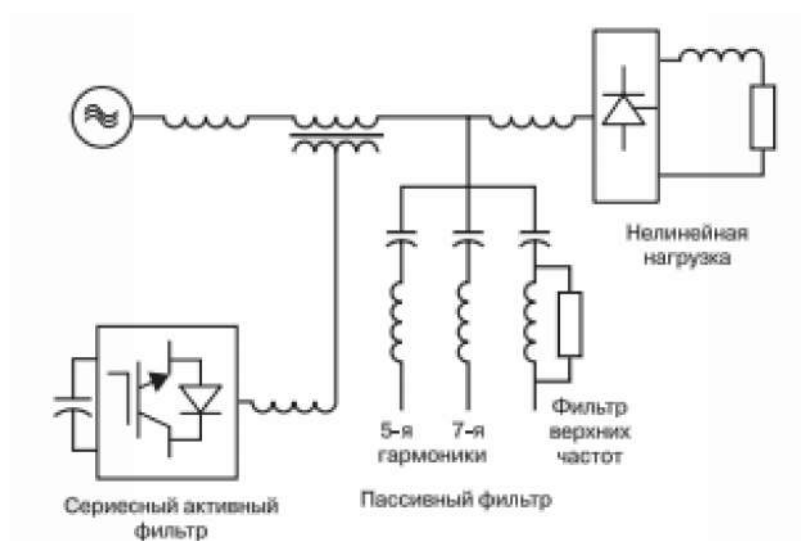


Рисунок 1.5.2.4.1 - Однолинейная схема серийного гибридного фильтра

Стоит отметить следующие преимущества, которые достигаются за счет автоматической коррекции параметров гибридных фильтров при изменении режима работы нагрузки в трехфазной сети:

- возможность коррекции частотных характеристик в статических режимах работы трехфазной сети;

- при изменении параметров работы гибридного фильтра при динамической нагрузке характеристики фильтрации изменяются в меньших пределах по сравнению с пассивными фильтрами;
- исключается возможность возникновения резонанса на частотах, близких к спектру фильтрации;
- снижение уровня гармоник тока в сети от различных источников нелинейности.

Гибридные активные фильтры выполняются обычно по схеме источника напряжения на ШИМ-преобразователях и включают пассивные компоненты R-L-C [87]

В подразделе 1.5.2 рассмотрены различные методы компенсации несинусоидальности. Представленные устройства позволяют снизить гармонические составляющие токов фаз, что автоматически приведет к снижению тока нулевого провода за счет компенсации токов гармоник, кратных трем, а также несимметричных токов остальных высших гармоник, однако не показано, в какой степени применение устройств компенсации высших гармоник позволит снизить действующее значение тока нулевого провода.

1.6 Характерные схемы электроснабжения

В разделе рассмотрены схемы электроснабжения нефтяной, металлургической, горнорудной промышленности, социальных объектов, а также основное используемое электрооборудование и режимы его работы.

Объекты нефтяной промышленности имеют большое число синхронных и асинхронных двигателей с частотным регулированием [88, 89].

Расчетная мощность электроприемников на компрессорных станциях может превышать 100 МВт, на насосных перекачивающих станциях магистральных нефтепроводов - 40 - 60 МВт.

Один из вариантов схемы электроснабжения нефтяного промысла представлен на рисунке 1.6.1 [90].

Стоит отметить, что на подстанциях предприятий нефтяной промышленности используются различные силовые трансформаторы 110/35; 110/6; 35/6; 35/0,4-0,69; 6-10/0,23-0,4-0,69 кВ, мощность которых может достигать десятков мегавольт-ампер. Причем трансформаторные подстанции 6/0,4 кВ осуществляют питание электрооборудования насосных скважин.

Количество питающих линий, отходящих от одной трансформаторной подстанции может достигать нескольких десятков, причем наиболее распространенные сечения кабельных линий составляют от 70 до 150 мм².

Анализ типов электрооборудования и системы электроснабжения электротехнического комплекса нефтяных промыслов показал, что существенная доля нагрузки запитывается от сети низкого напряжения, представляющей собой четырехпроводную трехфазную систему с нулевым проводом.

Нагрузка, как правило, состоит из электроприводов с частотным регулированием, а значит является источником несинусоидального тока.

На современных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) расчетные мощности насосов и компрессоров могут варьироваться от 0,4 до 12000 кВт.

Также применяются электродвигатели мощностью до 200 кВт на напряжение 380 В. Нагрузка электродвигателей составляет около 50% всей нагрузки нефтеперерабатывающего завода.

Стоит отметить, что оборудование НПЗ имеет в основном продолжительный график работы с неизменным суточным графиком нагрузки. На НПЗ используется медный с сечением от 50 до 120 мм².

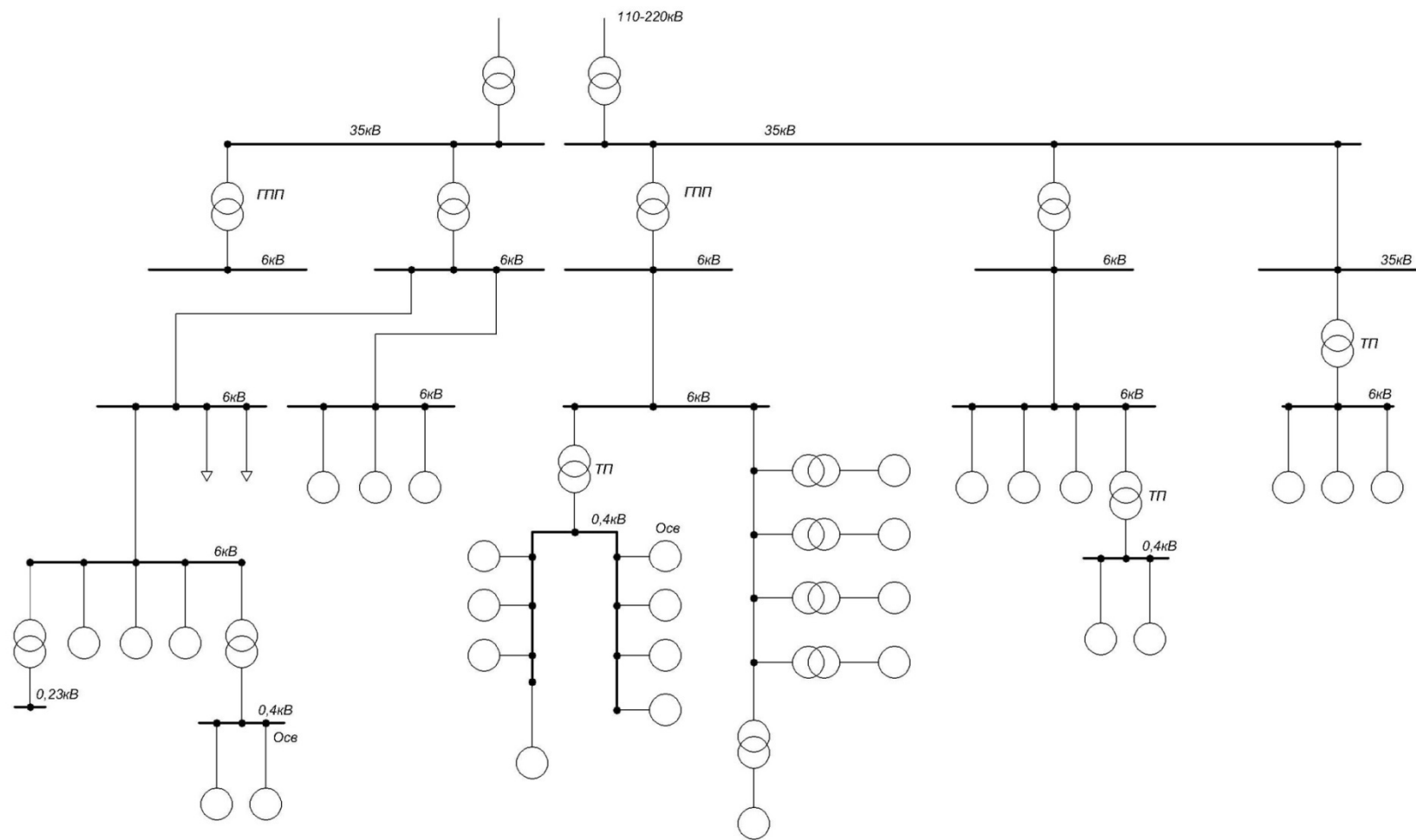


Рисунок 1.6.1 - Вариант схемы электроснабжения объектов нефтяных промыслов: ЦП - центр питания; ГПП - главная понижающая подстанция; РП - распределительный пункт; ТП - трансформаторная подстанция; БУ - буровая установка

Электроснабжение нефтеперерабатывающего предприятия осуществляется по радиальной схеме (рисунок 1.6.2).

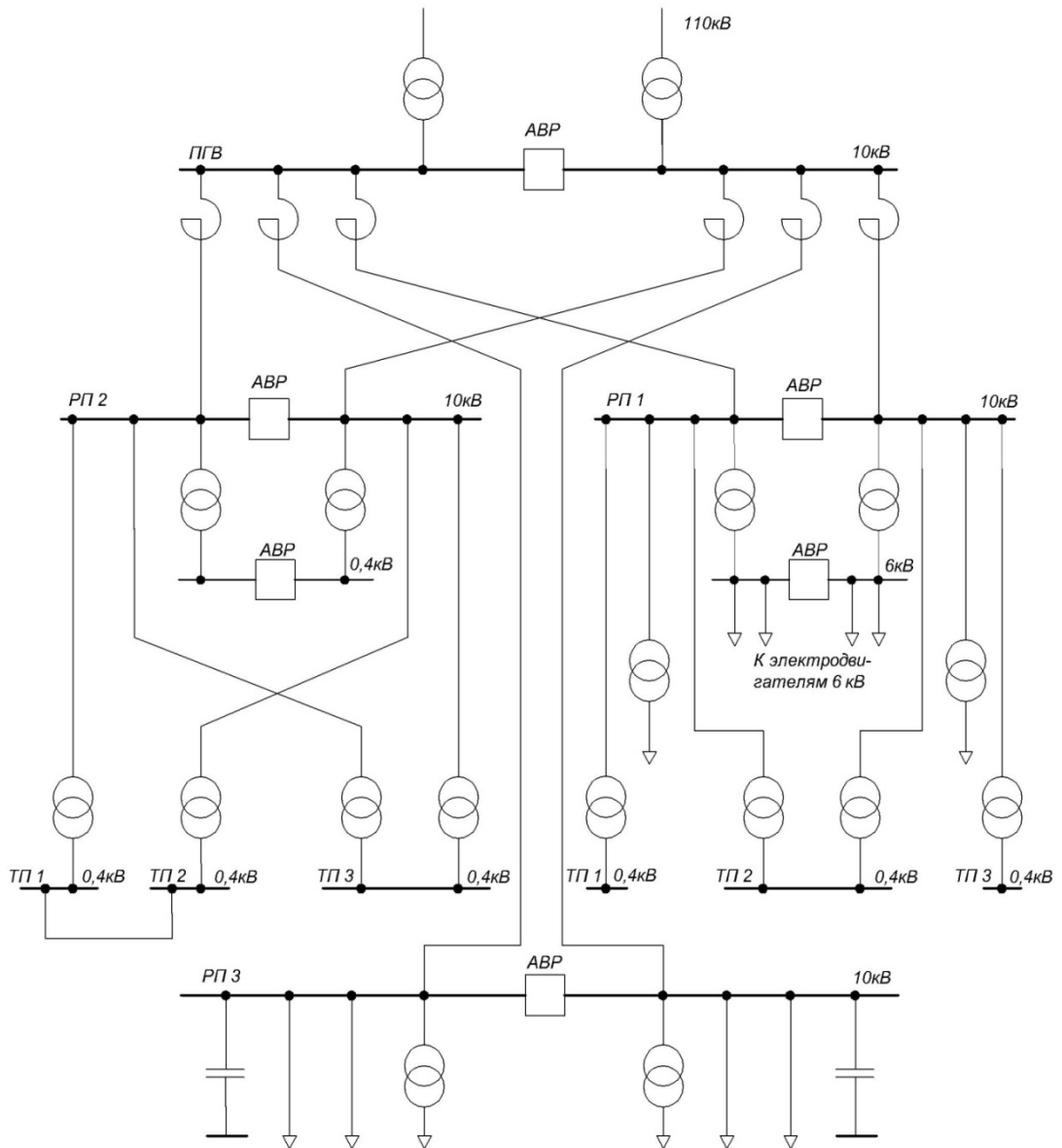


Рисунок 1.6.2 - Схема электроснабжения нефтеперерабатывающего предприятия

Электроснабжение металлургических заводов, осуществляется по схеме, приведенной на рисунке 1.6.3.

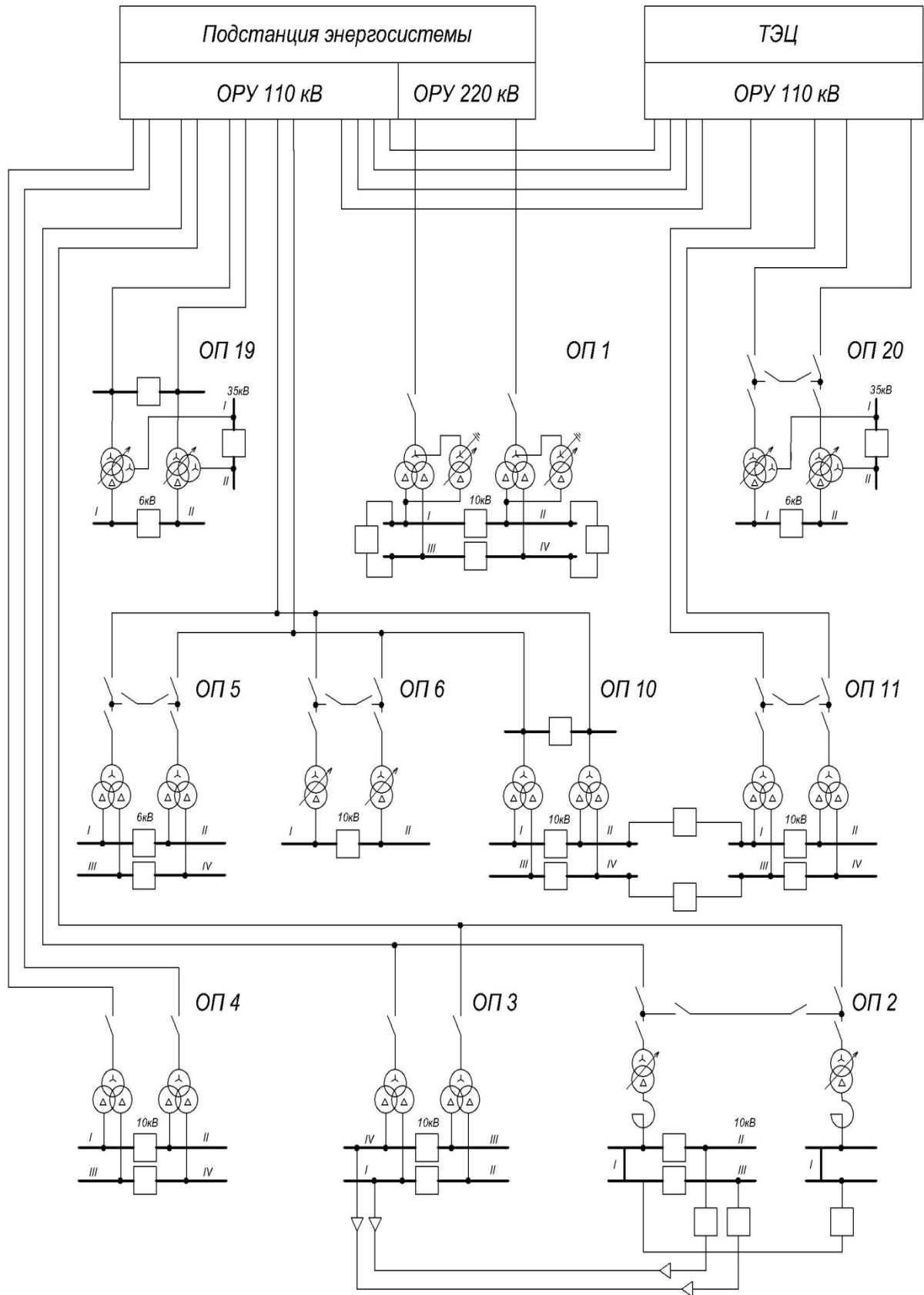


Рисунок 1.6.3 - Схема электроснабжения металлургического завода

Стоит отметить, что на металлургических заводах с полным циклом имеются мощные нелинейные резкопеременные несимметричные потребители. Трансформаторные подстанции 10(6)/0,4 кВ, от которых получают питание осветительные приборы с лампами накаливания, чувствительные к изменениям показателей качества электроэнергии, подключаются к секции шин 10(6) кВ, не питающей резкопеременные нагрузки.

На металлургическом предприятии наиболее мощные дуговые сталеплавильные печи имеют мощность 25 и 50 МВА. Также существуют печи с печными трансформаторами мощностью 80 МВА[92]. Питание электротехнического комплекса металлургических предприятий осуществляется по кабельным линиям с медными и алюминиевыми проводами с сечением до 150 мм².

На рисунке 1.6.4 приведена схема питания дуговых сталеплавильных печей.

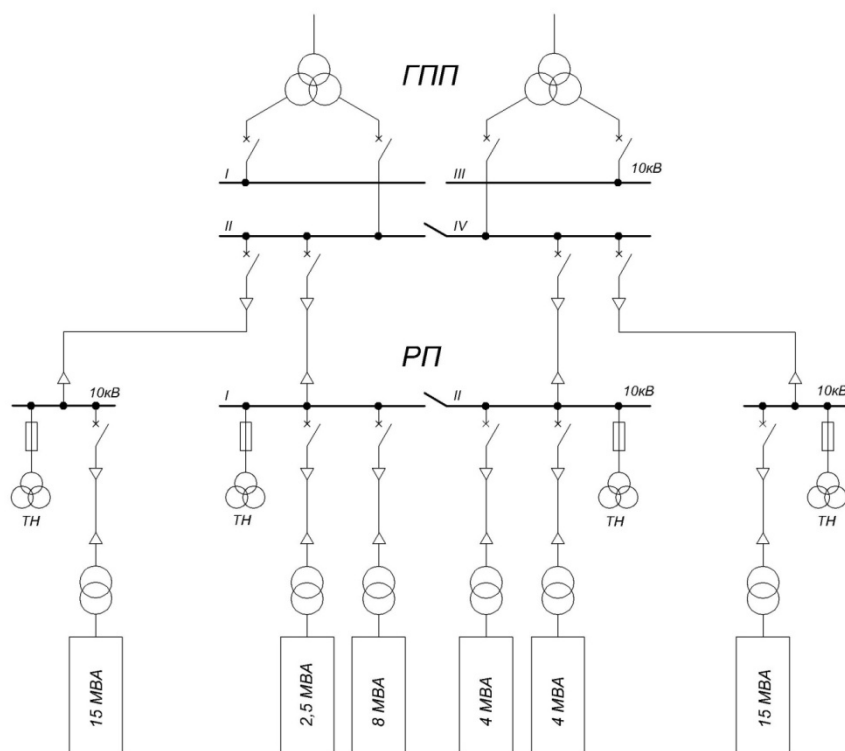


Рисунок 1.6.4 - Схема питания дуговых сталеплавильных печей

Основными производственными мощностями химической промышленности являются центробежные насосы мощностью 6-15000 кВт, поршневые компрессоры и турбокомпрессоры мощностью 50-12000 кВт [93].

Режим работы электродвигателей на предприятиях химической промышленности в основном продолжительный, но имеются приводы, работающие кратковременно. Тяжелые условия пуска, после которого нагрузка может упасть в 2-3 раза, наблюдаются у центрифуг, которые имеют циклический режим работы. В резиновой промышленности наблюдается резкопеременная нагрузка с длительностью цикла 20-40 минут [94].

Мощность современных химических комбинатов может достигать 2100 МВт (заводы атомной промышленности).

На рисунке 1.6.5 представлена схема внешнего электроснабжения нефтехимического комбината.

Мощности приводов механизмов в бумажной и картонной промышленности колеблются от 1,5 до 9000 кВт. Напряжение 380 В применяется для электроприемников мощностью до 250 кВт. Большинство электродвигателей имеет продолжительный режим работы.

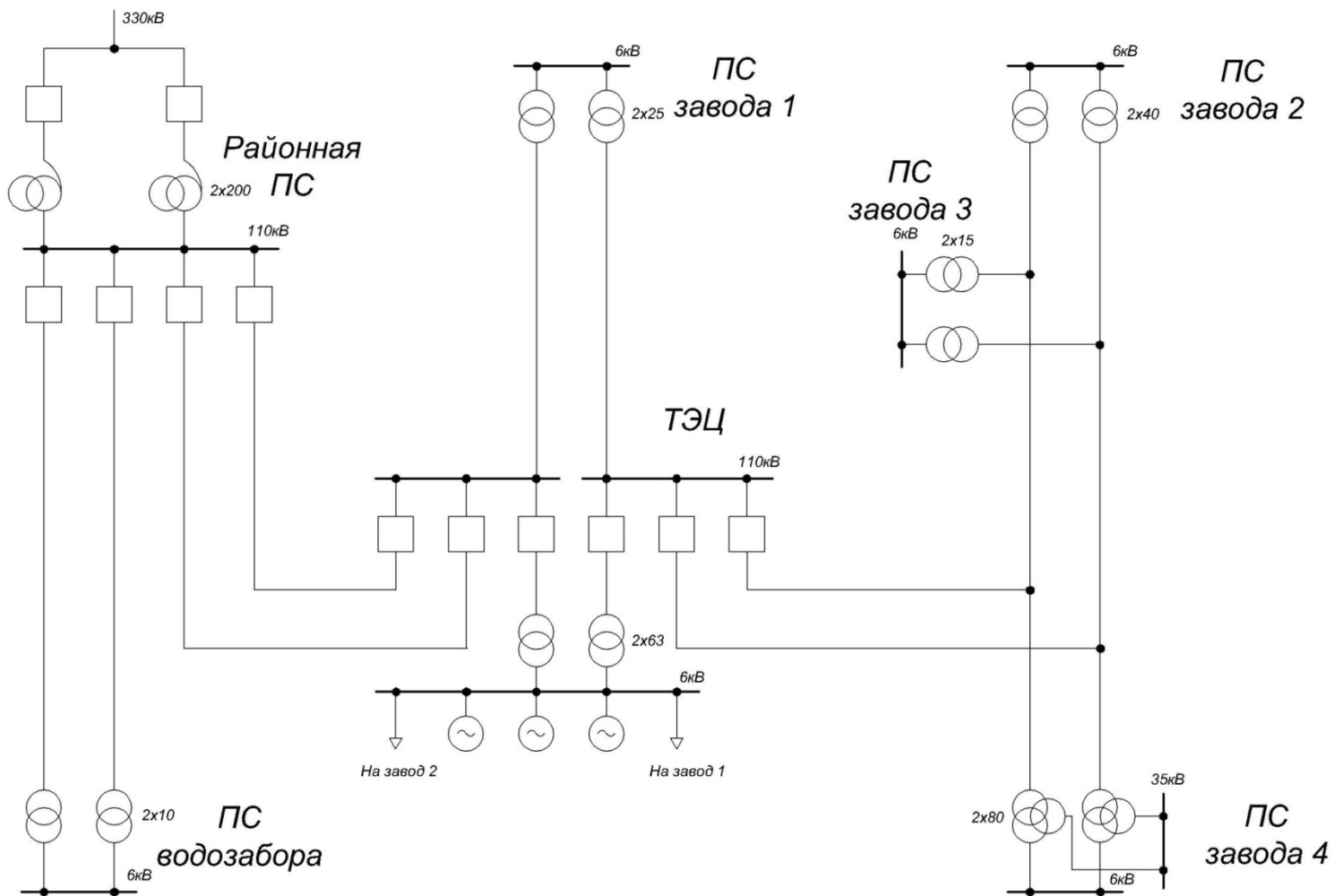


Рисунок 1.6.5 - Схема внешнего электроснабжения нефтехимического комбината с нагрузкой 300 МВт

Схема электроснабжения целлюлозно-бумажного завода представлена на рисунке 1.6.6.

Кабельные линии, применяемые на целлюлозно-бумажном комбинате имеют сечение от 70 до 150 мм².

Основные электропотребители предприятий легкой промышленности обычно имеют мощность до 50 кВт. Однако отдельные суммарные мощности агрегатов могут достигать 200 кВт.

Режим работы большинства электроприводов – продолжительный с коэффициентом спроса 80-90%.

В таблице 1.6.1 приведены [95] ориентировочные данные о соотношениях нагрузок электроприемников на предприятиях разных отраслей промышленности.

