

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*

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Назарычев Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», ректор

Цинкович Олег Игоревич, кандидат технических наук, СПб ГКУ «Управление заказчика по строительству и капитальному ремонту объектов инженерно-энергетического комплекса», инженер 1-й категории

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 31 мая 2017 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 31 марта 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 четырехпроводной 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, C. Tahan, 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 факторов, определяющих изменение тока нулевого провода в четырехпроводной системе электроснабжения;
2. Определение зависимости величины тока нулевого провода от взаимовлияния выявленных факторов;
3. Разработка критерия выбора параметров 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.

Методология и методы исследования

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

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.

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.

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 распре-

делительной 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.

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 перемены в электроснабжении, вызванные превышением допустимого значения тока нулевого провода.

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.

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.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 68 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 113 наименований и 2 приложения. Общий объем диссертации 123 страницы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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.

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 текущим изменением нагрузки, которая может быть нелинейной и несимметричной.

В работе доказано, что при выборе технических решений компенсации тока в нулевом проводе необходимо применять коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности и коэффициенты несинусоидальности тока нулевого провода. В технической литературе такой подход представлен впервые.

В качестве объекта исследования принята низковольтная четырехпроводная сеть предприятия с нелинейной и несимметричной нагрузкой.

Установлено, что в некоторых случаях только от токов, кратных трем, значение тока в нейтрали может превышать значения фазных токов, вплоть до 300 %. При этом определено, что с увеличением коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода (K_n), его значение возрастает нелинейно, как показано на рисунке 1.

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

По результатам аналитических исследований выявлено, что при несимметрии нагрузки следует учитывать коэффициент несимметрии только по нулевой последовательности (K_{0l}).

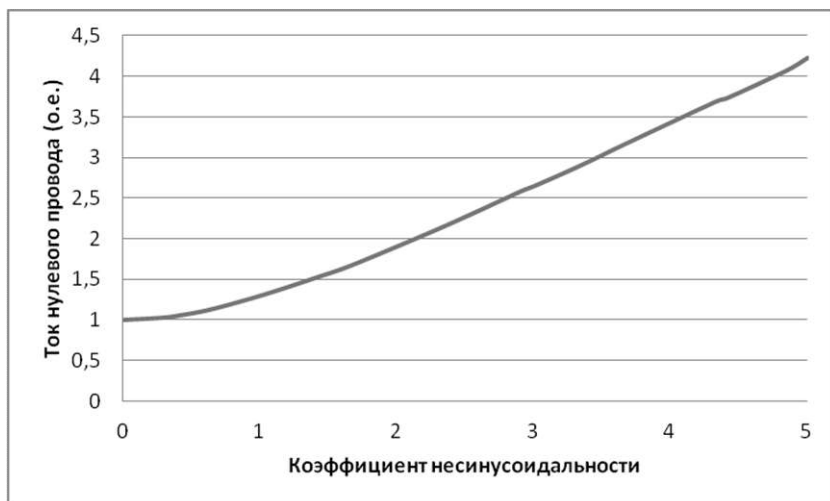


Рисунок 1 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода

Для примера зависимость величины тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности приведена на рисунке 2.

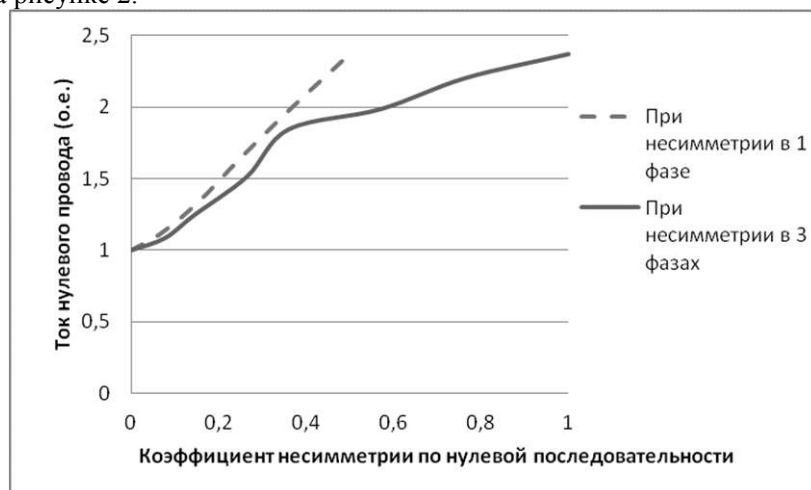


Рисунок 2 - График зависимости тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз

Очевидно, что влияние сечения нулевого провода на ограничение значения его тока можно записать в виде $I_0 \leq I_{S0}$, где I_0 - величина тока нулевого провода, А; I_{S0} - максимально допустимое значение тока нулевого провода для сечения провода S_0 , А.

Установлено, что параметры нагрузки в сочетании с конфигурацией распределительной сети оказывают значительное влияние на ток нулевого провода. Для численной оценки этого влияния были проведены исследования на компьютерной модели в среде *MATLAB*.

На основе полученных результатов была определена необходимость учета конфигурации сети при оценке величины тока нулевого провода.

На основе анализа литературных источников было установлено, что чем выше уровень напряжения при прочих равных условиях, тем меньше значения K_{0l} и K_n .

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, с помощью которой определялся ток в нулевом проводе в относительных единицах при изменении коэффициентов. Их вариация была принята в интервалах: K_{0l} от 0 до 1, K_