Таблица 1.6.1 - Соотношение нагрузок приемников электроэнергии на предприятиях разных отраслей промышленности, %

Отрасль народного хозяйства	Синхронные двигатели 6-10 кВ	Асинхронные двигатели		Освещение	Печи дуговые	Печи	Печи сопротивления	Выпрямители	Прочая нагрузка
		6-10 кВ	380 В						
Металлургия	25	10	37	3	4	7	3	11	-
Горнорудная	21	21	47	5	-	-	-	-	6
Химическая	40	24	29	2	-	2	1	2	-
Легкая	-	6	78	12	-	-	-	-	10
Машиностроение	8	5	52	5	7	6	14	3	-
Нефтедобывающая	8	48	30	5	-	-	-	-	9
Газовая	40	58	-	2	-	-	-	-	-
Нефтеперерабатывающая	26	18	50	2	-	-	-	-	-

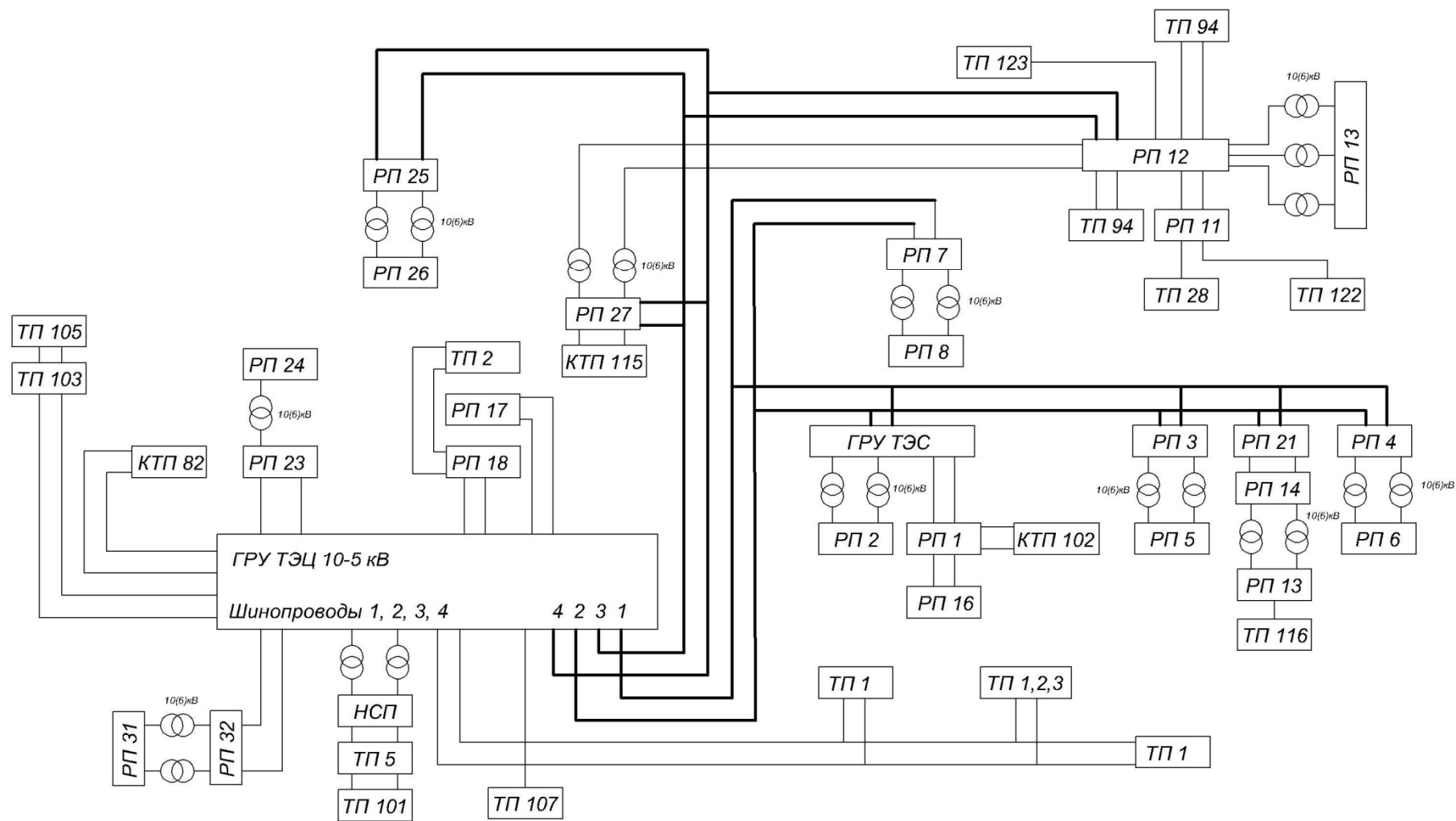


Рисунок 1.6.6 - Схема внешнего электроснабжения целлюлозно-бумажного завода

На основе анализа схем электроснабжения промышленных предприятий и технической литературы [96 - 99] выявлено, что обобщенная принципиальная схема электроснабжения может иметь вид, представленный на рисунке 1.6.7.

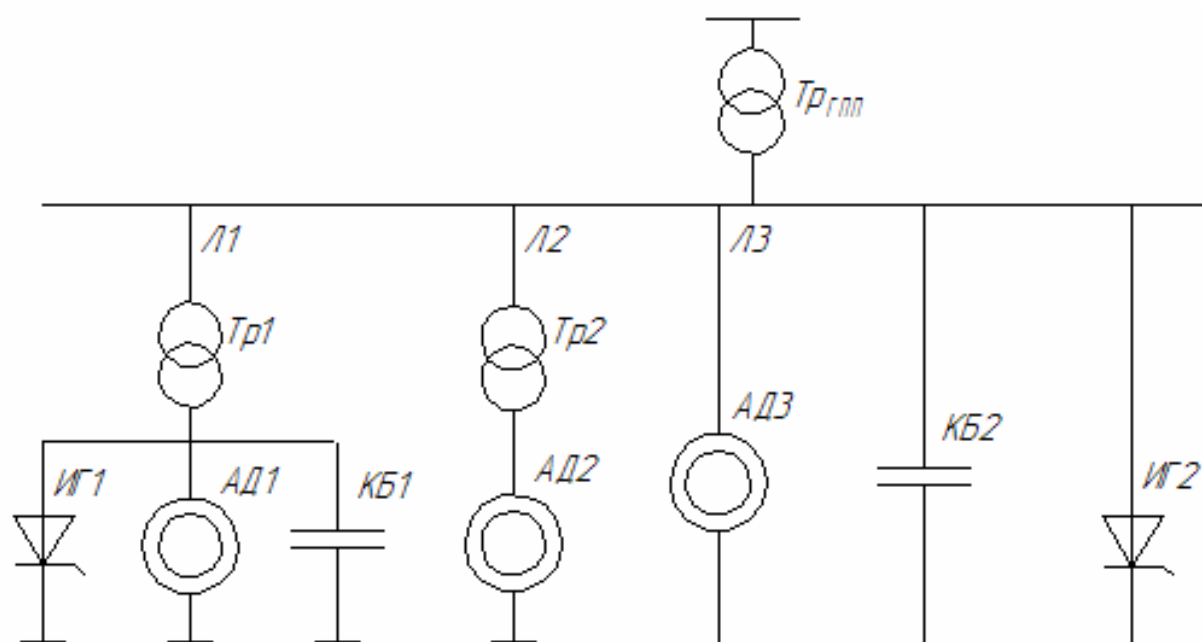


Рисунок 1.6.7 - Обобщенная принципиальная однолинейная схема предприятия: ИГ – эквивалентная нелинейная нагрузка; Тр ГПП – трансформатор ГПП; Тр – понижающий трансформатор; АД – эквивалентная линейная нагрузка предприятия; КБ – конденсаторные батареи; Л – линия электропередач.

В результате анализа литературных источников была получена таблица показателей качества электроэнергии трехфазных нагрузок для различных промышленных предприятий.

Таблица 1.6.2 - Характеристика нелинейных и несимметричных нагрузок на промышленных предприятиях

Отрасль промышленности	Вид оборудования	U _н , кВ	Диапазон изменения ПКЭ	
			Коэффициент несимметрии, %	Коэффициент несинусоидальности, %
Черная металлургия	Листовые станы горячей прокатки	10	0 - 2,2	7 - 13
	Реверсивные станы с вертикальным электроприводом	10	-	15-30
	Дуговые электропечи	35	2 - 2,6	6-7
Металлургия, машиностроение	Сварочные установки	6 - 10	0,75 - 4,5	1,5 - 8
		0,38	—	7 - 8
Цветная металлургия	Электролизное производство	10 0,38	—	8,3 - 12 6 - 8
Химическая	Производство удобрений	6—10 0,38	0 - 2,0	3 - 6 6 - 8
Целлюлозно-бумажная	Производство целлюлозы	10 0,38		3 - 7
Горнорудная	Обогатительная фабрика	0,38	0 - 3	7 - 9
Социальная	Больница	0,38	8 - 20	18 - 30

Как видно из таблицы 1.6.2 на промышленных предприятиях представлена различная трехфазная нагрузка, которая может иметь как нелинейный, так и одновременно несимметричный характер.

Из анализа существующих схем электроснабжения можно сделать вывод, о том, что на любом промышленном предприятии существует распределительная сеть 0.4 кВ, в которой представлена нелинейная и несимметричная нагрузка.

Очевидно, что наиболее эффективно проводить исследования на примере предприятия, электротехнический комплекс которого обладает наиболее ярко выраженной несимметрией и несинусоидальностью нагрузки, а затем полученные результаты обобщить с целью возможности их распространения на любые другие предприятия.

Исходя из вышесказанного объектом исследования выбрана трехфазная четырехпроводная электрическая сеть социального объекта с наибольшим диапазоном изменения коэффициентов несинусоидальности и несимметрии.

Выводы к главе 1

Проведенный анализ показал, что при работе нелинейной несимметричной нагрузки ток в нулевом проводе может значительно превышать значения тока при работе аналогичной по величине несимметричной линейной и симметричной нелинейной нагрузки.

В приведенном примере ток в нулевом проводе при работе нелинейной несимметричной нагрузки превысил в 1.33 раза и 2.28 раза соответственно токи при работе симметричной нелинейной и несимметричной линейной нагрузки.

Отсюда можно сделать вывод, что несимметрия, как и несинусоидальность приводят к увеличению тока нулевого провода. Однако их совместное влияние на ток нулевого провода не изучено и не существует критерия выбора устройств компенсации тока нулевого провода в условиях работы несимметричной и нелинейной нагрузки. Также не учтен вариант увеличения сечения нулевого провода при его перегрузке.

Выбран объект исследования – трехфазная четырехпроводная низковольтная система электроснабжения предприятия с нелинейной и несимметричной нагрузкой.

Обеспечение бесперебойной работы оборудования электротехнического комплекса предприятия путем оптимизации величины тока в нулевом проводе в его низковольтной четырехпроводной системе электроснабжения.

И для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выявление основных параметров, определяющих изменение тока нулевого провода в 4-х проводной системе электроснабжения;
2. Определение зависимости величины тока нулевого провода от взаимовлияния выявленных параметров;
3. Разработка критерия выбора параметров электроснабжения устройств, обеспечивающих бесперебойность работы оборудования;
4. Разработка алгоритма выбора параметров устройств, обеспечивающих бесперебойность работы оборудования;
5. Оценка эффективности применения разработанного алгоритма.

ГЛАВА 2 ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ НУЛЕВОГО ТОКА

2.1 Анализ экспериментальных данных

Из выводов к первой главе следует, что значительное влияние на величину нулевого тока в четырехпроводной сети в одинаковой степени могут влиять как несинусоидальность электроприемников, так и несимметрия нагрузки.

Для иллюстрации указанного влияния ниже представлены данные, полученные в сети объекта, для которого характерна нелинейная нагрузка и несимметрия.

Состав основной нагрузки представлен в таблице 2.1.1 [100-102].

Таблица 2.1.1 - Состав нелинейной нагрузки

Тип нагрузки	Исполнение	Мощность
Магнито-резонансный томограф (МРТ)	Трехфазное, нагрузка симметричная	100 кВт
Компьютерный томограф (КТ)	Трехфазное, нагрузка несимметричная	50-80 кВт

Измерения проводились в узлах нагрузки, к которым подключена нелинейная нагрузка наибольшей мощности.

Измерения проводились с помощью анализаторов качества электроэнергии Fluke 435 и Ресурс УФ-2М.

На рисунках 2.1.1-2.1.7 представлены кривые напряжения на шинах 0,4 кВ, кривые тока на КТ и т.д.

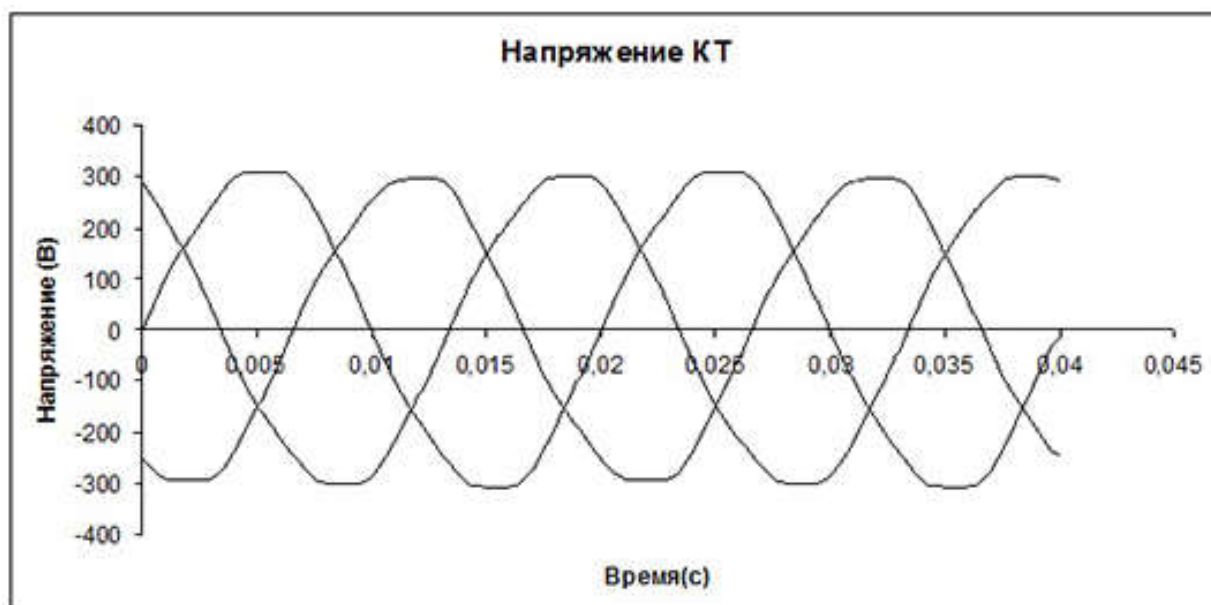


Рисунок 2.1.1 - Кривая напряжения КТ

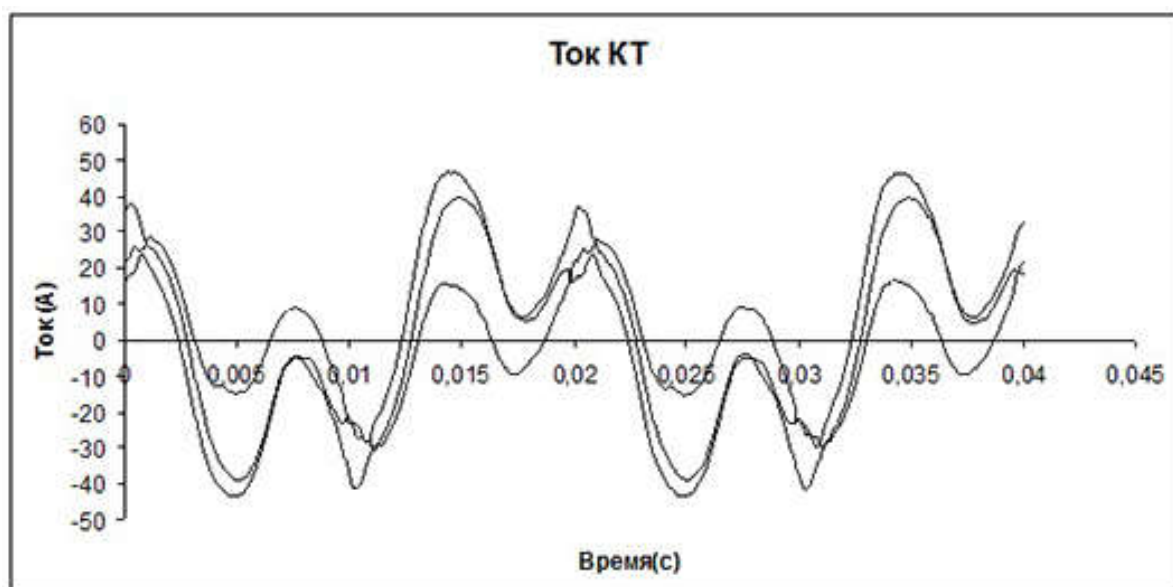


Рисунок 2.1.2 - Кривая тока КТ

Из анализа графиков на рисунке 2.1.2 выявлено, что действующее значения тока фазы А – 27 А, фазы В – 27 А, фазы С – 18,6 А.



Рисунок 2.1.3 - Кривая тока в нулевом проводе КТ

Из анализа графика на рисунке 2.1.3 выявлено, что действующее значения тока нулевого провода составило 70,8 А, что более чем в 2,5 раза выше значений фазных токов.

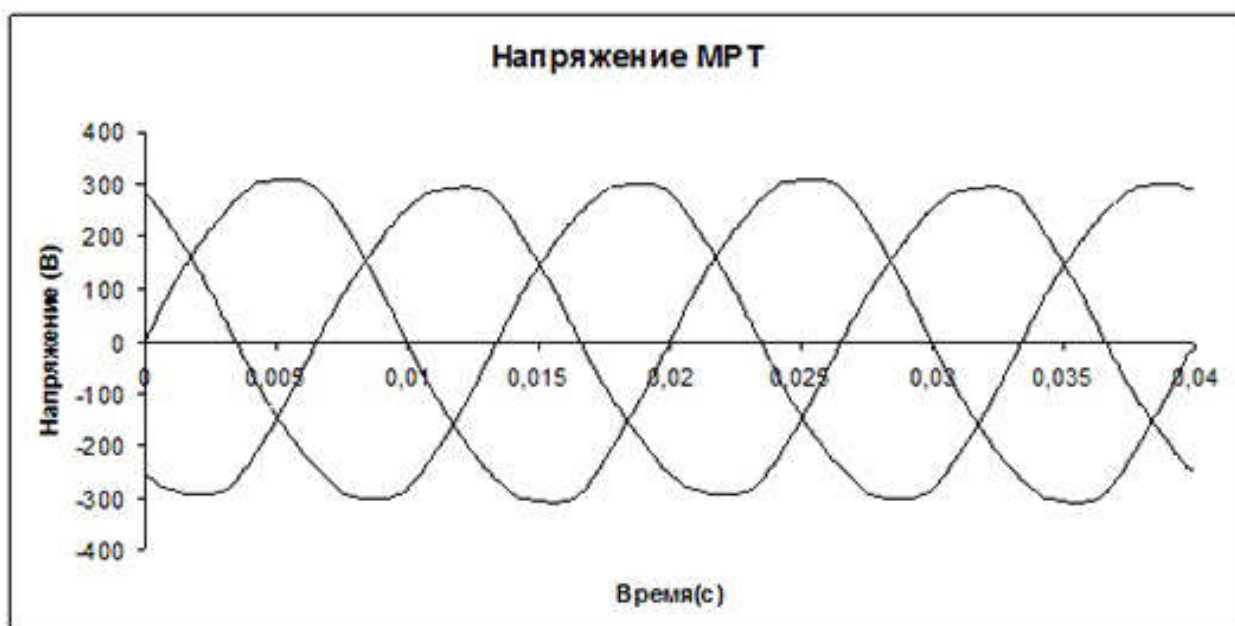


Рисунок 2.1.4 - Кривая напряжения МРТ

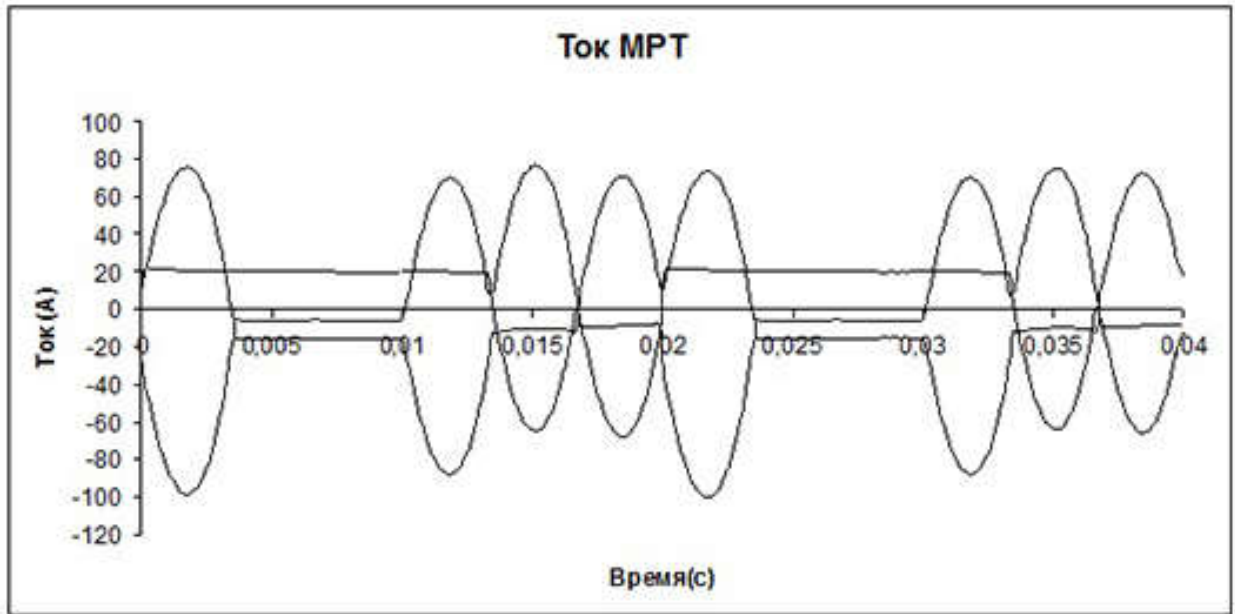


Рисунок 2.1.5 - Кривая тока МРТ

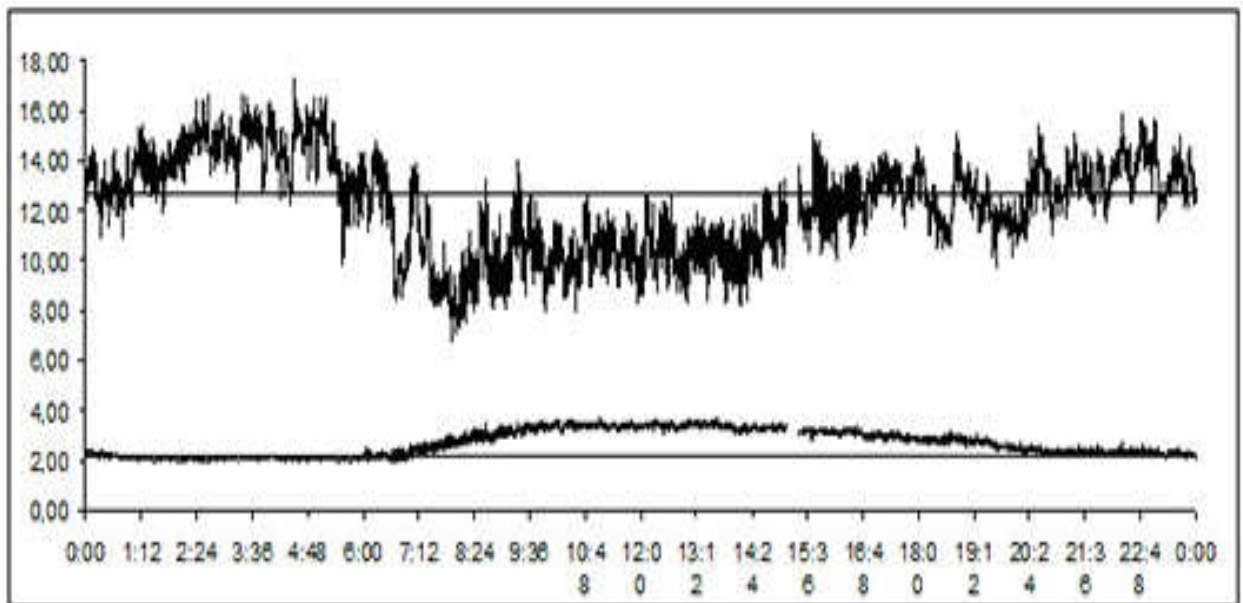


Рисунок 2.1.6 - Коэффициент несинусоидальности для тока и напряжения

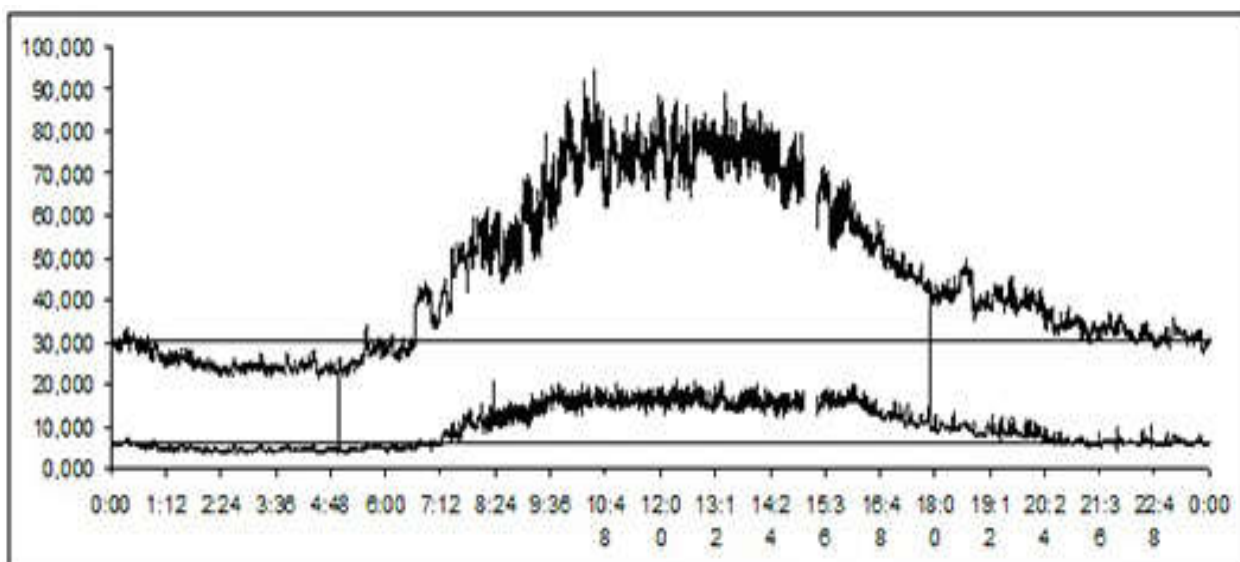


Рисунок 2.1.7 - Мгновенные значения активной и реактивной мощности фазы А ввода 1

С помощью стандартной программы MATLAB было произведено соответствующее разложение кривых тока и напряжения в ряд Фурье, на основе чего были получены их спектры, представленные на рисунках 2.1.8-2.1.12.

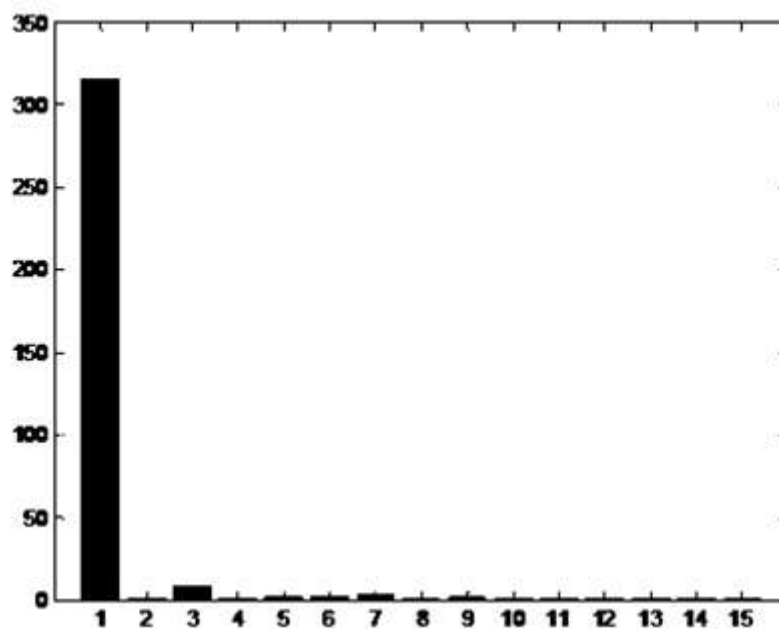


Рисунок 2.1.8 - Спектр напряжения КТ

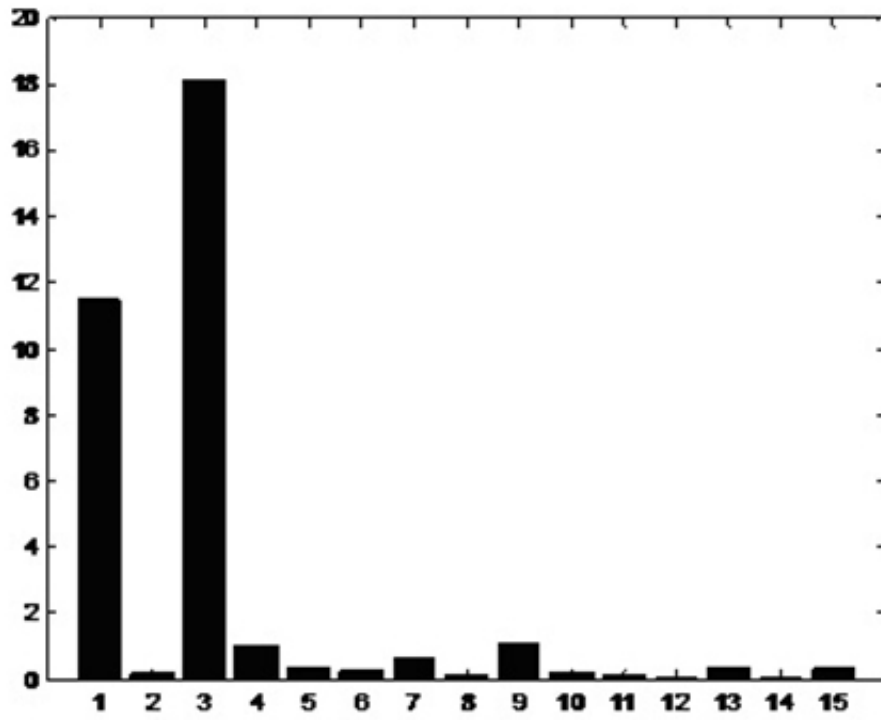


Рисунок 2.1.9 - Спектр тока КТ

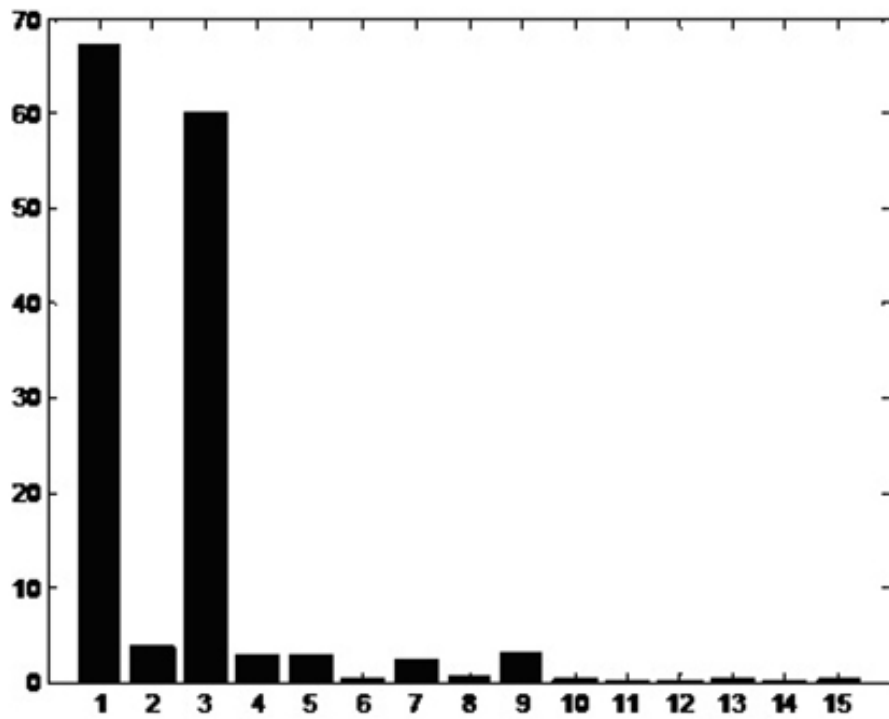


Рисунок 2.1.10 - Спектр тока нулевого провода КТ

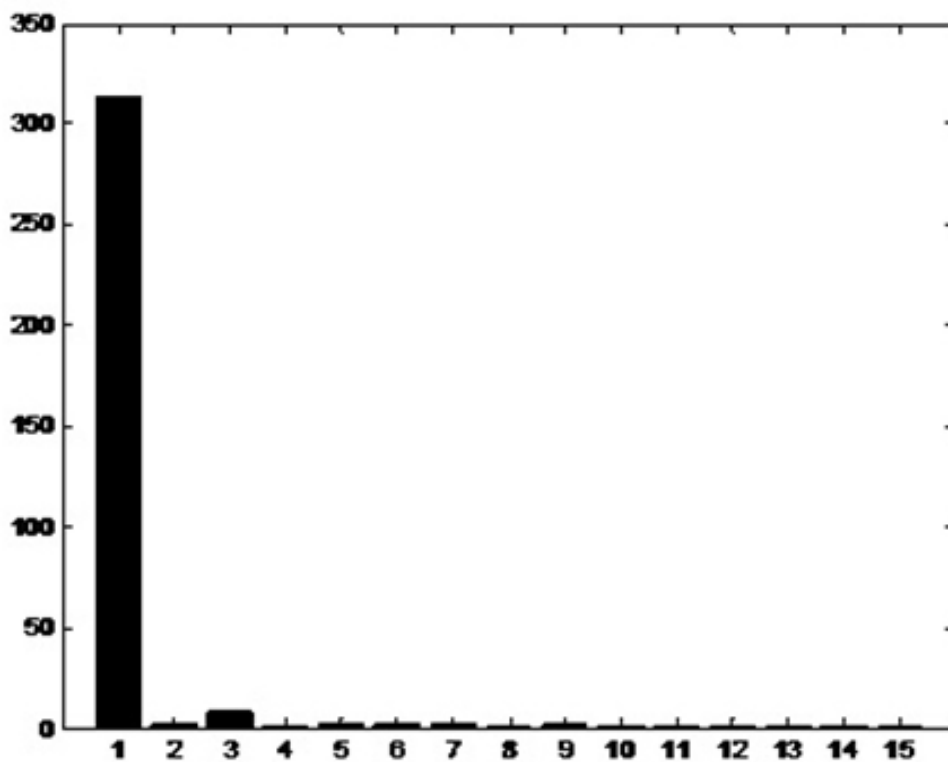


Рисунок 2.1.11 - Спектр напряжения МРТ

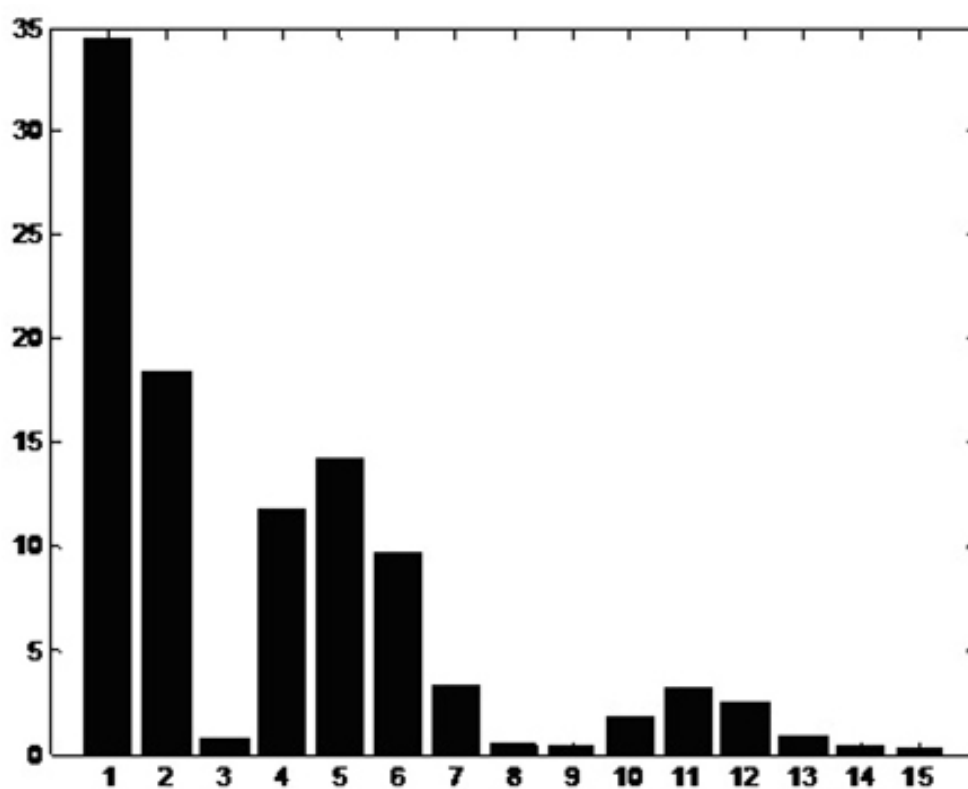


Рисунок 2.1.12 - Спектр тока МРТ

Следует подчеркнуть, что суммарная нагрузка на фидере, на котором были произведены измерения, представляла собой комбинацию трехфазной и однофазной нагрузки.

Из рисунков 2.1.5 и 2.1.12 можно сделать вывод, что несмотря на высокое содержание высших гармоник в фазном токе МРТ, ток в нулевом проводе отсутствует, т.к. в фазном токе МРТ не содержатся токи гармоник, кратных трем, а трехфазная нагрузка МРТ симметрична.

Расчет коэффициентов несимметрии производился по методу симметричных составляющих. По графикам нагрузки были получены уравнения для каждой из фаз, из которых были выделены выражения для основной гармонической составляющей и математически найдены токи прямой, нулевой и обратной последовательности. После чего по формулам

$$k_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100, \% \quad , \quad (2.1.1)$$

$$k_{0I} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100, \% \quad (2.1.2)$$

были найдены коэффициенты несимметрии по прямой и обратной последовательности.

Анализ полученных результатов показал, что:

- значения коэффициента несинусоидальности по напряжению не превышают 2.6% , что допускается нормативными документами [28]. Этот факт объясняется жесткими параметрами сети[103];

- значения коэффициента несинусоидальности по току составляют:

А) для КТ – 180%;

Б) для нулевого провода КТ – 100%;

В) для МРТ – 180%.

- потенциал нейтрали практически равен нулю, т. к. применяется 4-х проводная сеть выполнена;
- фазные токи КТ содержат 1, 3, 5, 7, 9, 11 гармоники. Из высших гармоник наиболее выражена третья;
- ток в нулевом проводе содержит, кроме первой, токи высших гармоник;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности для КТ составил 100%, по нулевой последовательности - 400 %

Из вышепредставленного анализа следует, что:

1. Причиной значительных величин тока в нулевом проводе могут быть как несинусоидальность фазной нагрузки, так и ее несимметрия, либо их совместное действие;
2. Выявлена необходимость изучения совместного влияния несимметрии и несинусоидальности нагрузки на ток в нулевом проводе с целью дальнейшей разработки критерия выбора средств их компенсации;
3. Необходимо разделять решение задачи для действующего предприятия с сформированной схемой электроснабжения, но при изменении состава нагрузки и для проектируемого предприятия.
4. Поскольку нормированные показатели по несимметрии и несинусоидальности в стандартах приводятся в виде относительных коэффициентов, то выводы по проведенному исследованию следует распространять на все четырехпроводные сети, содержащие нелинейную и несимметричную нагрузки.

2.2 Факторы, оказывающие влияние и накладывающие ограничения на ток нулевого провода

В подразделе 2.1 экспериментальные исследования на реальном объекте подтвердили теоретические выводы о том, что на ток нулевого провода влияет как несимметрия, так и несинусоидальность.

Необходимо выяснить, какие факторы, кроме несимметрии и несинусоидальности фазных токов могут оказывать влияние на ток нулевого провода.

В первую очередь рассмотрим ограничение, которое накладывает на величину тока нулевого провода его сечение.

Очевидно, что влияние сечения нулевого провода на ограничение значения нулевого тока можно записать в виде $I_0 \leq I_{S_0}$, где

I_0 - величина тока нулевого провода;

I_{S_0} - максимально допустимое значение тока нулевого провода для сечения нулевого провода S_0 .

Нулевой, как и фазный провод имеют ограничение по величине тока, который может протекать через него. Из-за некорректного подключения потребителей или повреждения фазных проводников суммарный ток, проходящий в нулевом проводе, может превышать номинальное значение.

Также тепловое воздействие на изоляцию проводника резко снижает ее диэлектрические свойства. Например, если проводимость электрокартона (как изоляционного материала) при 20 °С принять за единицу, то при температурах 30, 40 и 50 °С она увеличится в 4, 12 и 36 раз соответственно.

Тепловое старение изоляции наиболее часто возникает из-за токовой перегрузки электрических сетей. Например, для кабелей с бумажной изоляцией срок их службы может быть определен по известному правилу: превышение температуры на каждые 8 °С сокращает срок службы изоляции в 2 раза. Тепловому разрушению подвержены и полимерные изоляционные материалы [104].

Следовательно при превышении токов нулевого провода его максимально допустимого значения необходимо принимать меры к его

уменьшению, чем и объясняется вводимое сечением нулевого провода ограничение на его максимальный ток.

Из анализа технической литературы выявлено, что для нагрузки определенной мощности при различных уровнях напряжения (например 6/10 кВ) коэффициенты несимметрии и несинусоидальности выше при минимальном уровне напряжения и ниже при максимальном [105-110].

В качестве примера влияния уровня напряжения приведена таблица 2.2.1.

Таблица 2.2.1 - Таблица средних значений высших гармоник, полученных на питающей шине при сварочных работах

Напряжение фазы, кВ	Уровень высших гармоник, %						
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я
6	100	1,3	1,5	0,4	2,1	0,2	0,5
0,4	100	2,1	1,9	1,1	3,8	0,4	0,6

Это можно объяснить следующим образом: оборудование имеет фиксируемую мощность S и может работать при двух уровнях напряжения U_1 и U_2 , причем $U_2 > U_1$.

Тогда $I_2 < I_1$, т.к. $I = \frac{S}{U}$, т.е. фазные токи при более высоком уровне

напряжения ниже, чем при более низком.

Отсюда можно сделать вывод, что при более высоком уровне напряжения ток в нулевом проводе также будет ниже, т.к. основные факторы,

определяющие его значение, (несимметрия и несинусоидальность) также уменьшаются.

Также не меньшее влияние на ток нулевого провода может оказывать конфигурация сети и параметры нагрузки.

При одинаковой структуре сети возможен взаимообмен несимметричными фазными нагрузками, что позволит снизить несимметрию в обоих случаях, что автоматически приводит к снижению тока нулевого провода.

Выявлено, что влиять на ток нулевого провода и ограничивать его, кроме несимметрии и несинусоидальности, может также сечение нулевого провода, уровни напряжения в сети и её конфигурация. Причем важным фактором является сечение нулевого провода.

В связи с чем возникает вопрос, каким именно образом влияет тот или иной фактор на величину тока нулевого провода электротехнического комплекса предприятия, а также задача создания функции зависимости тока нулевого провода от вышеперечисленных факторов.

Выводы к главе 2

В ходе проведения эксперимента подтверждены теоретические выводы о том, что на ток нулевого провода в разное степени оказывает влияние как несимметрия фазных токов, так и их несинусоидальность.

Установлено, что подобные выводы можно распространить на предприятия любой мощности нагрузки, так как нормированные показатели по несимметрии и несинусоидальности приводятся в виде относительных коэффициентов, а характер их воздействия на электрические сети любых мощностей однотипно.

Выявлено, что на ток нулевого провода влияют также несколько факторов, таких как: сечение нулевого провода, уровень напряжения и конфигурация сети.

На основе анализа экспериментальных исследований и литературных источников были выявлены основные факторы, определяющие изменение тока нулевого провода в четырехпроводной системе электроснабжения предприятия при переменном характере несинусоидальной и несимметричной нагрузки и фиксированном значении нулевого провода:

- несинусоидальность тока нулевого провода;
- несимметрия токов фаз по нулевой последовательности;
- параметры нагрузки;
- параметры распределительной сети;
- напряжение нагрузки (уровень напряжения).

ГЛАВА 3 ВЫЯВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА

В работе выявлено, что одной из основных проблем, связанных с током нулевого провода в четырехпроводных сетях низкого напряжения, является проблема перегрузки нулевого провода в связи с изменением нагрузки, которая может быть нелинейной и несимметричной.

В связи с этим необходимо определить зависимость величины тока нулевого провода от коэффициентов несимметрии и несинусоидальности, а также выявить их взаимовлияние, которое ограничивается набором факторов, таких как: состав и параметры нагрузки, параметры распределительной сети, уровень напряжения, конфигурация сети и сечение нулевого провода.

3.1 Влияние нелинейной нагрузки на величину тока в нулевом проводе.

Раздел посвящен определению зависимости величины тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности нулевого провода.

Согласно ГОСТ Р 50571.5.52-201:

«...524.2.1 Площадь поперечного сечения нейтрального проводника должна быть, по крайней мере, равна площади поперечного сечения линейных проводников:

...- в трехфазных схемах, где доля токов третьей гармоники и гармоник, кратным трем, лежит в пределах от 15% до 33%.

524.2.2 Если доля третьей гармоники превышает 33%, необходимо увеличить площадь поперечного сечения нейтрального проводника...»

Таким образом, ограничения по сечению нулевого провода отсутствуют.

При подключении нелинейной нагрузки фазные токи гармоник, кратных трем, складываются в нулевом проводе.

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{(3)A} + \dot{I}_{(3)B} + \dot{I}_{(3)C} = I_{(3)A} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + I_{(3)B} \sin(3 \cdot (\omega \cdot t + 240)) + I_{(3)C} \sin(3 \cdot (\omega \cdot t + 120)).$$

В симметричной системе $I_{(3)A} = I_{(3)B} = I_{(3)C}$, тогда

$$\dot{I}_0 = I_{(3)A} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + I_{(3)A} \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 720) + I_{(3)A} \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 360) = 3 \cdot I_{(3)A} \sin(3 \cdot \omega \cdot t + 360).$$

То есть в симметричной трехфазной четырехпроводной системе ток нулевого провода равен утроенной сумме фазных токов гармоник, кратных трем.

Установлено, что при доле токов гармоник, кратных трем, свыше 33% от величины фазного тока значение тока нулевого провода может превышать значения фазных токов (рисунок 3.1.1).

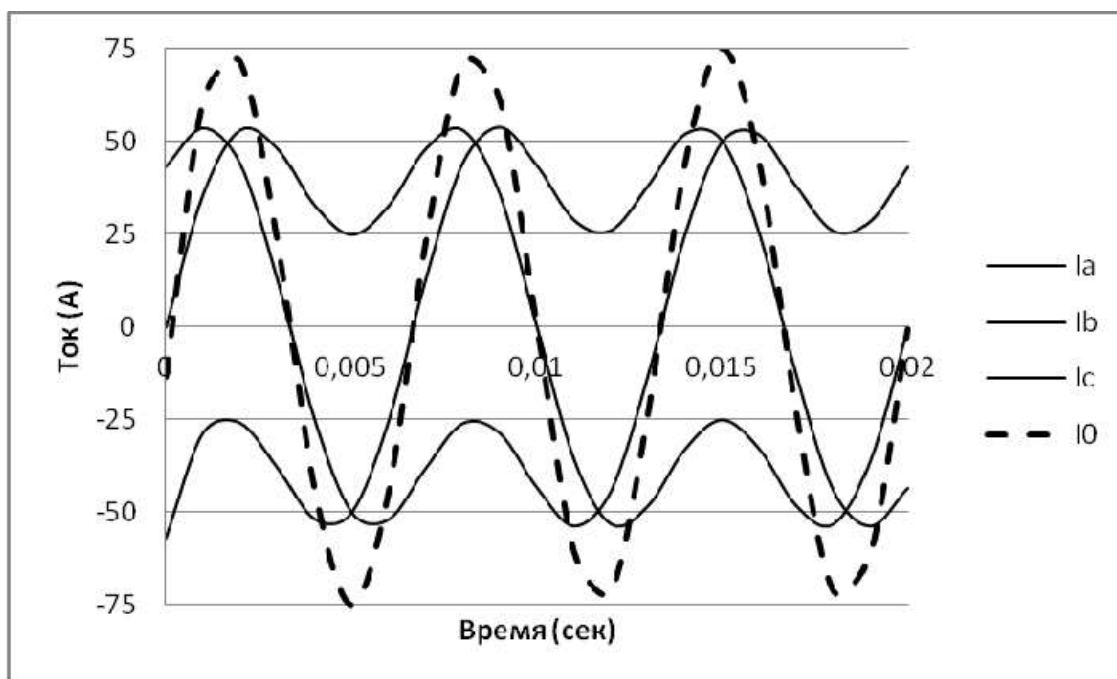


Рисунок 3.1.1 - Токи фаз и нулевого провода при 50% доле токов гармоник, кратных 3

При этом определено, что с увеличением коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода, его значение возрастает нелинейно, как показано на рисунке 3.1.2.

Зависимость получена аналитически и построена в относительных единицах, где за базисную величину тока принято его значение при отсутствии несинусоидальности.

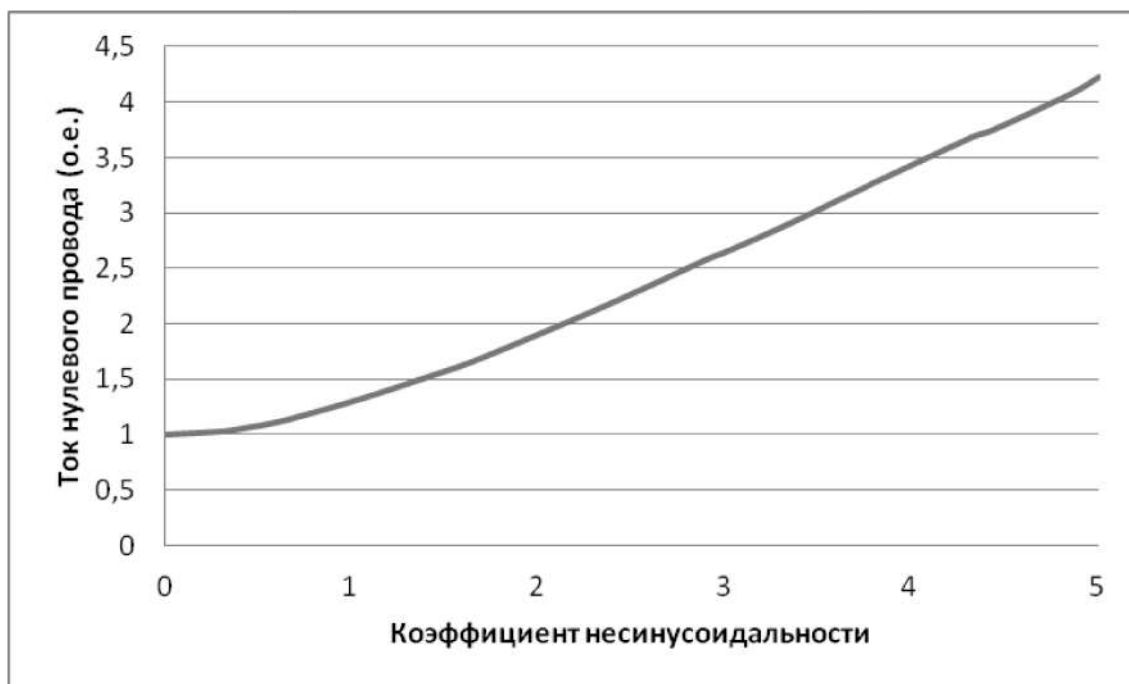


Рисунок 3.1.2 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода

Стоит отметить, что при симметричной трехфазной нагрузке невозможно определить коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода. Для примера график (рисунок 3.1.2) построен при коэффициенте несимметрии по нулевой последовательности равном 7%.

На рисунках 3.1.3-3.1.4 представлены графики зависимости тока нулевого провода при различных значениях коэффициента несимметрии по нулевой последовательности.

График на рисунке 3.1.3 построен при несимметрии только в одной из фаз (коэффициент несимметрии изменяется от 0 до 0.5).

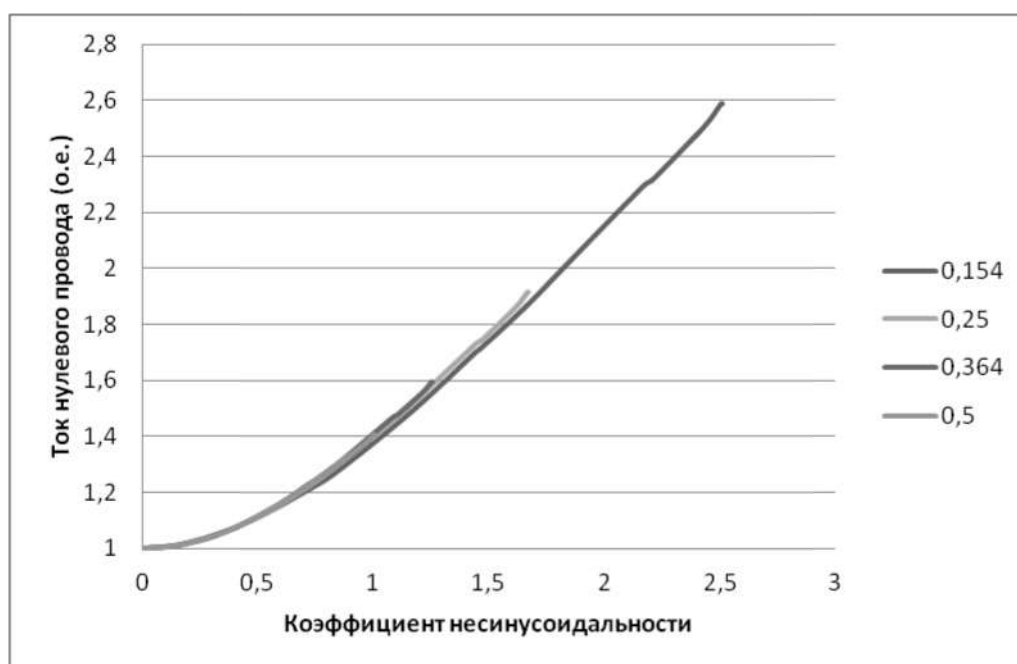


Рисунок 3.1.3 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии одной фазы

График на рисунке 3.1.4 построен при несимметрии в трех фазах (коэффициент несимметрии изменяется от 0 до 1).

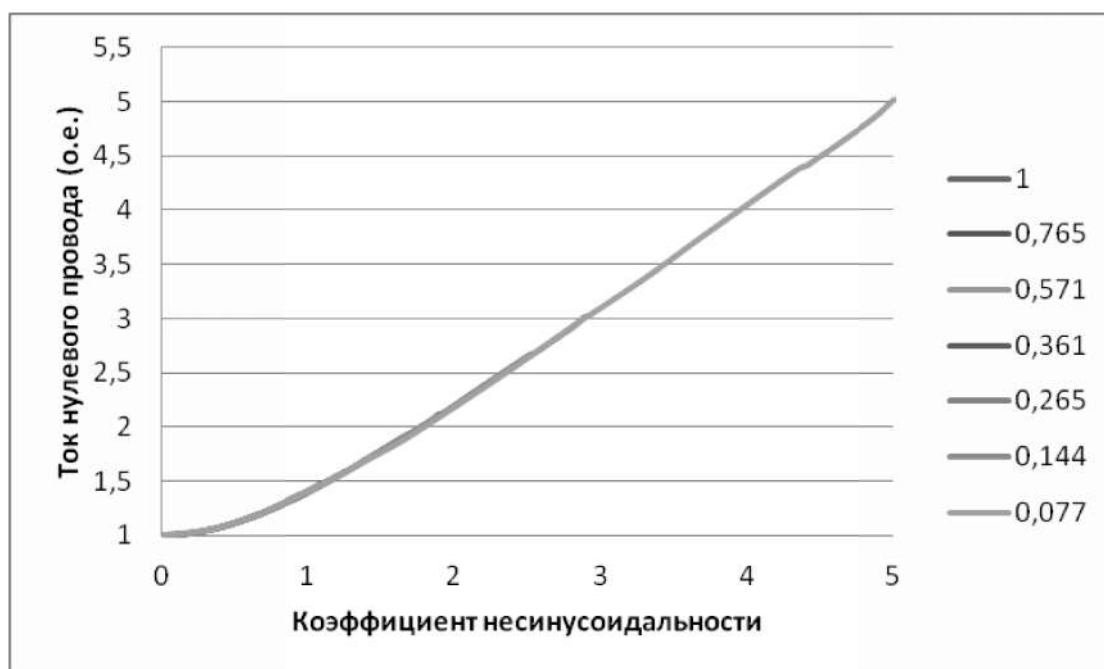


Рисунок 3.1.4 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии трех фаз

Как видно из графиков, величина тока нулевого провода в относительных единицах в функции коэффициента несинусоидальности не зависит от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности.

Также из графиков можно сделать вывод, что чем выше коэффициент несинусоидальности нулевого провода при фиксированном значении несимметрии токов фаз, то тем выше действующее значение тока нулевого провода.

Полученную кривую можно аппроксимировать с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9983$ степенной функцией вида:

$$I_0 = 0,0514 \cdot k_n^2 + 0,5802 \cdot k_n + 0,8553 \quad (3.1.1)$$

Данная зависимость является универсальной, так как коэффициенты, используемые в формуле, являются безразмерными единицами.

Из анализа полученных результатов, можно сделать следующий вывод: зависимость величины тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода нелинейна и не зависит от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз.

3.2 Влияние несимметричной нагрузки на величину тока в нулевом проводе

Раздел посвящен определению степени влияния несимметричной нагрузки на величину тока в нулевом проводе, а именно на определение зависимости величины тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз.

По результатам аналитических исследований выявлено, что при несимметрии нагрузки следует учитывать коэффициент несимметрии только по нулевой последовательности. Этот вывод ранее нигде не был приведен, но является одним из основных, определяющих разрабатываемый метод выбора

технических решений для уменьшения действующего значения тока в нулевом проводе.

При несимметричном режиме работы линейной нагрузки ток в нулевом проводе складывается из токов фаз

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_{(1)A} + \dot{I}_{(1)B} + \dot{I}_{(1)C}.$$

Для примера зависимость величины тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности приведена на рисунке 3.2.1.

Зависимость получена аналитически и построена в относительных единицах, где за базисную величину тока принято его значение при отсутствии несимметрии.

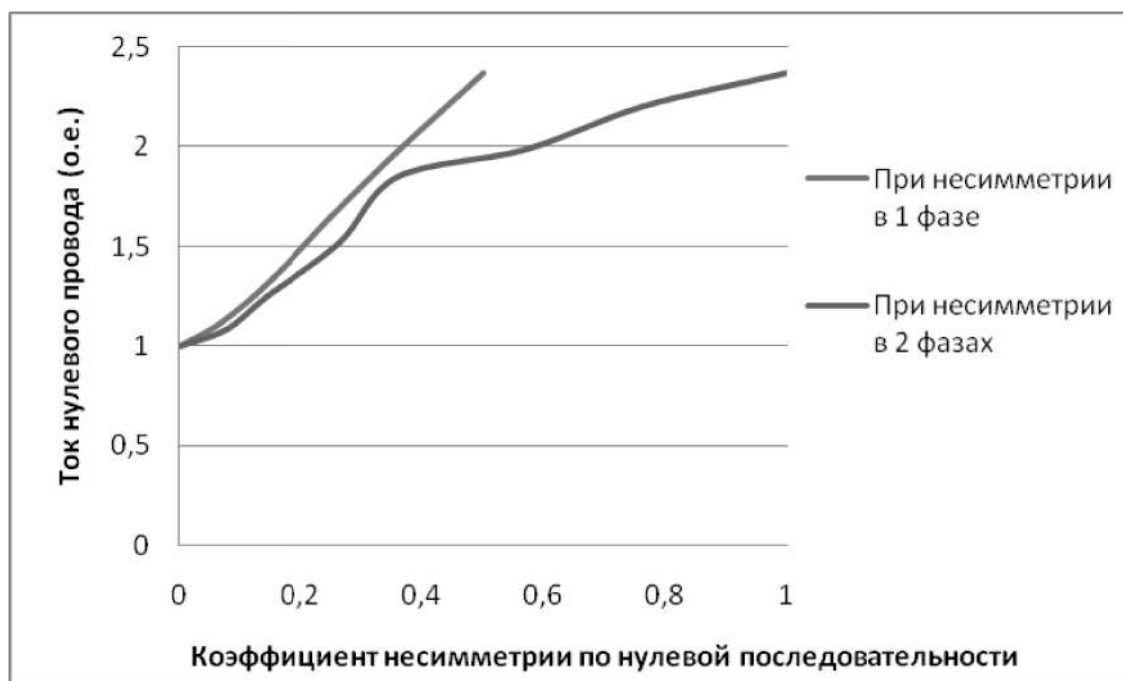


Рисунок 3.2.1 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз

На графике ряд 1 показывает зависимость при несимметрии только в 1 фазе, т.е. токи в двух из трех фаз равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов, ряд 2 – при несимметрии во всех трех фазах, т.е. токи всех трех фаз не равны по величине.

Стоит отметить, что график построен при коэффициенте несинусоидальности тока нулевого провода равном 0%.

Однако при несимметричном режиме работы нелинейной нагрузки ток в нулевом проводе складывается не только из токов фаз основной гармоники, но и из токов гармоник, кратных трем, а также из токов остальных гармоник, которые при симметричном режиме сокращаются.

Для иллюстрации этого факта были построены графики зависимости тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при различных значениях токов третьей гармоники фаз, указанных в таблице 3.3.1.

Графики были построены при условии, что в каждом случае базисная величина тока – это значение тока нулевого провода при отсутствии несимметрии, но с учетом конкретного значения несинусоидальности тока нулевого провода.

График на рисунке 3.2.2 построен при несимметрии только в одной из фаз (коэффициент несимметрии изменяется от 0 до 0.5).

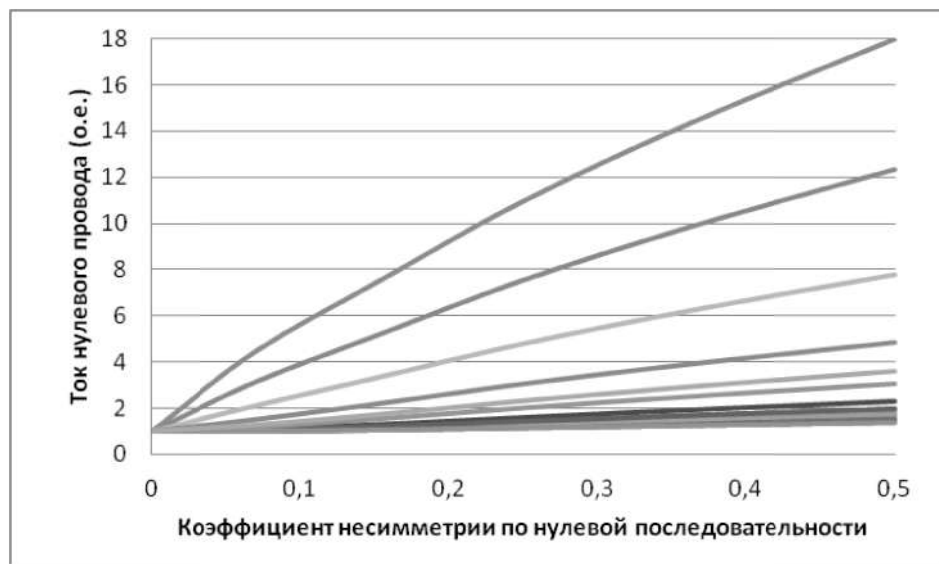


Рисунок 3.2.2 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз при несимметрии в одной фазе

График на рисунке 3.2.3 построен при несимметрии в двух фазах (коэффициент несимметрии изменяется от 0 до 1).

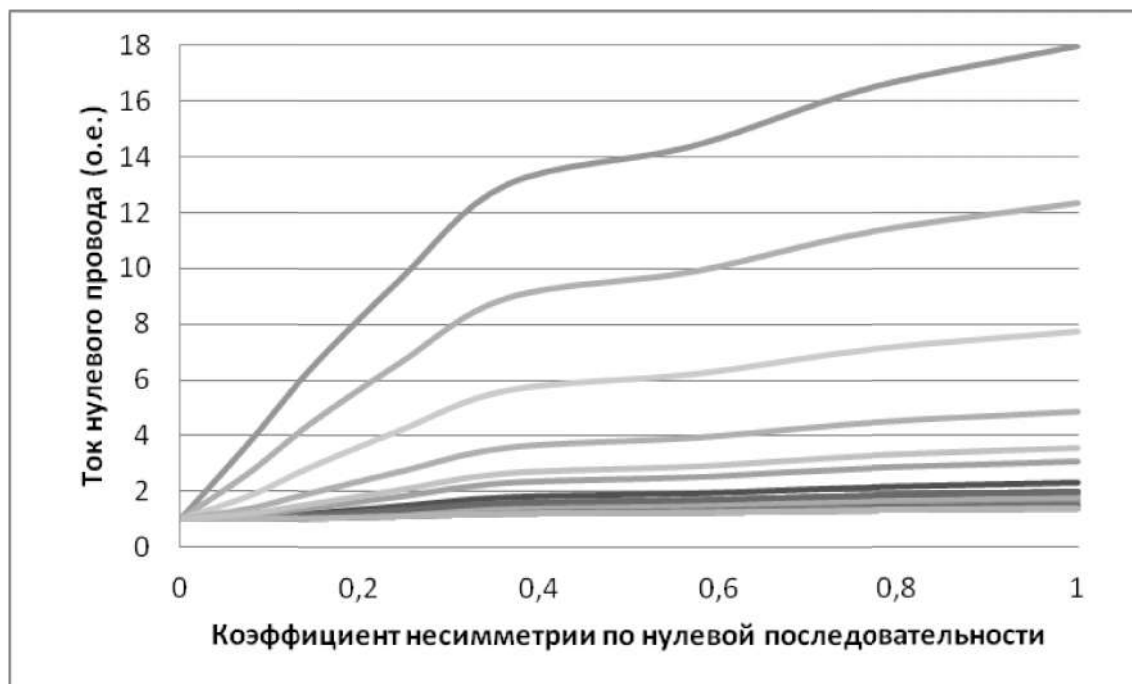


Рисунок 3.2.3 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз при несимметрии в трех фазах

Из анализа графиков можно сделать вывод, что чем выше коэффициент несимметрии по нулевой последовательности, то тем выше действующее значение тока нулевого провода.

Однако максимальных значений в относительных единицах ток нулевого провода достигает при отсутствии или минимальных значениях нелинейной нагрузки.

Таким образом, из результатов исследований, приведенных в разделах 3.1 и 3.2, следует, что при наличии несинусоидальности и несимметрии необходимо учитывать оба этих фактора. Очевидно, что учет этих факторов должен производиться на основе определения их взаимовлияния.

3.3 Взаимовлияние несимметрии токов фаз и несинусоидальности нулевого провода, а также факторы, ограничивающие это взаимовлияние

В этом разделе подвергнуто анализу взаимовлияние несимметрии токов фаз и несинусоидальности тока нулевого провода, а также рассматриваются факторы, ограничивающие их взаимовлияние.

До сих пор не было определено влияние на ток нулевого провода коэффициента несинусоидальности и коэффициента несимметрии в их взаимозависимости.

Для определения указанного влияния была создана математическая модель (приложение 1), с помощью которой определялся ток в нулевом проводе в относительных единицах при изменении коэффициентов. Их изменение было принято в интервале: $k_{0I} = 0 \div 1$, $k_n = 0 \div 5$, т.к. при изменении амплитуды токов фаз коэффициент несимметрии по нулевой последовательности не может превышать 1, а пределы изменения коэффициента несинусоидальности выбраны исходя из статистически вероятных его значений в условиях реальной нагрузки.

Следует подчеркнуть, что поскольку k_n и k_{0I} характеризуют не мощность нагрузки, а лишь её соотношение по несимметрии и наличие высших гармоник, то полученные результаты можно обобщить на любую нагрузку, подключенную к четырехпроводной сети.

Для иллюстрации взаимозависимости вышеописанных коэффициентов было получено семейство графиков зависимости k_n от k_{0I} .

На рисунке 3.3.1 представлено семейство графиков зависимости k_n от k_{0I} при несимметрии в одной фазе, а на рисунке 3.3.2 – в двух фазах.

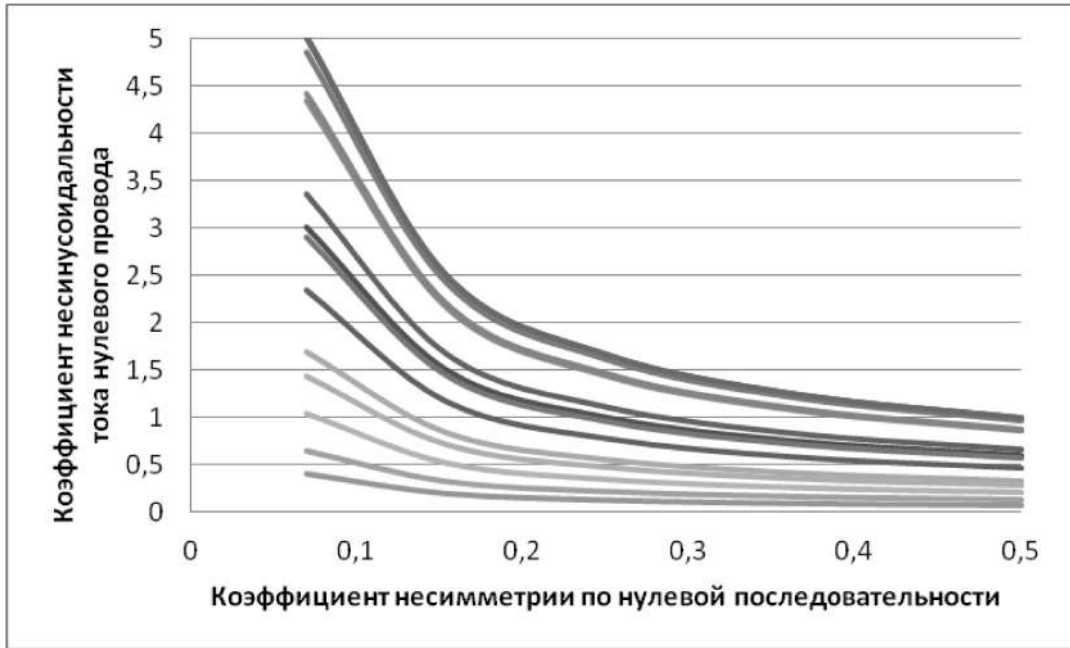


Рисунок 3.3.1 - График зависимости k_n от k_{0I} токов фаз при несимметрии в одной из фаз

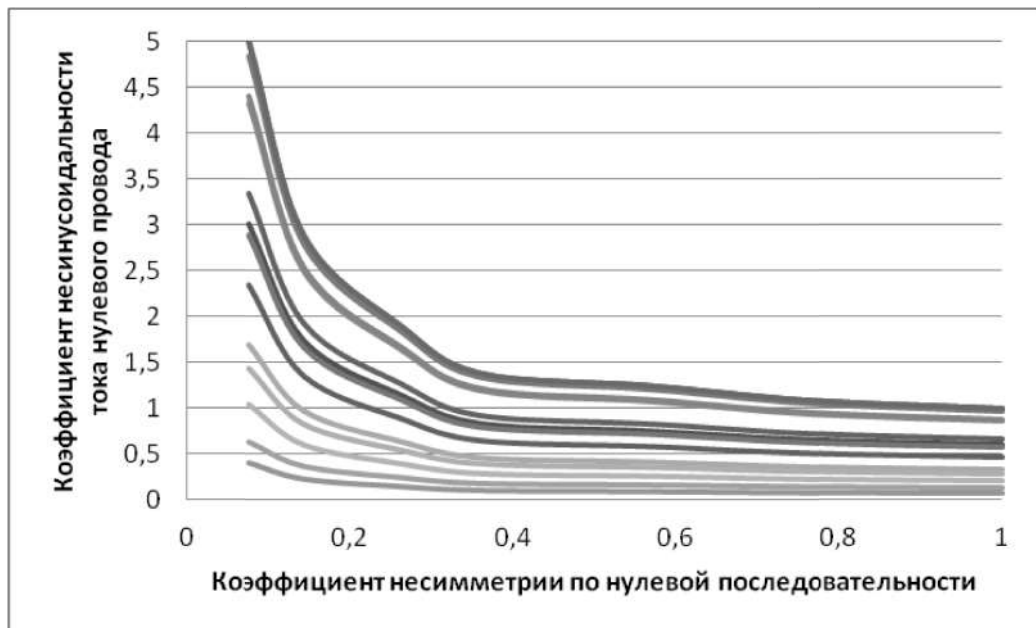


Рисунок 3.3.2 - График зависимости k_n от k_{0I} токов фаз при несимметрии в трех фазах

Семейство графиков получено для множества значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Каждый из графиков построен для конкретных значений несинусоидальности фазных токов (см. таблицу 3.3.1).

Таблица 3.3.1 - Параметры нелинейной нагрузки

Ia(3)	Ib(3)	Ic(3)	A1	B1	A2	B2
50/240	50/240	50/120	0,0302	-0,823	0,0488	-0,624
50/10	50/240	50/120	0,0441	-0,823	0,0712	-0,624
50/20	50/240	50/120	0,0704	-0,823	0,1137	-0,624
50/35	50/240	50/120	0,1142	-0,823	0,1845	-0,624
50/50	50/240	50/120	0,1576	-0,823	0,2545	-0,624
50/240	50/240	50/180	0,1856	-0,823	0,2997	-0,624
10/0	50/240	10/120	0,2573	-0,823	0,4156	-0,624
50/120	50/240	50/120	0,318	-0,823	0,5136	-0,624
50/210	50/240	50/120	0,3185	-0,823	0,5144	-0,624
10/0	50/240	30/120	0,3298	-0,823	0,5327	-0,624
50/150	50/240	50/120	0,3675	-0,823	0,5935	-0,624
10/0	50/240	50/120	0,4025	-0,823	0,6501	-0,624
30/0	50/240	50/120	0,4758	-0,823	0,7684	-0,624
50/60	50/240	50/120	0,4841	-0,823	0,7818	-0,624
50/30	50/240	50/120	0,5321	-0,823	0,8593	-0,624
50/0	50/240	50/120	0,5486	-0,823	0,886	-0,624
50/240	50/240	50/240	0,5499	-0,823	0,8881	-0,624

В таблице 3.3.1 к примеру 50/120 означает $I_{A(3)} = 50 \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ)$.

Зависимости в относительных единицах можно аппроксимировать уравнением вида:

$$K_n = A \cdot (K_{0I})^{-B}, \quad (3.3.1)$$

где А – коэффициент, зависящий от несинусоидальности токов фаз;

В – коэффициент, зависящий от вида несимметрии.

Так как зависимость 3.3.1 получена с использованием безразмерных коэффициентов, то ее можно считать универсальной для нагрузки любых типов и мощностей.

Коэффициенты А и В также представлены в таблице 3.3.1: А1, В1 – для рисунка 3.3.1, А2, В2 – для рисунка 3.3.2.

Выявлено, что чем выше коэффициент несимметрии фазных токов первой гармоники, тем ниже несинусоидальность тока нулевого провода.

Таким образом, установлено, что возможно определить для конкретного объекта степень взаимовлияния несинусоидальности и несимметрии на ток нулевого провода.

Определена закономерность, свидетельствующая о том, что при максимальной несимметрии фазных токов третьей гармоники коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода для каждого из случаев максимален, при минимальной несимметрии минимален.

Все это доказывает то, что на несинусоидальность тока нулевого провода влияет не только несинусоидальность фаз, но и несимметрия несинусоидальных токов в фазах, что является важнейшим фактором при выборе технических устройств компенсации тока нулевого провода.

Выводы по главе 3

Выявлено, что чем выше коэффициент несинусоидальности нулевого провода при фиксированном значении несимметрии токов фаз, то тем выше действующее значение тока нулевого провода.

Полученная зависимость величины тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода нелинейна и не зависит от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз.

По результатам аналитических исследований выявлено, что при несимметрии нагрузки следует учитывать коэффициент несимметрии только по нулевой последовательности, что ранее нигде не учитывалось.

Следует подчеркнуть, что поскольку k_n и k_{ol} характеризуют не мощность нагрузки, а лишь её соотношение по несимметрии и наличие высших гармоник, то полученные результаты можно обобщить на любую нагрузку, подключенную к четырехпроводной сети.

Определена закономерность, свидетельствующая о том, что при максимальной несимметрии фазных токов третьей гармоники коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода для каждого из случаев максимален, при минимальной несимметрии минимален.

Все это доказывает то, что на несинусоидальность тока нулевого провода влияет не только несинусоидальность фаз, но и несимметрия несинусоидальных токов в фазах, что является важнейшим фактором при выборе технических устройств компенсации тока нулевого провода.

Получены универсальные аналитические зависимости тока нулевого провода от его коэффициента несинусоидальности:

$$I_0 = 0,0514 \cdot k_n^2 + 0,5802 \cdot k_n + 0,8553.$$

А также зависимость тока нулевого провода от отношения коэффициент несимметрии тока оп нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода:

$$K_n = A \cdot (K_{0I})^{-B}.$$

Таким образом, установлено, что возможно определить для конкретного объекта степень взаимовлияния несинусоидальности и несимметрии на ток нулевого провода.

ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ ТОКА НУЛЕВОГО ПРОВОДА

4.1 Моделирование режимов работы электротехнического комплекса

Для выявления совместного влияния несимметрии и несинусоидальности электрической нагрузки на ток в нулевом проводе была сформирована модель трехфазной четырехпроводной сети в среде MATLAB (приложение 2), которая показана на рисунке 4.1.1 [111-112].

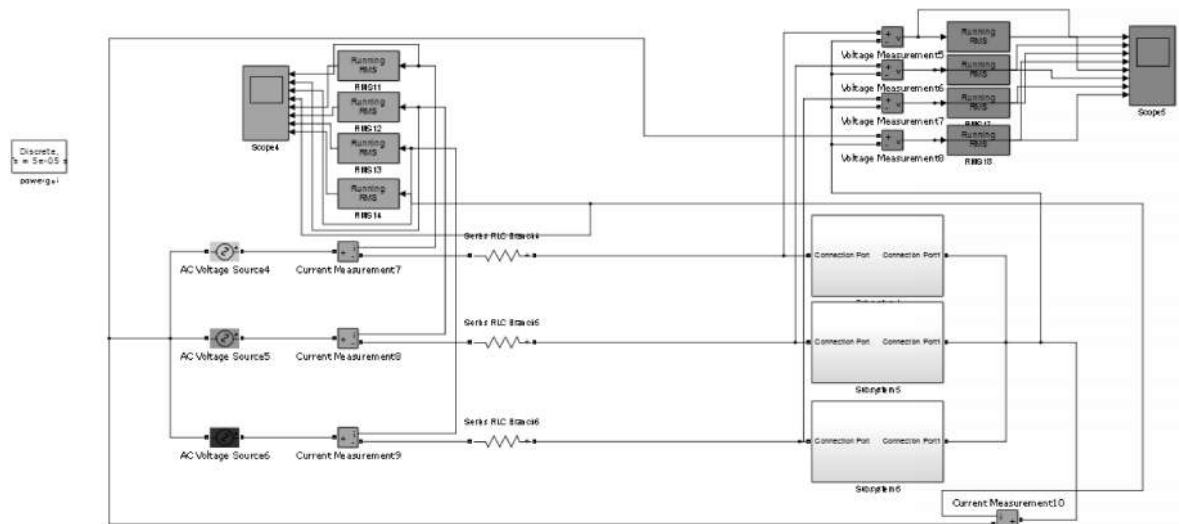


Рисунок 4.1.1 - Модель трехфазной четырехпроводной сети в среде MATLAB

В качестве нагрузки была принята нелинейная и несимметричная нагрузка с значениями коэффициентов несинусоидальности по току ($k_n = 0 \div 5$) и коэффициентов несимметрии по нулевой ($k_{0l} = 0 \div 1$) последовательности, мощность до 100 кВт и напряжением 0,38 кВ.

Методика эксперимента на модели

В ходе эксперимента для получения различных коэффициентов несимметрии изменяются действующие значения токов основной гармоники питающих фаз А, В и С ($I_{\max} = 150 A$). Также для получения различных

сочетаний коэффициентов несимметрии и несинусоидальности изменяются амплитуды и фазы токов 3-ей гармоники питающих фаз А, В и С ($I_{(3)} = 0 \div 50 \text{ A}, \varphi = -120 \div 240^\circ$).

Данные моделирования легли в основу получения зависимостей величины тока в нулевом проводе от коэффициентов несимметрии и несинусоидальности при их совместном влиянии.

4.2 Зависимость величины тока в нулевом проводе от коэффициентов несимметрии и несинусоидальности в их взаимосвязи

В результате моделирования была получена зависимость изменения величины действующего значения тока нулевого провода от k_{01} , представленная на рисунке 4.2.1.

Выбрана зависимость от k_{01} , а не от k_{21} , потому что обратная последовательность не оказывает никакого влияния на ток в нулевом проводе.

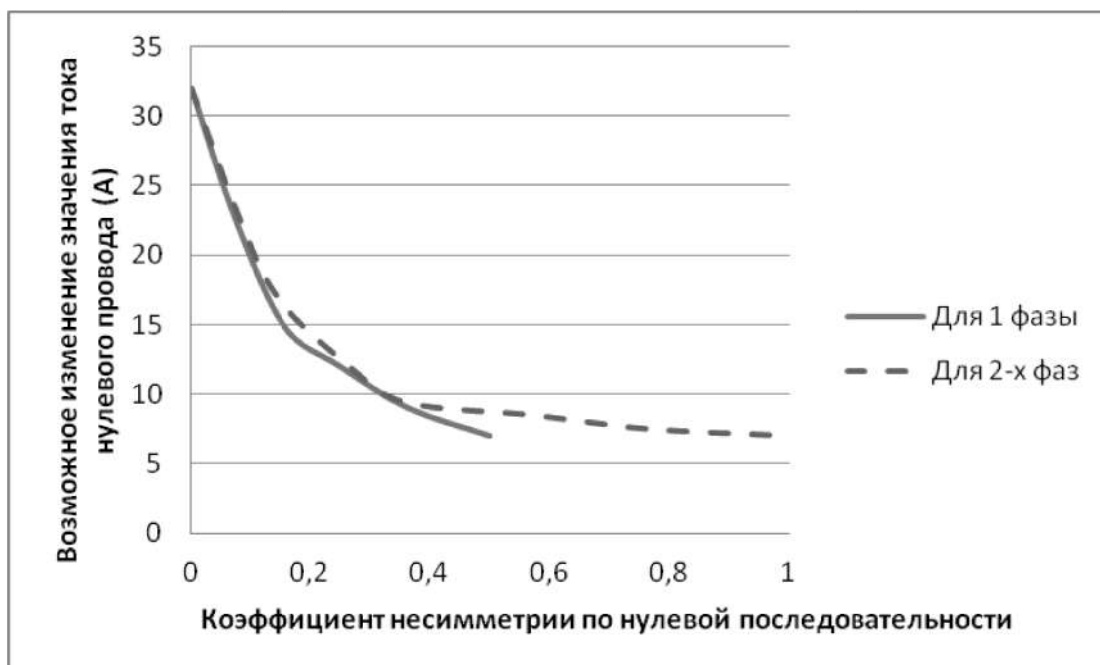


Рисунок 4.2.1 - График зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

Выявлено различное влияние несинусоидальности и несимметрии на I_0 . Показано различное влияние несимметрии при несимметричной нагрузке либо в одной, либо в трех фазах (аналогично в двух фазах), что характеризуется зависимостью, приведенной на рисунке 4.2.1.

Стоит отметить, что максимальный коэффициент несимметрии по нулевой последовательности при несимметрии в одной фазе составляет 0,5, при несимметрии в 3-х фазах – 1.

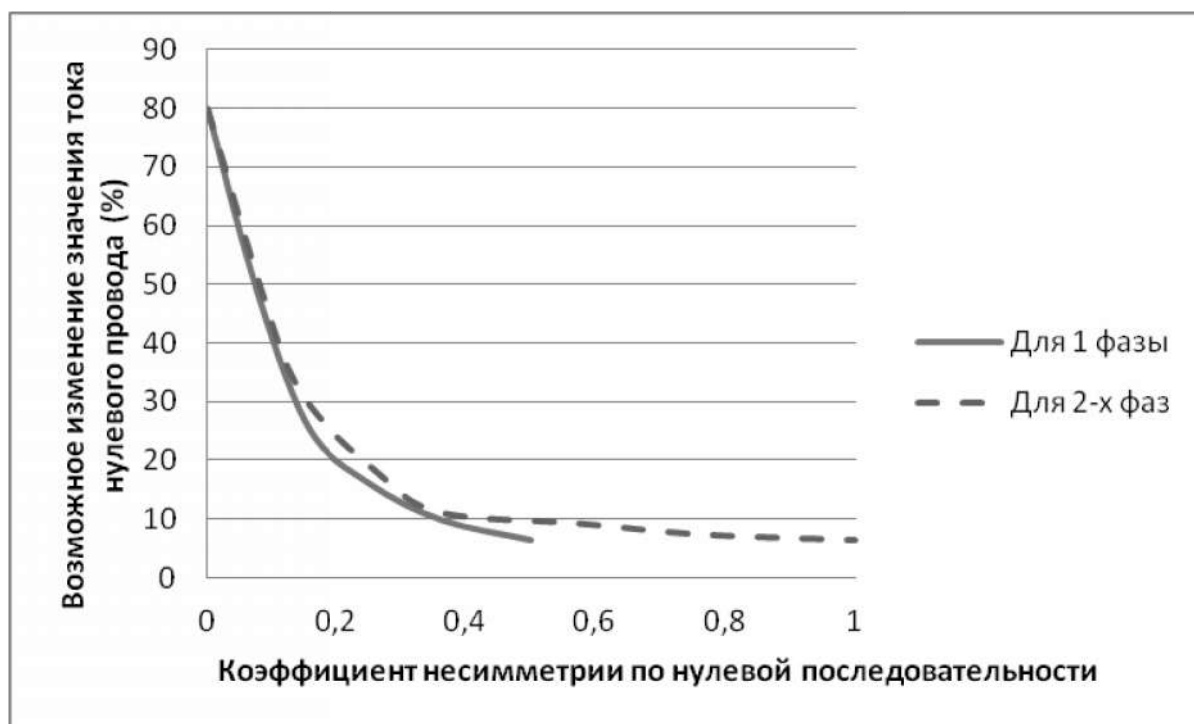


Рисунок 4.2.2 - График зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

На рисунке 4.2.2 показано возможное изменение I_0 в % относительно величины I_0 при конкретном значении коэффициентов несимметрии и несинусоидальности (пределы показаны выше).

При значениях k_{0l} от 0 до 0,5 изменение действующего значения тока нулевого провода составляло от 32 до 7 А (от 80 до 6%).

При значении k_{0l} равным 0 изменение действующего значения тока в нулевом проводе максимально и составляет 32 А.

На рисунках 4.2.3 – при несимметрии в одной фазе, 4.2.4 – при несимметрии в трех фазах - представлено семейство характеристик зависимости возможного изменения I_0 от k_{0l} при различных значениях несинусоидальности, приведенных в таблице выше.

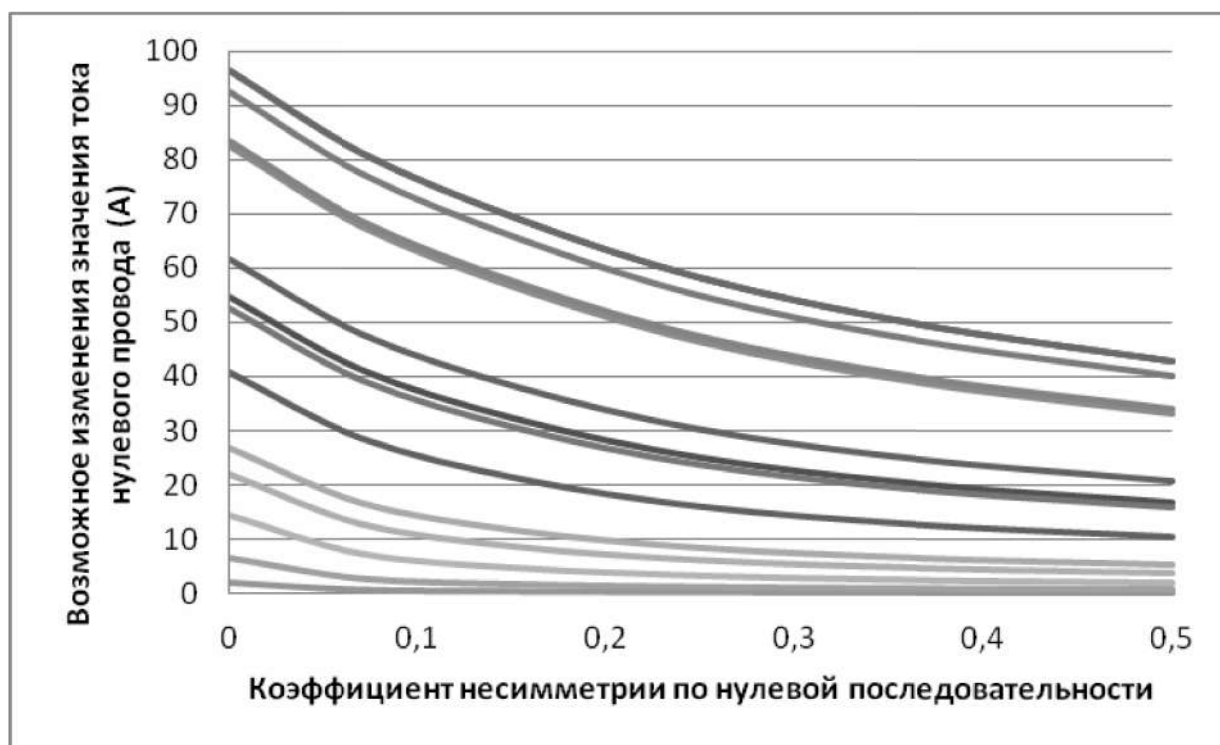


Рисунок 4.2.3 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при несимметрии в одной фазе

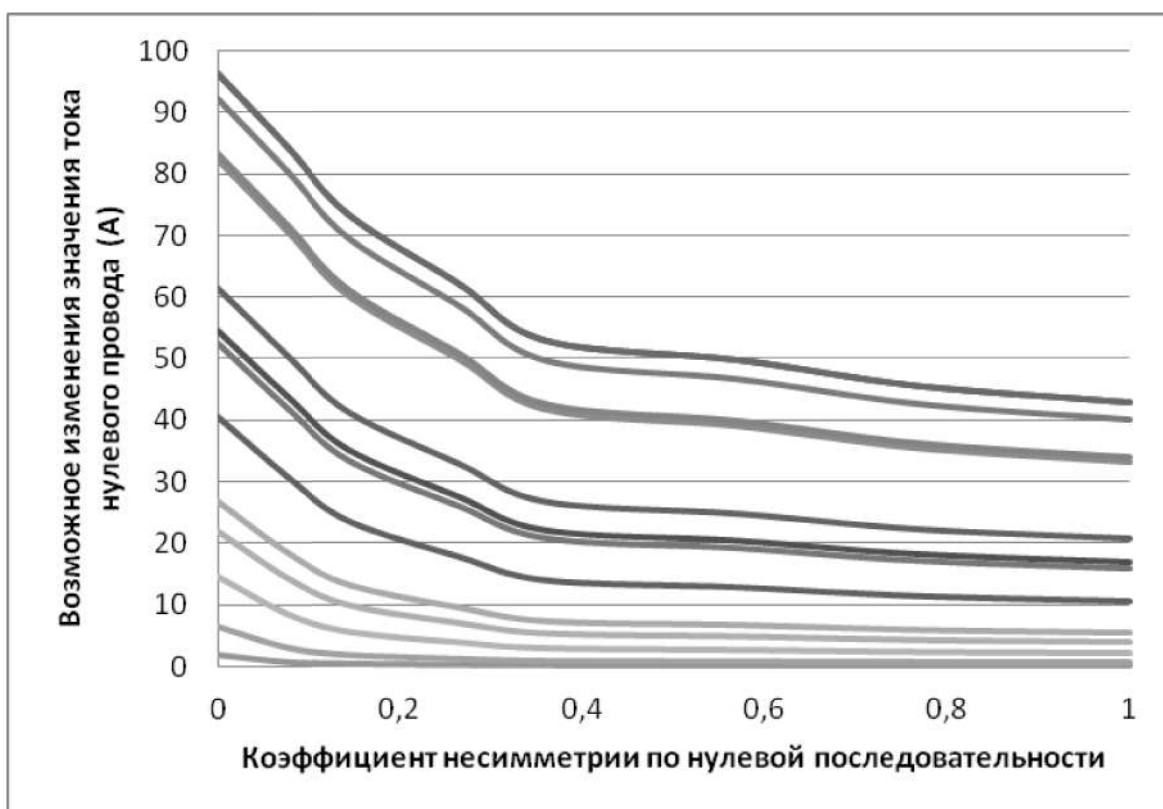


Рисунок 4.2.4 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при несимметрии в трех фазах

На рисунках 4.2.5 и 4.2.6 приведены аналогичные зависимости в % относительно величины I_0 при конкретном значении коэффициентов несимметрии и несинусоидальности (пределы показаны выше).

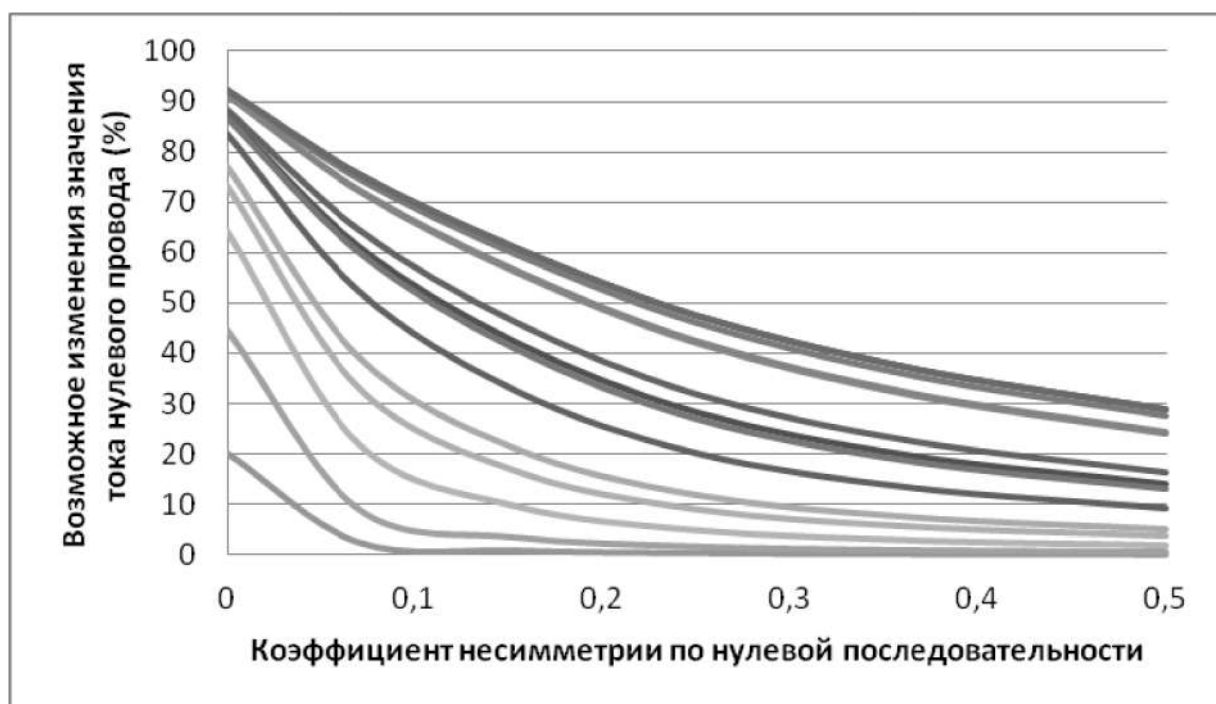


Рисунок 4.2.5 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при несимметрии в одной фазе

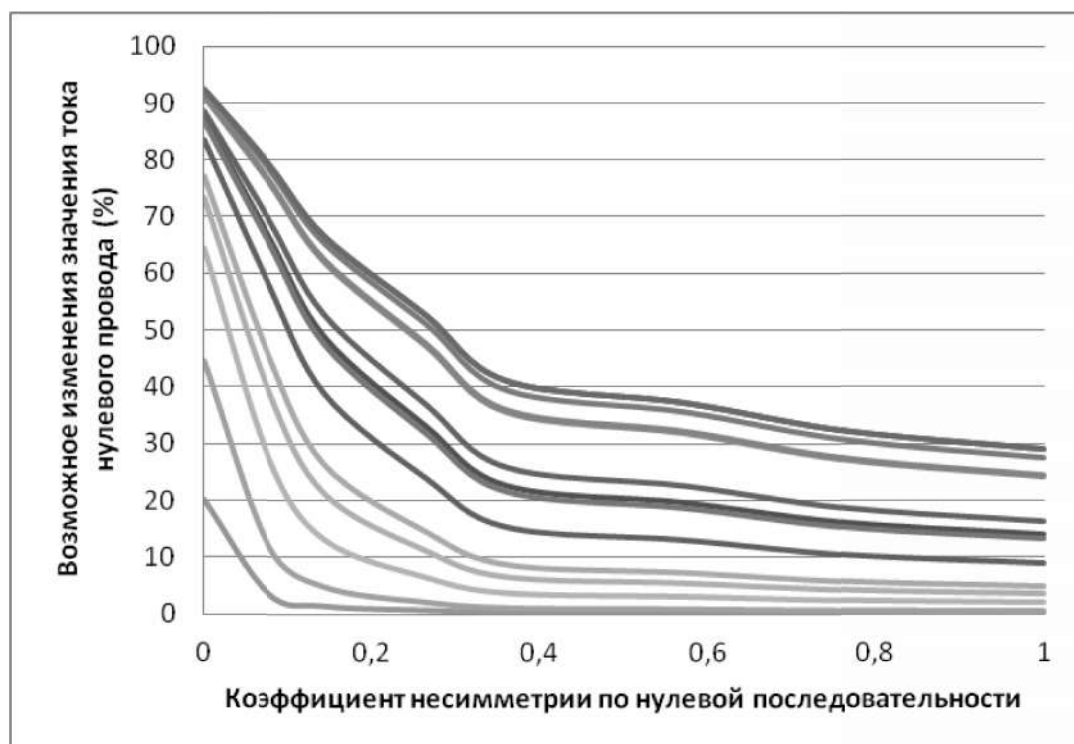


Рисунок 4.2.6 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при несимметрии в одной фазе

Максимальный эффект (от 55 до 93% начального значения тока нулевого провода) от уменьшения тока 3-ей гармоники достигается при отсутствии несимметрии тока в фазах ($k_{0I}=0$). Минимальный эффект (от 1 до 29%) достигается при максимальном значении k_{0I} (0.5 для 1 фазы, 1 для 2-х фаз).

Из полученных результатов можно сделать вывод, что чем выше несимметрия в токе питающих фаз, тем ниже эффект от уменьшения токов 3-ей гармоники.

Зависимости 4.2.5 и 4.2.6 в относительных единицах можно аппроксимировать зависимостями вида: $\Delta I = A \cdot K_{0I}^3 + B \cdot K_{0I}^2 + C \cdot K_{0I} + D$,

(2)

где A, B, C, D – коэффициенты, зависящие от несинусоидальности токов фаз.

По результатам компьютерного моделирования были построены графики зависимости изменения величины действующего значения I_0 от соотношения k_{0I} к k_n , что количественно определяет совместное влияние k_n и k_{0I} на I_0 (рисунок 4.2.7 – для 1 фазы, 4.2.8 – для трех фаз).

На рисунках 4.2.9 и 4.2.10 приведены аналогичные зависимости в % относительно величины I_0 при конкретном значении коэффициентов несимметрии и несинусоидальности (пределы показаны выше).

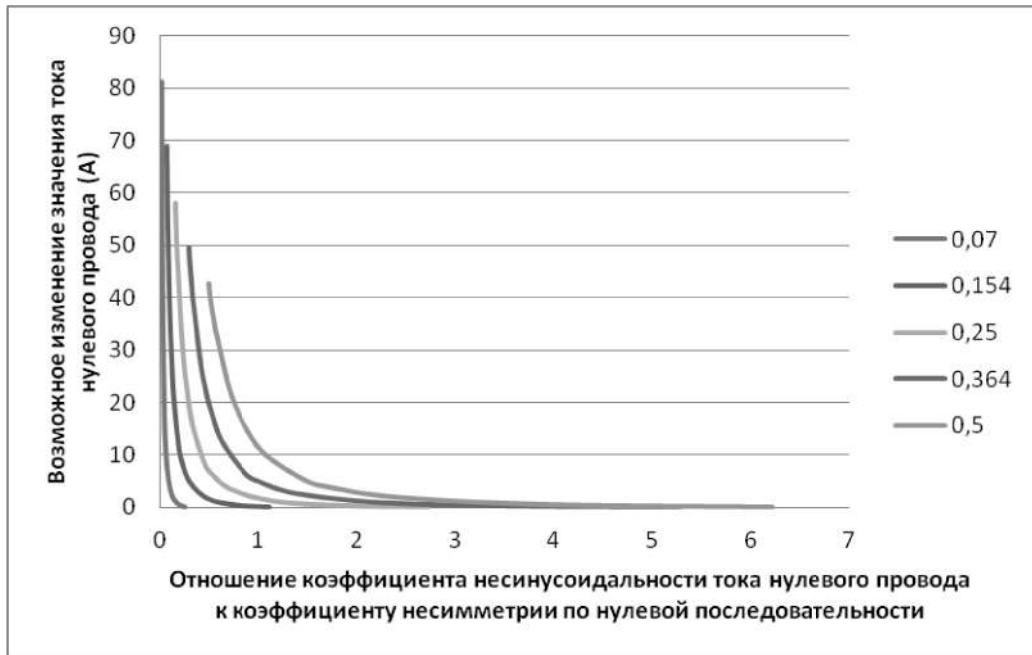


Рисунок 4.2.7 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от отношения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии в одной фазе

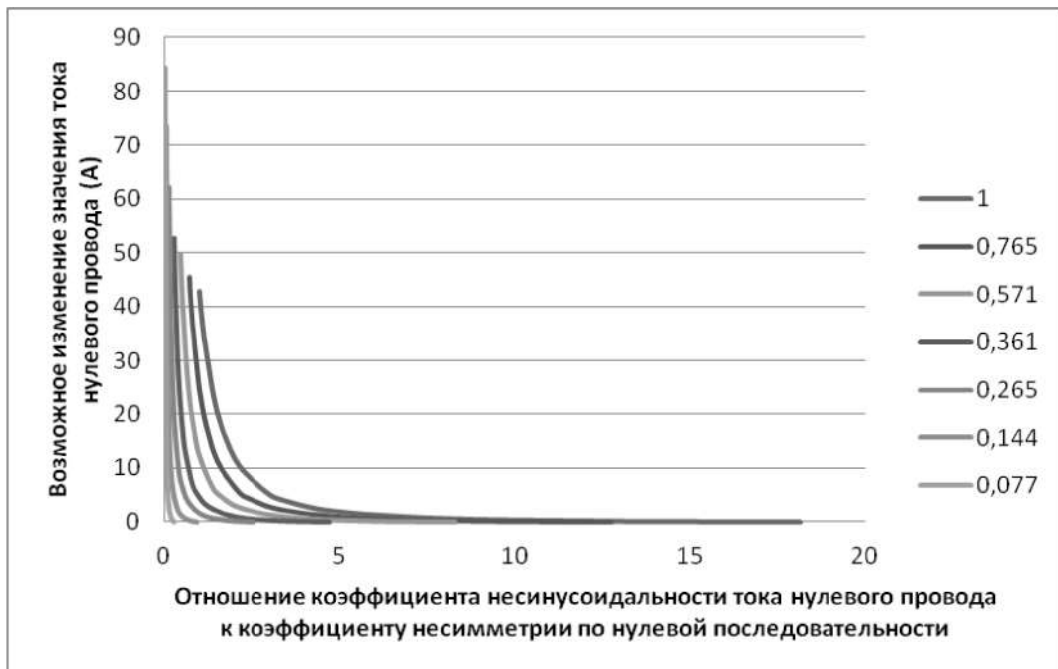


Рисунок 4.2.8 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от отношения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии в трех фазах

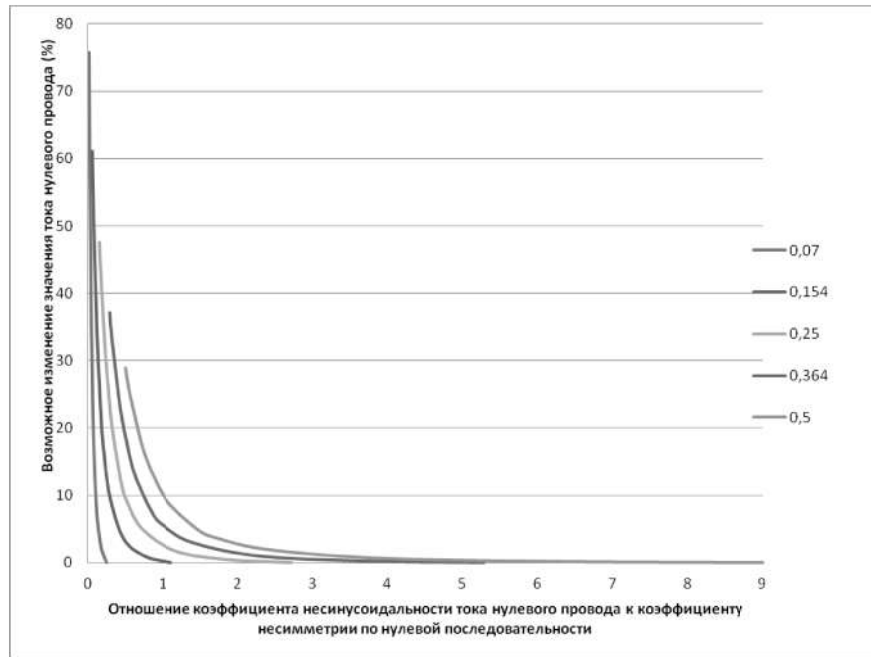


Рисунок 4.2.9 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от отношения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии в одной фазе

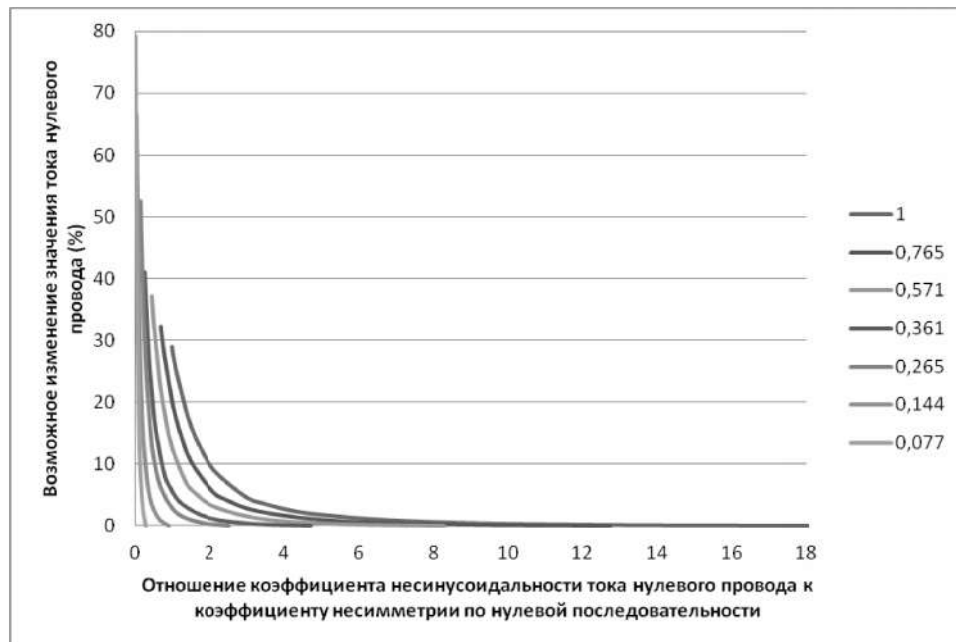


Рисунок 4.2.10 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от отношения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода при несимметрии в трех фазах

Как видно из рисунков 4.2.7-4.2.10, чем меньше соотношение коэффициента несимметрии к коэффициенту несинусоидальности, тем выше эффект от уменьшения тока 3-ей гармоники. Причем максимальное изменение тока (79%) может быть достигнуто при минимальном значении коэффициента несимметрии (0,07 для 1-й фазы, 0,077 для 2-х фаз) и при минимальном значении соотношения коэффициентов несинусоидальности и несимметрии (0.014 для 1 фазы, 0.015 для 2-х фаз)

Полученные зависимости подтверждают и дополняют выводы, полученные ранее, о том, что изменение величины действующего значения тока нулевого провода тем выше, чем ниже коэффициент несимметрии по нулевой последовательности и чем выше коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода.

Кривые, указанные на рисунках 4.2.9-4.2.10, были аппроксимированы зависимостью вида:

$$\Delta I = A \cdot \left(\frac{K_n}{K_{0I}} \right)^{-B}, \quad (4.2.1)$$

где А, В – коэффициенты, зависящие от несинусоидальности токов фаз.

Зависимость (4.2.1) является универсальной, т.к. в ней используются только безразмерные величины. Её следует использовать при оценке текущего значения тока нулевого провода и при его прогнозировании в случае проектирования системы электроснабжения.

Вышеприведенные зависимости позволяют определить лишь техническую эффективность применения компенсации высших гармоник и несимметрии.

Экономическая эффективность должна учитывать и возможность увеличения сечения нулевого провода, что по сути подразумевает замену всего кабеля.

4.3 Оценка экономической эффективности выбора устройств компенсации тока нулевого провода

Для определения экономической эффективности была сформирована функция затрат вида:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0, \quad (4.3.1)$$

где Z_1 - затраты на устройства компенсации высших гармоник;

Z_2 - затраты на устройства компенсации несимметрии;

Z_0 - затраты на замену нулевого кабеля.

В свою очередь в выражении (4.3.1):

$$Z_1 = C_1 + Tr + Об, \quad (4.3.2)$$

где C_1 - стоимость устройств компенсации высших гармоник у поставщика;

Tr - оплата труда работников при установке и обслуживании оборудования;

$Об$ - затраты на обучение сотрудников, которые будут эксплуатировать новое оборудование.

$$Z_2 = C_2 + Tr + Об, \quad (4.3.3)$$

где C_2 - стоимость устройств компенсации несимметрии у поставщика.

$$Z_0 = C_0 + Tr_0, \quad (4.4.4)$$

где C_0 - стоимость пятипроводного или одножильного кабеля необходимого сечения;

Tr_0 - оплата труда работников при демонтаже старого и прокладке нового кабеля.

В результате для получения наиболее эффективного подхода к оптимизации величины I_0 возможно три пути действия:

1. При технической неэффективности компенсации несимметрии необходимо сравнить I_1 и I_0
2. При технической неэффективности компенсации несинусоидальности необходимо сравнить I_2 и I_0
3. В том случае, если одного из указанных методов недостаточно для необходимого снижения тока нулевого провода сравнению подлежат $I_1 + I_2$ и I_0

Для иллюстрации возможных способов, применяемых в целях оптимизации величины тока нулевого провода была разработана обобщенная схема трехфазной четырехпроводной электрической сети, представленная на рисунке 4.3.1.

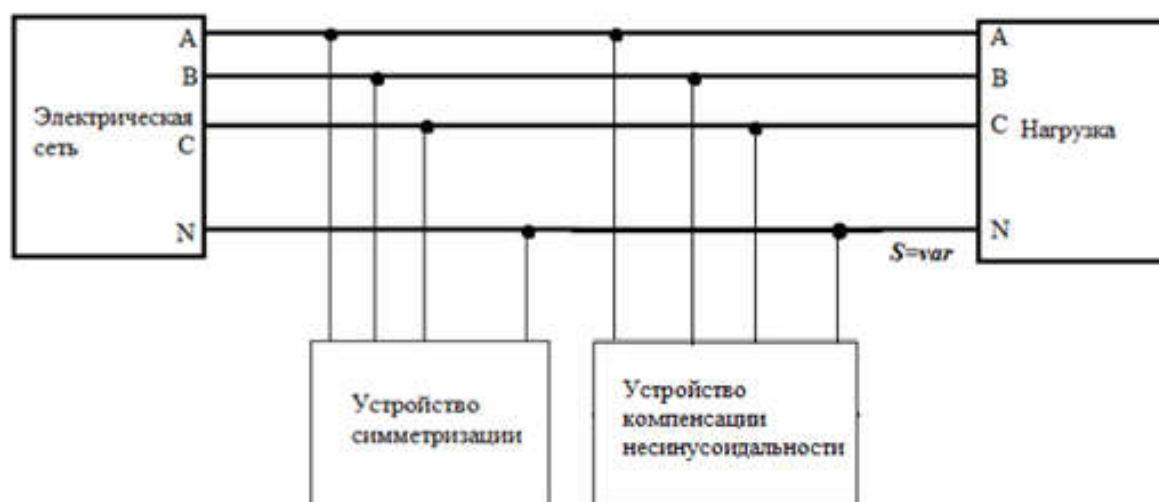


Рисунок 4.3.1 - Обобщенная схема трехфазной электрической сети

Для оптимизации величины тока нулевого провода возможно применение следующих методов:

1. Компенсация несимметрии

Если несимметрия токов в системе вызвана питанием однофазной нагрузкой линейным напряжением, то стоит использовать схему Штайнмеца (рисунок 4.3.2)

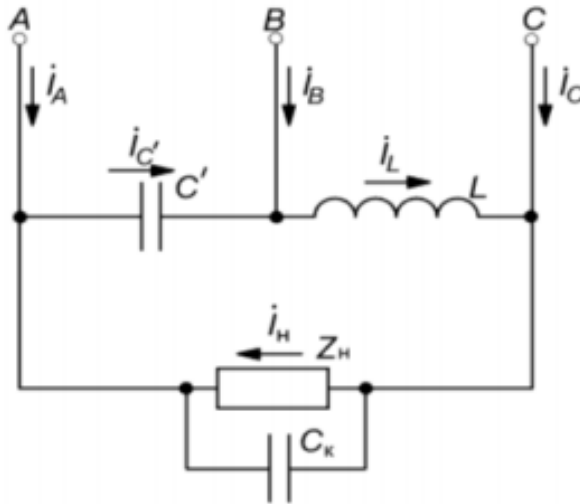


Рисунок 4.3.2 - Схема Штайнмеца

В том случае, если несимметрия токов вызвана трехфазной несимметричной нагрузкой, то симметрирования токов можно достичь путем использования устройств повышения качества электроэнергии на основе полностью управляемых ключей [113].

Принцип работы компенсатора мощности несимметрии заключается в формировании токов обратной и нулевой последовательностей в согласующих дросселях устройства, которые генерируются в противофазе токам обратной и нулевой последовательностей сети (рисунок 4.3.3).

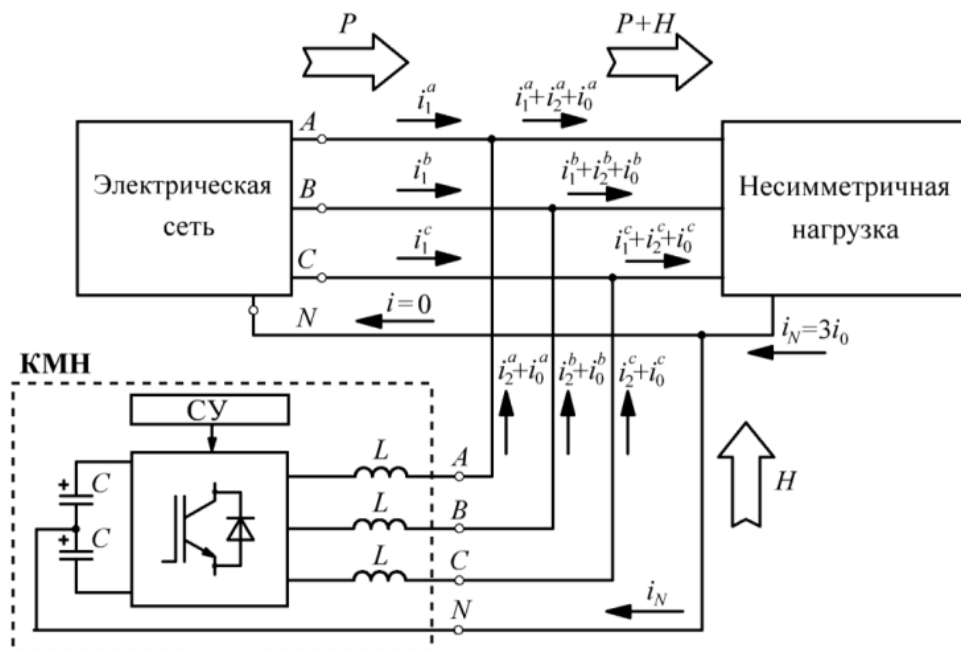


Рисунок 4.3.3 - Принцип работы компенсатора мощности несимметрии

2. Компенсация несинусоидальности

Для компенсации несинусоидальности тока нулевого провода следует применять пассивный фильтр токов гармоник, кратных трем, который устанавливается в нулевой провод (рисунок 4.3.4).

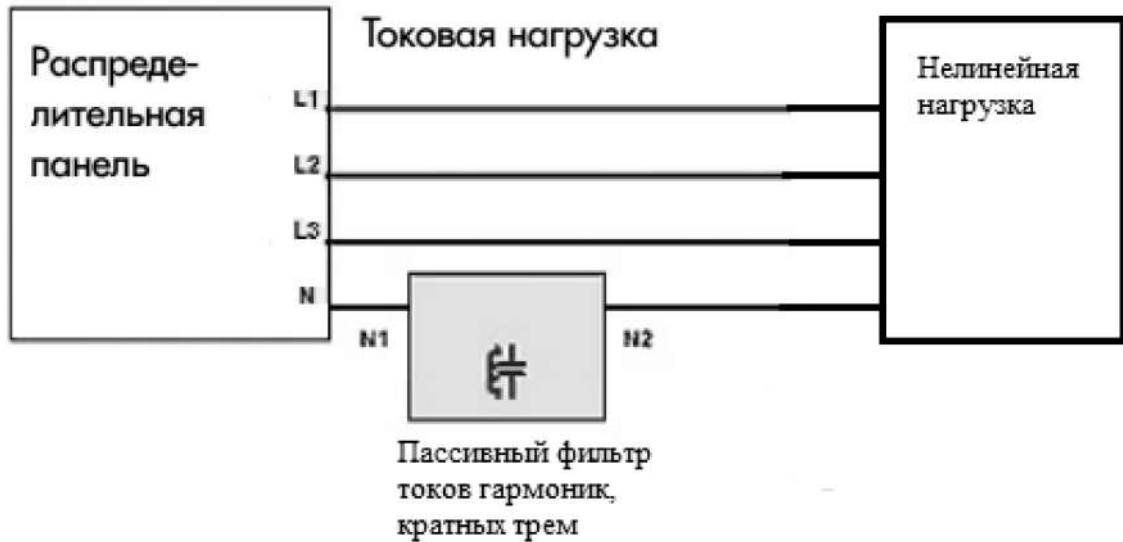


Рисунок 4.3.4 - Расположения фильтра в трехфазной четырехпроводной системе

3. Совместная компенсация несимметрии и несинусоидальности

В случае совместной компенсации обоих факторов допускается применять комбинации устройств по компенсации каждого из факторов либо применять устройства совместной компенсации обоих факторов, такие как параллельный активный фильтр (рисунок 4.3.5)

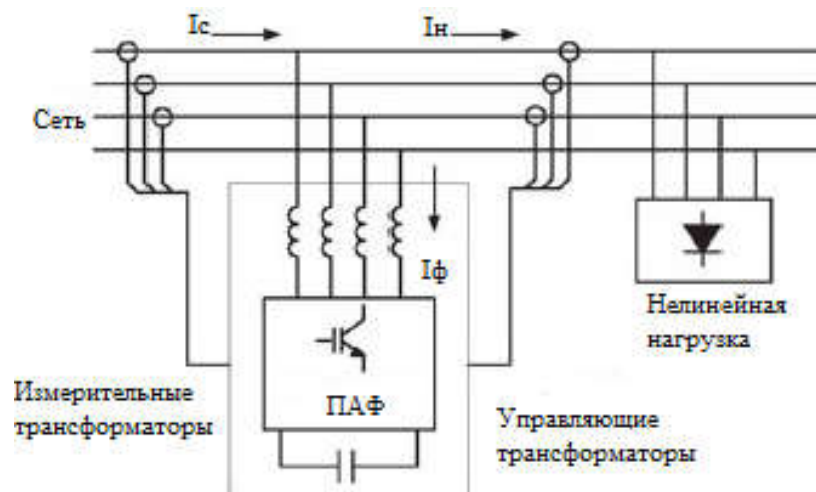


Рисунок 4.3.5 - Схема подключения параллельного активного фильтра

4. Увеличение сечения нулевого провода

Подразумевает под собой замену всего питающего кабеля. Наиболее трудоемкий вариант.

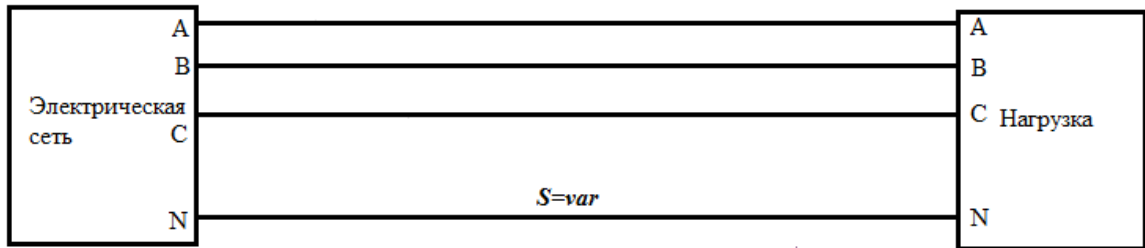


Рисунок 4.3.5 - Схема с варьируемым сечением нулевого провода

На основании вышеприведенного исследования был создан метод выбора эффективного способа уменьшения тока в нулевом проводе и разработан алгоритм, представленный на рисунке 4.3.7.

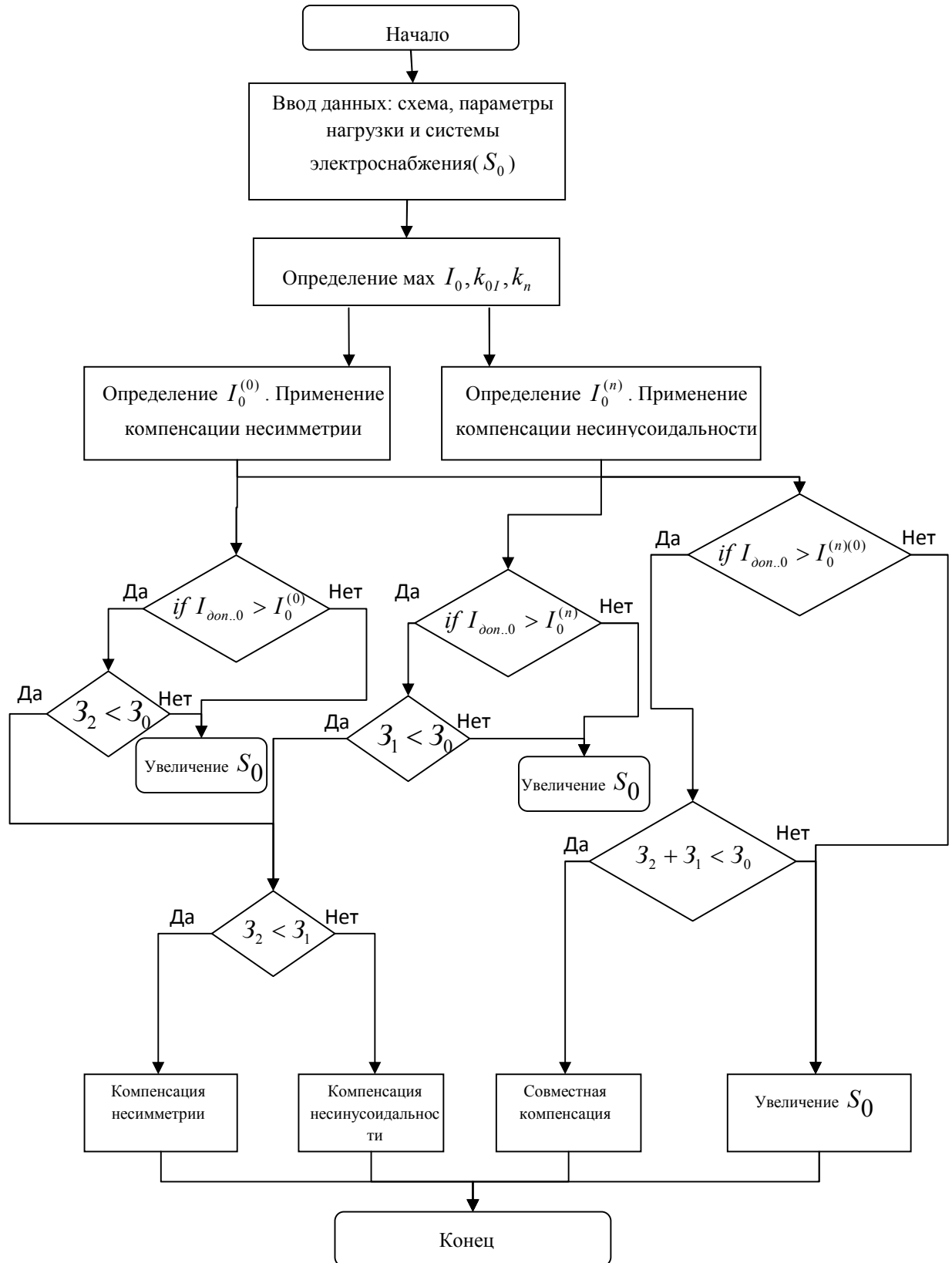


Рисунок 4.3.7 - Алгоритм выбора средств компенсации тока нулевого провода

Алгоритм включает в себя последовательность шагов, согласно указанным блокам:

1. Под «блоком ввода данных» подразумевается ввод схемы электроснабжения предприятия, включающей только его низковольтную часть, с параметрами схемы электроснабжения и параметрами нагрузки, под которыми понимается их установленная мощность в кВт и квар. Под параметрами системы электроснабжения подразумеваются длины и сечения кабельных линий, включая сечение нулевого провода.
2. В блоке «определение $\max I_0, k_{0I}, k_n$ » производится выбор максимально возможных величин тока нулевого провода (I_0), коэффициента несимметрии по нулевой последовательности (k_{0I}) и коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода (k_n). Для действующих предприятий указанные величины определяются по экспериментальным данным, отвечающим правилам определения максимальных величин (как правило для этого достаточно одних суток). Для проектируемых предприятий эти величины определяются на основе моделирования и анализа режимов совместной работы электрооборудования.
3. Блок «Определение $I_0^{(n)}$. Применение компенсации несинусоидальности». В этом блоке при фиксированном значении k_{0I} определяется необходимое для достижения допустимой величины тока нулевого провода ($I_{дон.0}$) значение k_n для заданного значения сечения S_0 . Величины коэффициентов А и В определяются на основе экспериментальных данных или результатов моделирования по двум точкам для различных значений k_n , используя кривые 4.2.9 и 4.2.10.

4. Блок сравнения «*if* $I_{\text{don..0}} > I_0^{(n)}$ ». Если невозможно достичь заданного значения ΔI , т.е. $I_{\text{don..0}} < I_0^{(n)}$, то признается неэффективность применение компенсации высших гармоник. Если компенсацией высших гармоник возможно достижение ΔI , то выбирается соответствующий компенсатор третьей (и при необходимости кратных трем) гармоники с определением затрат на него (Z_1).
5. Блок «Определение $I_0^{(0)}$. Определение компенсации несимметрии». В этом блоке при фиксированном значении k_n по выражению
$$\Delta I = A \cdot \left(\frac{K_n}{K_{0I}}\right)^{-B}$$
, аналогично действию в блоке 3, определяется необходимое для достижения $I_{\text{don..0}}$ для заданного S_0 значение k_{0I} . Учитывая взаимосвязь между k_{0I} и k_n , определенную выражением $K_n = A \cdot (K_{0I})^{-B}$, значение k_{0I} просчитывается и итерационным методом определяется его значение с заданной погрешностью.
6. Блок сравнения «*if* $I_{\text{don..0}} > I_0^{(0)}$ ». Если невозможно достичь заданного значения ΔI , т.е. $I_{\text{don..0}} < I_0^{(0)}$, то применение компенсации несимметрии следует признать неэффективным. Если указанной компенсацией можно достичь заданного значения ΔI , то выбирается соответствующий компенсатор несимметрии с определением затрат на его применение (Z_2).
7. В блоках « $Z_2 < Z_0$ » и « $Z_1 < Z_0$ » производится сравнение затрат на выбранные способы компенсации с затратами на замену кабеля с сечением нулевого провода, обеспечивающим бесперебойность работы оборудования. Если $Z_2 > Z_0$ и $Z_1 > Z_0$, то однозначно выбирается вариант с заменой кабеля. Если $Z_2 < Z_0$ и $Z_1 < Z_0$, то в следующем блоке выбирается вариант с наименьшими затратами.

8. В блоках « $if I_{\text{дон}..0} > I_0^{(n)(0)}$ » и « $3_2 + 3_1 < 3_0$ » производится сравнение совместного применения компенсации несимметрии и несинусоидальности с заменой кабеля. В этих блоках производятся операции, аналогичные операциям, указанным в пунктах 3-6.

4.4 Практическое применение алгоритма выбора эффективного способа уменьшения тока нулевого провода

Вышеприведенный алгоритм можно проиллюстрировать на примере его внедрения в СЗГМУ им. Мечникова.

Кривые фазных токов представлены на рисунке 4.4.1.

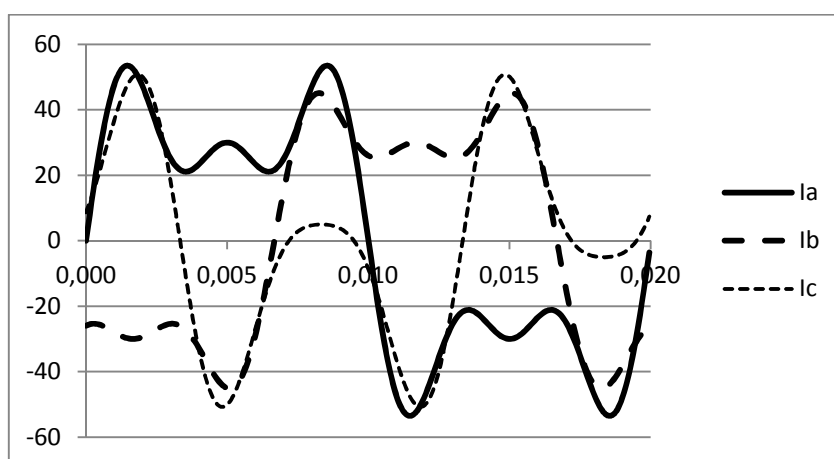


Рисунок 4.4.1 - Осциллограмма фазных токов

Кривая тока нулевого провода представлена на рисунке 4.4.2.

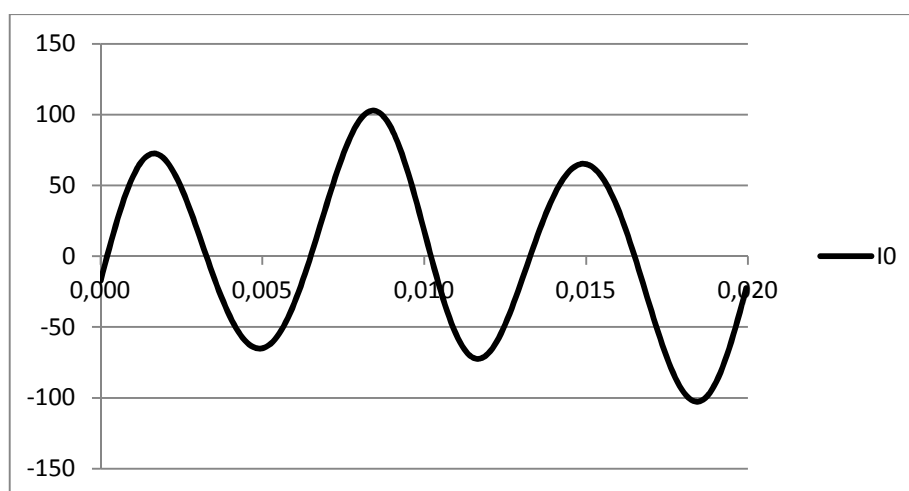


Рисунок 4.4.2 - Осциллограмма тока нулевого провода

Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности – 0.2.

Коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода – 4.08.

Действующие значения токов фаз: А – 35 А, В – 33 А, С – 30 А.
Нулевого провода – 58 А.

Сечение фазных и нулевого провода сети – 6 мм².

Необходимое сечение нулевого провода в данном режиме работы – 10 мм².

Проверим, эффективна ли технически компенсация несимметрии.

Для этого построим график зависимости минимально возможного тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при отсутствии несинусоидальности (рисунок 4.4.3).

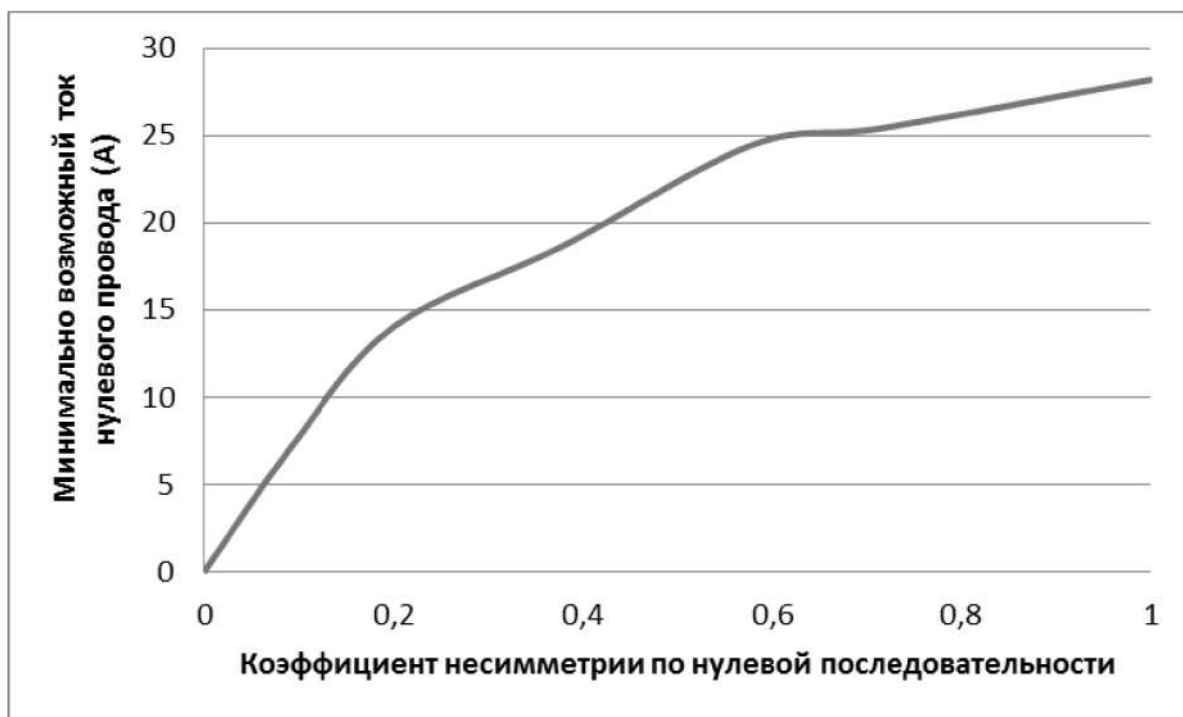


Рисунок 4.4.3 - График зависимости минимально возможного тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

Таблица 4.4.1 - Таблица выбора сечения кабеля в зависимости от параметров нагрузки

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Медные жилы, проводов и кабелей			
	Напряжение, 220 В		Напряжение, 380 В	
	ток, А	мощность, кВт	ток, А	мощность, кВт
1,5	19	4,1	16	10,5
2,5	27	5,9	25	16,5
4	38	8,3	30	19,8
6	46	10,1	40	26,4
10	70	15,4	50	33,0
16	85	18,7	75	49,5
25	115	25,3	90	59,4
35	135	29,7	115	75,9
50	175	38,5	145	95,7
70	215	47,3	180	118,8
95	260	57,2	220	145,2
120	300	66,0	260	171,6

Затем, опираясь на нормативную таблицу нагрузки для различных сечений нулевого провода (таблица 4.4.1), необходимо построить график зависимость минимально возможного сечения нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при отсутствии несинусоидальности.

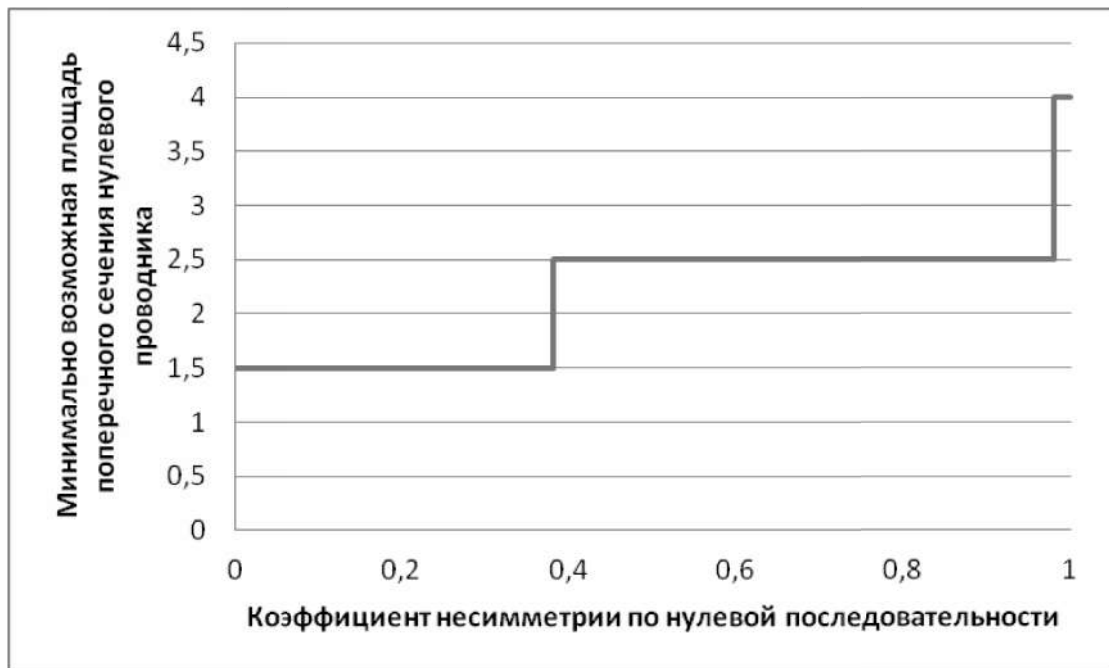


Рисунок 4.4.4 - График зависимости минимально возможного сечения нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

Компенсация несимметрии неэффективна, т.к. площадь поперечного сечения существующего нулевого проводника превышает максимальные значения сечения, полученные на рисунке 4.4.4.

Проверим, эффективна ли технически компенсация высших гармоник. Для этого необходимо построить график зависимости минимально возможного тока нулевого провода от отношения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода при коэффициенте несимметрии по нулевой последовательности равным 0.2.

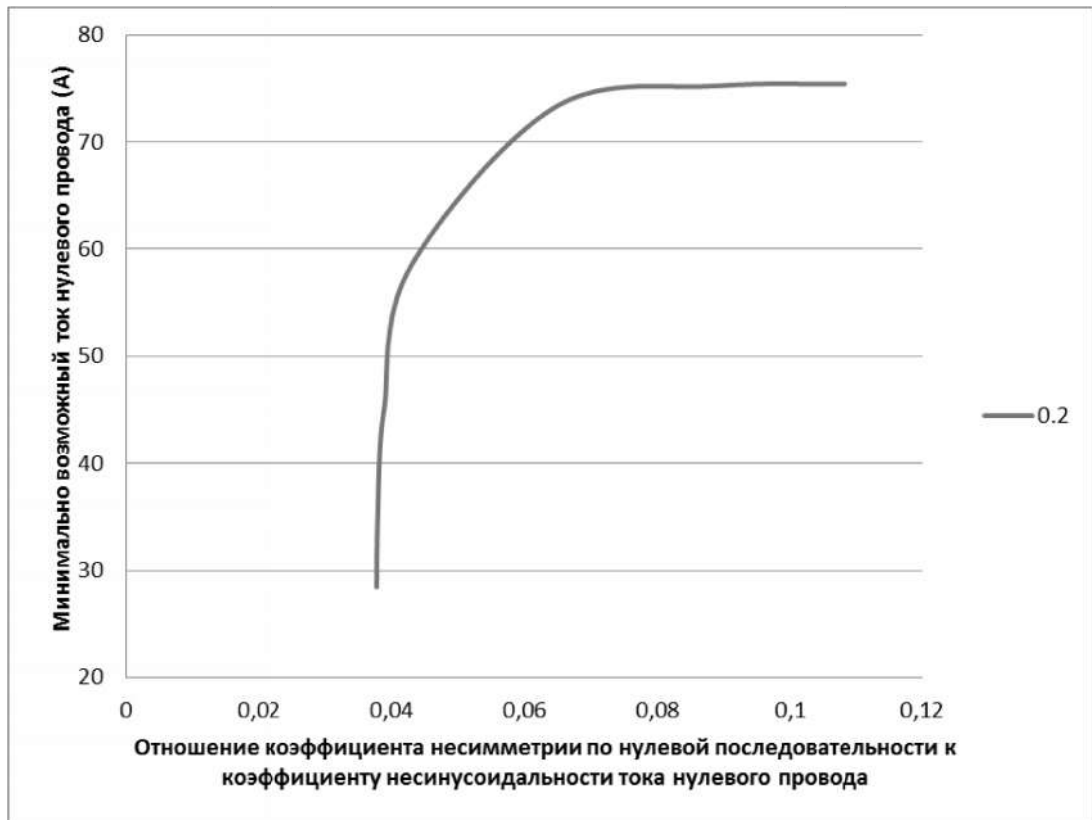


Рисунок 4.4.5 - График зависимости минимально возможного тока нулевого провода от отношения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода

После чего, опираясь на таблицу 4.4.1, необходимо построить график зависимость минимально возможного сечения нулевого провода от отношения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода.

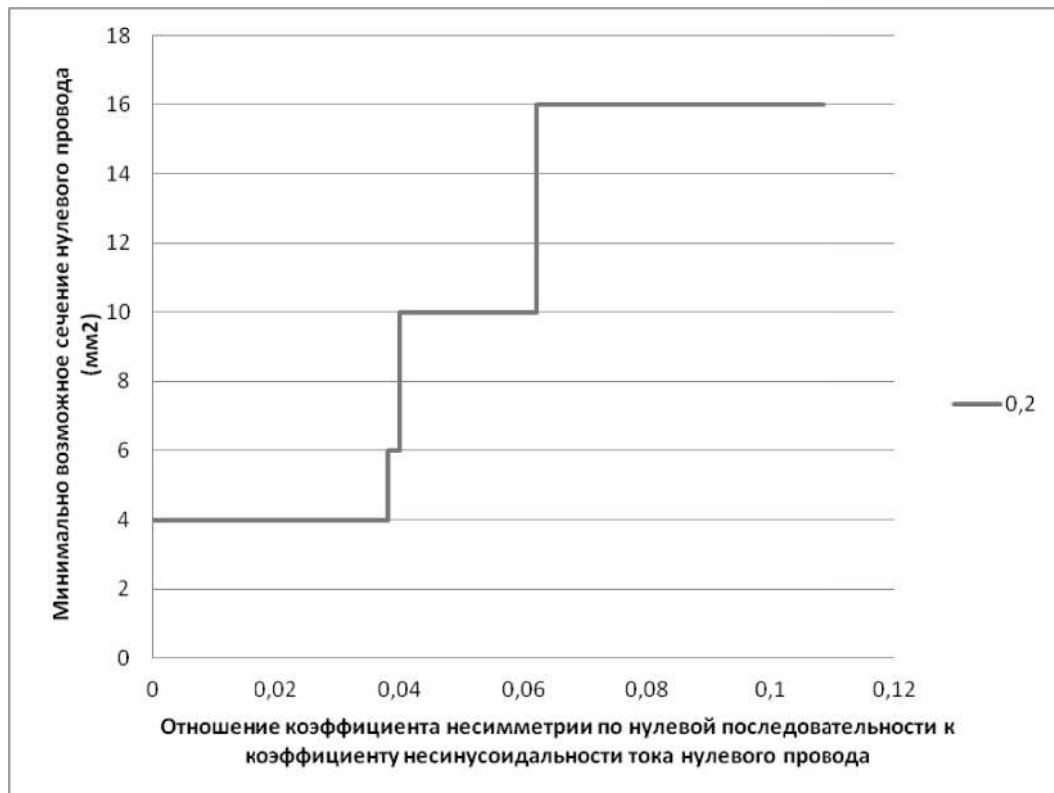


Рисунок 4.4.6 - График зависимости минимально возможного сечения нулевого провода от отношения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода

Как видно из рисунка 4.4.6, компенсация несинусоидальности эффективна при значении отношения коэффициентов выше 0,04.

В нашем случае значение отношения коэффициентов составляет 0,49, что говорит о технической эффективности компенсации высших гармоник.

В частности при компенсации высших гармоник, кратных трем, ток в нулевом проводе снизится с 59,4 А до 18,5 А, что удовлетворяет величине существующего сечения нулевого провода.

Затем необходимо проверить справедливость соотношения $Z_1 < Z_0$.

Стоимость пассивного фильтра токов гармоник, кратных трем, в нулевой провод – $C_1 = 564342$ рубля.

Стоимость установки и первичного обслуживания оборудования $Tr = 50000$ руб.

Так как фильтр токов гармоник, кратных трем, устанавливается стационарно и не требует дополнительного обслуживания в течение всего срока службы, то затраты $Ob = 0$ руб.

То есть $Z_1 = 614342$ рубля.

Найдем значение Z_0

Стоимость пятипроводного кабеля для прокладки в земле ВБбШв 5x10 составляет от 230 рублей за метр. В нашем случае необходимо заменить 2000 метров кабеля от ГРЩ до ВРУ, тогда $C_0 = 230 * 2000 = 460000$ рублей.

На замену данного кабеля необходимо потратить 3000 человек*час, при стоимости одного человек*час 200 рублей. Тогда $Tr_0 = 3000 * 200 = 600000$ рублей.

То есть $Z_0 = 460000 + 600000 = 1060000$ рублей.

В результате выполняется условие $Z_1 < Z_0$, из чего можно сделать вывод, что применение устройств компенсации высших гармоник эффективно как технически, так и экономически.

Выводы по главе 4

Выявлено, что чем меньше соотношение коэффициента несимметрии к коэффициенту несинусоидальности, тем выше эффект от уменьшения токов гармоник, кратных трем. Рассмотренный в работе пример показал, что максимальное изменение тока (79%) может быть достигнуто при минимальном значении коэффициента несимметрии (0,07 для 1-й фазы, 0,077 для 2-х фаз) и при минимальном значении соотношения коэффициентов несинусоидальности и несимметрии (0.014 для 1 фазы, 0.015 для 2-х фаз)

Подтвержден ранее полученный вывод, что изменение величины действующего значения тока нулевого провода тем выше, чем ниже коэффициент несимметрии по нулевой последовательности и чем выше коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода.

Полученная зависимость $\Delta I = A \cdot \left(\frac{K_n}{K_{0I}}\right)^{-B}$ является универсальной, т.к. в ней используются только безразмерные величины. Её следует использовать при оценке текущего значения тока нулевого провода и при его прогнозировании в случае проектирования системы электроснабжения.

Сформированный алгоритм выбора средств компенсации тока нулевого провода позволяет оценить не только техническую, но и экономическую эффективность применения средств компенсации несинусоидальности и несимметрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования представляют собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи разработки метода по выбору оптимального технического решения для минимизации влияния тока нулевого провода на бесперебойность работы электротехнического комплекса предприятия, запитанного от низковольтной четырехпроводной сети.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа экспериментальных исследований и литературных источников были выявлены основные факторы, определяющие изменение тока нулевого провода в четырехпроводной системе электроснабжения предприятия при переменном характере несинусоидальной и несимметричной нагрузки:

- несинусоидальность тока нулевого провода;
- несимметрия токов фаз по нулевой последовательности;
- параметры нагрузки;
- параметры распределительной сети;
- напряжение нагрузки (уровень напряжения).

2. В работе сформирована имитационная модель трехфазной четырехпроводной низковольтной сети в среде MATLAB с несимметричной и несинусоидальной нагрузкой. На основе анализа полученных на модели зависимостей было установлено, что основополагающими факторами, определяющими изменчивость тока в нулевом проводе являются коэффициент несинусоидальности тока нулевого провода и коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности. Определены диапазоны их изменения: $k_{0l} = 0 \div 1$, $k_n = 0 \div 5$.

3. На основе аналитических исследований была получена универсальная зависимость изменения величины тока нулевого провода от k_{0I} и k_n , которая была аппроксимирована уравнением вида $\Delta I = A \cdot \left(\frac{K_n}{K_{0I}}\right)^{-B}$,

где A, B – коэффициенты, зависящие от несинусоидальности токов фаз.

Установлено, что безразмерность величин k_{0I} и k_n определяет её универсальность для нагрузки любого вида и мощности.

Выявлено, что чем выше коэффициент несимметрии фазных токов первой гармоники, тем ниже несинусоидальность тока нулевого провода.

Таким образом, возможно определить для конкретного объекта степень взаимовлияния несинусоидальности и несимметрии на ток нулевого провода.

4. Разработан критерий выбора параметров электротехнических устройств, обеспечивающих бесперебойность работы оборудования электротехнического комплекса предприятия, обусловленного обеспечением допустимой величины тока нулевого провода. Критерий включает в себя выбор наиболее эффективного с экономической точки зрения технического решения по компенсации несимметрии и несинусоидальности, либо изменения сечения нулевого провода.

5. Обоснован метод выбора оптимального решения по разработанному критерию и сформирован алгоритм его реализации, позволяющий на основе полученных в работе зависимостей выбрать оптимальное техническое решение по минимизации влияния тока нулевого провода на бесперебойность работы электрооборудования предприятия.

Основным достоинством предложенного метода является отсутствие необходимости предварительного расчета технической и экономической эффективности применения компенсации несимметрии и несинусоидальности, упрощение решения задачи по оптимизации величины

тока нулевого провода на полученных зависимостях для k_{0I} и k_n в их взаимовлиянии, которые являются универсальными и не зависят от мощности и характера нагрузки, влияющей на режим низковольтной четырехпроводной системы электроснабжения.

6. Представлена оценка эффективности применения разработанного алгоритма на примере действующего предприятия. При выявленных максимальных значениях $k_{0I} = 0.2$, $k_n = 4.08$ и $I_0 = 59,4$ А и при сечении нулевого провода, равном 6 мм^2 , было определено, что оптимальным, при существующем уровне цен на оборудование, является применение компенсации высших гармоник, что позволит снизить ток нулевого провода до допустимых значений, а именно до 18.5 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабышев, А.В. Электроснабжение объектов. Часть 1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007 – 185 с.
2. Гужов, Н.П. Системы электроснабжения: Учебное пособие \ Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 154 с.
3. Головкин, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – Москва: Энергоатомиздат, 1979. – 360 с.
4. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для ВУЗов – 4-е изд., перераб. и доп. / А.А. Федоров, В.В. Каменева – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
5. Колесник, Ю. Н. Потребители электроэнергии: курс лекций по одноим. дисциплине для студентов специальности 43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / Ю. Н. Колесник. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 72 с.
6. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. / под общей ред. А. А. Федорова. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
7. Шидловский, А. К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий/ А. К. Шидловский, Г. Я. Вагин, Э. Г. Куренный. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
8. Цигельман, И.Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий Учебник для электромеханич. спец. техникумов. 3-е изд., испр. и доп./ И.Е. Цигельман – М.: Высш. шк. 1988. — 319 с.
9. Кабышев, А.В. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: Учеб. пособие / А.В.

Кабышев, С.Г. Обухов . – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 168 с.

10. Электрическая часть электростанций: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. С.В.Усова. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 616 с.

11. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.А.Васильев, И.П.Крючков, Е.Ф.Неяшкова, М.Н.Околович; Под ред. А.А.Васильева. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

12. Грудинский П.Г., Мандрыкин С.А., Улицкий М.С. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций / Под ред. П.И.Устинова. – М.: Изд-во «Энергия», 1974. – 576 с.

13. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., дополненное с исправлениями. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 608 с.

14. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004. – 336 с.

15. Мотыгина С.А. Эксплуатация электрической части тепловых электростанций. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Энергия», 1979. 568 с.

16. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.

17. Сыромятников И.А. Режимы работы синхронных и асинхронных двигателей – 4-е изд., переработ. и доп. / Под ред. Л.Г.Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

18. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

19. Пособие для изучения Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей (электрическое оборудование) / Под общ. ред. Ф.Л.Когана. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 352 с.

20. Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для средн. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с.
21. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.
22. Богословский А.С. Электрические цепи переменного тока. Т.1. – Л.: ВВМИЛУ, 1979. – 422 с.
23. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полетовский Л.С. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. школа, 1972. – 448 с.
24. Электротехника. Анализ трехфазных цепей с помощью векторных диаграмм: Конспект лекций. / В.В. Колесников, В.В. Леонтьев, О.Л. Скворцов. – Л.: СЗПИ. - 1988. – с. 4-11
25. Электрическая нагрузка. Виды электрических нагрузок [Электронный ресурс]. URL: http://www.eti.su/articles/electrotehnika/electrotehnika_684.html (дата обращения 01.03.2017 г.).
26. Электротехника. Учебно-методический комплекс [Электронный ресурс]. URL: <http://model.exponenta.ru/electro/0042.html> (дата обращения 01.03.2017 г.).
27. Несимметрия напряжений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sonel.ru/ru/biblio/article/quality-voltage/unsymmetry-voltage/> (дата обращения 01.03.2017 г.).
28. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Стандартинформ. - 2014
29. Несимметрия в электрических сетях и мероприятия по её снижению [Электронный ресурс]. URL: <http://dabarov.narod.ru/gosy/094.htm> (дата обращения 01.03.2017 г.).

30. Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск. - 1997. – 187 с.
31. Железко, Ю.С. Научно-методические основы стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Железко Юрий Станиславович. – М. - 1996. – 46 с.
32. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС. - 2009. – 456 с.
33. Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС. - 2004. – 280 с.
34. Левин, М.С. Качество электрической энергии сельских районов / М.С. Левин, А.Е. Мурадян, Н.Н. Сырых. – М.: Энергия. - 1975. – 224 с.
35. Майер, В.Я. Исследование влияния симметричного и несимметричного отклонения напряжения на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя/ В.Я.Майер // Промышленная энергетика. –1993. –№ 9. – С. 30-34
36. Наумов, И.В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Наумов Игорь Владимирович. – Иркутск. - 2002. – 387 с.
37. Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск. - 1997. – 187 с.
38. Исследование взаимосвязи показателей качества электроэнергии и надежности электроснабжения [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/30840080-Issledovaniya-vzaimosvyazi-pokazateley-kachestva->

elektroenergii-i-nadezhnosti-elektrosnabzheniya.html (дата обращения 01.03.2017 г.).

39. Гантагула Дамдинсурэнгийн Способы нормализации качества и снижения потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ Монголии: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Гантагула Дамдинсурэнгийн. – Иркутск. - 2015. – 190 с.

40. Эффект от применения фильтра токов нулевой последовательности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arnady.ru/specpredlozhenie3/> (дата обращения 01.03.2017 г.).

41. Hoong Kwan Kian, Lam So Ping, Chung Chu Yun. An output regulation based unified power quality conditioner with Kalman filters. IEEE Trans Ind Electron. - 2012. - 59(November(11)). – p. 4248–4262

42. Valtierra-Rodrguez Martin, de Jesus Romero-Troncoso Rene, Alfredo Osornio- Rios Roque, Garcia-Perez Arturo. Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks. IEEE Trans Ind Electron. – 2014. - 61(May(5)). – p. 2473–2482

43. Janik Prezemyslaw, Lobos Tadeusz. Automated classification of power quality disturbances using SVM and RBF networks. IEEE Trans Power Deliv. – 2006. - 21 (July (3)). – p. 1663–1669

44. Mishra S, Bhende CN, Panigrahi BK. Detection and classification of power quality disturbance using S-transform and probabilistic neural network. IEEE Trans Power Deliv. – 2008. - 23(January(1)). – p. 280–287

45. Prakash Mahela Om, Gafoor Shaik Abdul, Gupta Neeraj. A critical review of detection and classification of power quality events. Renew Sustain Energy Rev. – 2015. – 41. – p. 495–505

46. Chellammal N, Subhransu Sekar Dash, Velmurugan V, Ravitheja Gurram. Power quality improvement using multilevel inverter as series active filter. In: Proceedings of IEEE international conference on emerging trends in science, engineering and technology, Tiruchirappalli, Tamilnadu, India. – December 2012. - p. 450–455

47. Farahat MA, Zobah A. Active filters for power quality improvement by artificial neural networks technique. In: Proceedings of IEEE international universities power engineering conference, Bristol, UK. - vol.1. -September2004. - p. 878–883
48. Miller TJE. Reactive power control in electric systems. Toronto, Canada: Wiley. - 1982. – 416 p.
49. Paice DA. Power electronic converter harmonics-multi pulse methods for clean power. New York: IEEE Press. - 1996. – 202 p.
50. Sasaki H, Machida T. A new method to eliminate AC-harmonic current by magnetic flux compensation-consideration on basic design. IEEE Trans Power Appl Syst. -1971. -PAS-90(January). – p. 2009-2019
51. Alexandrovitz A, Yair A, Epstein E. Analysis of a static VAR compensator with optimal energy storage element.IEEE Trans Ind Electron. -1984. - IE-31 (February). – p. 28–33
52. Torrey DA, Al-Zamel AMAM. Single-phase active power filter for multiple nonlinear loads. IEEE Trans Power Electron. -1995. - 10(May). – p. 263–272
53. Bin Li, Minyong Tong. Control method of the three-phase four legs hunt active power filter. In: EnergyProcedia. -2012. - p. 1825–1830
54. Sumner Mark, Palethorpe Ben, Thomas David WP. Impedance measurement for improved power quality-part-2: a new technique for stand-alone active shunt filter control. IEEE Trans Power Deliv. – 2004. -19(July(3)). – p. 1457–1463
55. Prenalatha S, Dash Subhransu Sekhar, Babu Paduchuri Chandra. Power quality improvement features for a distributed generation system using shunt active power filter. Procedia Eng .- 2013. – 64. – p. 265–267
56. Li Yong, Kumar Saha Tapan, Krause Olav, CaoYijia, Rehtanz Christian. An inductively active filtering method for power quality improvement of distribution networks with nonlinear loads. IEEE Trans Power Deliv. – 2013. - 28 (October (4)). – p. 2465–73
57. Hasama Taiki, Maejima Takeshi, Yamamura Naoki, Ishida Muneaki. Improvement of power quality of distribution system using matrix converter and

- active filter. In: IEEE proceedings of 37th IECON, Melbourne. - November 2011. - p. 4140–4145
58. Vlatkovic V, Borojevic D, Lee FC. Input filter design for power factor correction circuits. IEEE Trans Power Electron. – 1996. - 11(January(1)). – p. 199–205
59. Ribeiro ER, Barbi I. A series active power filter for harmonic voltage suppression. In: Proceedings of IEEE twenty-third int telecommunications energy conference, Edinburgh, UK. – October 2001. - p.514–519
60. Takeda M, Ikeda K, Tominaga Y. Harmonic current compensation with active filter. In: Proceedings of IEEE AS annual meeting record. - 1987. - p. 808–815
61. Stacy EJ, Brennen MA. Active power conditioner system. US Patent 4,651,265. - March 17, 1987.
62. Salmeron P, Litran SP. Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters. IEEE Trans Power Deliv. – 2010. - 25(April (2)). –p. 1058–1067
63. Chandrasekar P, Kamaraj V. Integer lifting wavelet transform based hybrid active filter for power quality improvement. In: Proceedings of IEEE int conference on electrical energy systems, Newport Beach, CA. – January 2011. - p. 103–107
64. Rahmani Salem, Al-Haddad Kamal, Youssef Kanaan Hadi. A comparative study of shunt hybrid and shunt active power filters for single-phase applications: simulation and experimental validation. Math Comput Simul. – 2006. – 71. – p. 345–359
65. Singh RK, Goswami SK. Optimum allocation of distributed generation based on nodal pricing for profit, loss reduction, and voltage improvement including voltage rise issue. Electr Power Energy Syst. – 2010. – 32. – p. 637–44
66. Косоухов, Ф.Д. Зависимость потерь мощности от несимметрии токов в силовых трансформаторах от их сопротивления нулевой последовательности

/ Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, Н.Ю. Криштопа // Известия СПбГАУ. – 2014. – №35. – С. 319-325

67. Косоухов, Ф.Д. Методика расчета потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ при распределенной несимметричной нагрузке / Ф.Д. Косоухов, А.Г. Гущинский, М.В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2012. – №27. – С. 312-320

68. Косоухов, Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях: монография / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. – Иркутск. - 2003. – 257 с.

69. Косоухов, Ф.Д. Расчет потерь электроэнергии и показателей несимметрии токов и напряжений в сельской сети 0,38 кВ с помощью программы для ЭВМ / Ф.Д. Косоухов, А.О. Филиппов, М.В. Коломыцев // Известия СПбГАУ. – 2013. – №32. – С. 242-247

70. Косоухов, Ф.Д. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками / Ф.Д. Косоухов, Н.В. Васильев, А.О. Филиппов // Электротехника. – 2014. – №6. – С. 8-12

71. Наумов, И.В. Качество электрической энергии и снижение дополнительных потерь мощности в электрических сетях / И.В. Наумов, С.В. Подъячих, Д.А. Иванов // Вестник ИрГСХА. – 2009. – №37. – С. 83-88

72. Наумов, И.В. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Ползуновский вестник. – 2001. – № 2. – С. 49-56

73. Наумов, И.В. Несимметрия токов как причина дополнительных потерь мощности и снижения качества электрической энергии в сельской распределительной сети 0,38 кВ / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукьясов, С.В. Подъячих // Ползуновский вестник. – 2001. – №2. – С. 35-38

74. Наумов, И.В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения / И.В. Наумов. – Иркутск: Изд-во «На Чехова», 2001. – 217 с.
75. Белицкий А.А. Разработка алгоритма формирования графика электрической нагрузки шахтного водоотлива. Часть 1. / Н.В. Козар, А.А. Белицкий. - «Естественные и технические науки». - г. Москва. - №2(70). - 2014 г. - с. 185-188
76. Хронусов Г.С. Комплексы потребителей регуляторов мощности на горнорудных предприятиях. — М.: Недра. - 1989. – 200 с.
77. Шклярский Я.Э., Брагин А.А. Рациональное формирование графика нагрузки электротехнического комплекса горного предприятия // Записки Горного института. — Т.196. — Спб. — 2012. — С. 281—284
78. А.С. №1026234 СССР. Устройство для автоматического переключения однофазных нагрузок в низковольтных распределительных сетях / А.К. Шидловский, В.А. Невский, Г.А. Москаленко. – Оpubл. в Б.И., 1983. – № 24.
79. Будзко, И.А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И.А. Будзко, В.Ю. Гессен, М.С. Левин. – М.: Колос, 1975. –287 с.
80. Воротницкий, В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат. - 1983. – 368 с.
81. Ганелин, А.М. Экономия электроэнергии в сельском хозяйстве/ А.М. Ганелин.– М.: Колос. - 1983. – 141 с.
82. Горюнов, И.Т. Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалеv, В.А. Богданов //Электрические станции. – 2001. – №1. –С. 16-20

83. Маркушевич, Н.С. Качество напряжений в городских электрических сетях/Н.С. Маркушевич, Л.А. Солдаткина. – М.: Энергия. - 1975. – 256 с.
84. Введение в несимметричность [Электронный ресурс]. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2699 (дата обращения 01.03.2017 г.).
85. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат. - 2000. – 331 с.
86. Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. and Wood, A.R. Power Systems Harmonic Analysis. - John Wiley & Sons. - 1997. – 382 p.
87. Анализ способов и средств компенсации высших гармоник [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/05/53518> (дата обращения 01.03.2017 г.).
88. Журнал «Электро» [Сайт]. URL: <http://www.elektro-journal.ru> (дата обращения 01.03.2017 г.).
89. Бахир, Ю.В. Энергетический режим эксплуатации нефтяных месторождений / Ю.В. Бахир. - М.: Недра. - 1978. - 140 с.
90. Сибикин, Ю.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. / Сибикин, Ю.Д., Сибикин М.Ю., Яшков В.А. – М.: Высшая школа. - 2001. – 167 с.
91. Блантер, С.Г. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности / С.Г. Блантер, И.И. Суд. – М.: Недра. - 1980. – 478 с.
92. Никифоров, Г.В. Энергоснабжение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец // М.: Энергоатомиздат. - 2003. - 479 с.
93. Ополева, Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения. – М: Форум-Инфра-М. - 2006. – 480 с.

94. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей и результатов измерений. / Новицкий, П.В., Зограф И.А. - М.: Энергоатомиздат. - 1985. - 284 с.
95. Мукосеев, Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий. – М: Энергия. - 1973. – 584 с.
96. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / Иванов В.С., Соколов В.И. - М.: Энергоатомиздат. - 1987. – 234 с.
97. Абрамович, Б.Н. Электропривод и электроснабжение горных предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов. – СПб: СПГГИ. - 2004. – 84 с.
98. Шклярский, Я.Э. Методы и средства повышения эффективности управления потоками реактивной мощности электротехнических комплексов горнодобывающих предприятий: дис. на соискание ученой степ. докт. техн. наук: 05.09.03-СПб: изд-во СПбГТУ. - 2004. – 378 с.
99. Скамьин, А.Н. Обоснование структуры и параметров системы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник в напряжении и токе: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.03-СПб: изд-во СПГГИ. - 2011. – 128 с.
100. Белицкий А.А. Исследование высших гармоник в электрической сети социально значимого объекта / Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий. - «Электротехнические комплексы и системы управления». - г. Воронеж. - №3(39). - 2015 г. - С. 54-57
101. Белицкий А.А. Влияние несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения. - «Современная наука и практика». - г. Санкт-Петербург. - №2(19). - 2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://rosstudy.ru/msp/archive/67-2017-2/231-19-2>. (дата обращения 01.03.2017 г.).

102. Белицкий А.А. Исследование высших гармоник в электрической сети социально-значимого объекта. - «Электронный научный журнал». - №4(7). - 2016 г. – С.70-75. [Электронный ресурс]. URL: <http://co2b.ru/docs/enj.2016.04.pdf>. (дата обращения 01.03.2017 г.).
103. Белицкий А.А. Несинусоидальные токи и токи несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения./ «Введение в энергетику. Материалы II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции». - г. Кемерово. - 2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articles/2/Belitckii.pdf> (дата обращения 01.03.2017 г.).
104. Карпов, Ф.Ф. Регулирование напряжения в электросетях промышленных предприятий. - М., «Энергия». - 1970. – 223 с.
105. Короткие замыкания, перегрузки, переходные сопротивления. Меры противопожарной безопасности [Электронный ресурс]. URL: <http://electricalschool.info/main/osnovy/54-korotkie-zamykanija-peregruzki.html> (дата обращения 01.03.2017 г.).
106. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ. - 2006. – 320 с.
107. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат. - 1985. – 216 с.
108. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. Для электроэнерг. спец. вузов/ В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.: под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Школа. - 1998. – 511 с.
109. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат. - 1988. – 288 с.
110. Электротехнический справочник: В т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. Профессоров МЭИ

В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ. - 2004. – 964 с.

111. Белицкий А.А. Компенсация несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения./ Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий.// «Известия Тульского государственного университета. Технические науки». - г. Тула. - №11(2). - 2016г. – С. 531-540

112. Белицкий А.А. Перегрузка нулевого провода в низковольтных электрических сетях. / «Современная наука и практика». - г. Санкт-Петербург. - №2(19). - 2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://rosstudy.ru/msp/archive/67-2017-2/232-19-3>. (дата обращения 01.03.2017 г.).

113. Киселев М.Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трехфазных системах электроснабжения на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Киселев М.Г. – Москва. - 2017. – 160 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Математическая модель для определения взаимовлияния несимметрии и несинусоидальности.

Определение коэффициентов несимметрии токов нулевой и обратной последовательностей:

$$a = e^{j \cdot 120^\circ}.$$

1. Определение тока прямой последовательности по выражению (A.1)

$$\dot{I}_1 = \frac{(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)}{3}. \quad (\text{A.1})$$

2. Определение тока обратной последовательности по выражению (A.2)

$$\dot{I}_2 = \frac{(\dot{I}_A + \dot{I}_B \cdot a^2 + \dot{I}_C \cdot a)}{3}. \quad (\text{A.2})$$

3. Определение тока нулевой последовательности по выражению (A.3)

$$\dot{I}_{0n} = \frac{(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)}{3}. \quad (\text{A.3})$$

4. Определение коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности по выражению (A.4)

$$K_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%, \quad (\text{A.4})$$

где I_2 - действующее значение тока обратной последовательности;

I_1 - действующее значение тока нулевой последовательности.

5. Определение коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности по выражению (A.5)

$$K_{0I} = \frac{I_{0n}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (\text{A.5})$$

где I_0 - действующее значение тока нулевой последовательности.

6. Определение действующего значения тока по выражению (A.6)

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (\text{A.6})$$

где I_m - амплитудное(максимальное) значение тока.

Определение коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода:

7. Определение тока нулевого провода по выражению (A.7)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (\text{A.7})$$

1. Ток нулевого провода можно представить в виде:
 $i_0 = I_{0(1)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{(1)}) + I_{0(2)} \cdot \sin(2 \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{(2)})) + \dots + I_{0(n)} \cdot \sin(k \cdot (\omega \cdot t + \varphi_{(n)})),$

где n – номер гармоники;

$I_{0(n)}$ - амплитуда тока на n -гармонике;

$\varphi_{(n)}$ - сдвиг фаз между токов и напряжением n -гармоники.

8. Определение коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода по выражению (A.8)

$$k_n = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^N I_{0(n)} \right)^2}}{I_{0(1)}}. \quad (\text{A.8})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

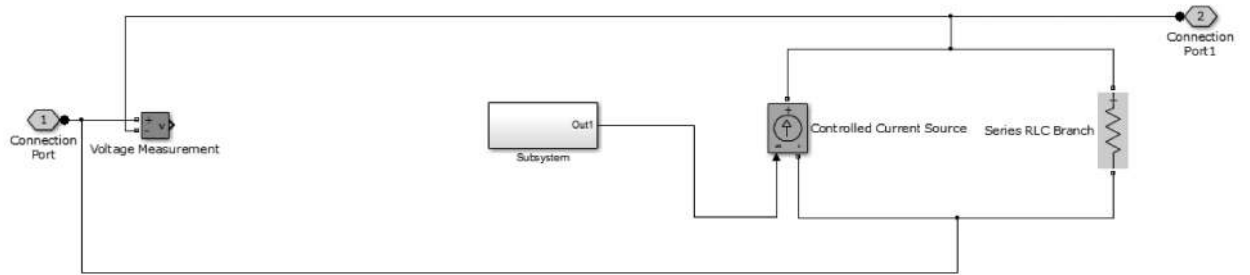


Рисунок В.1 - Содержание блоков Subsystem 1-3

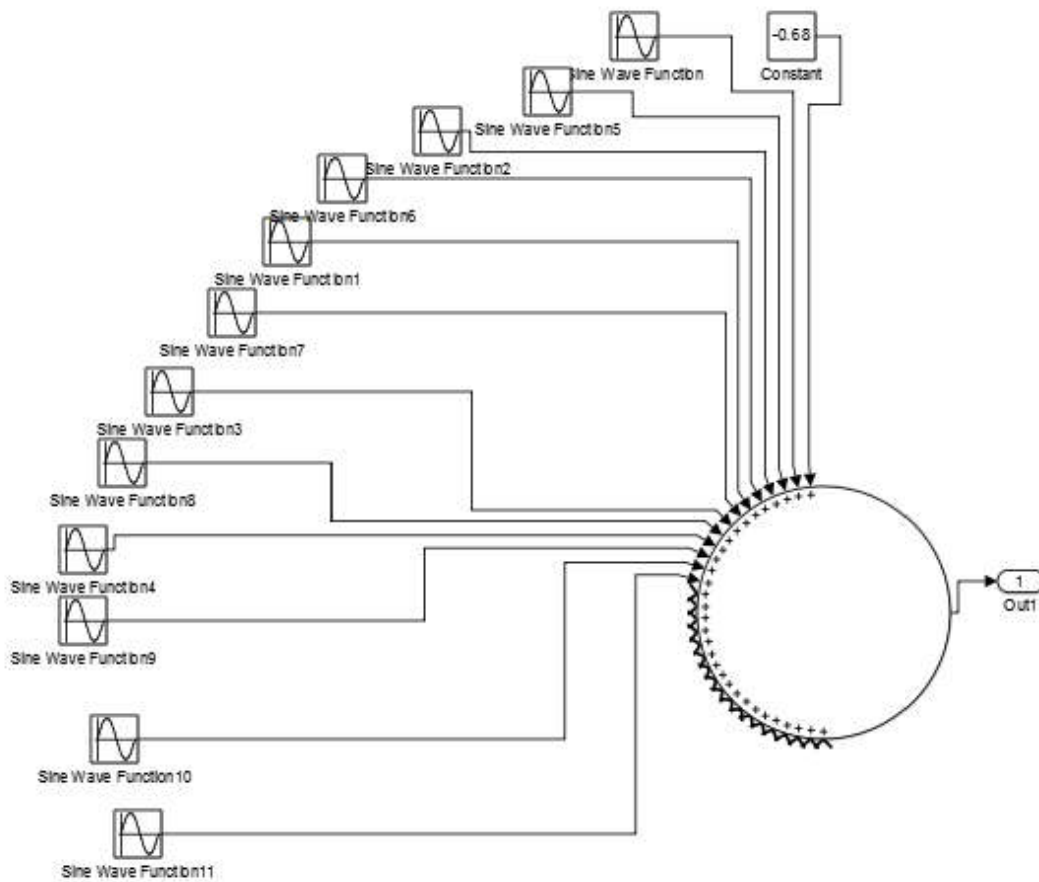


Рисунок В.2 - Содержание блока Subsystem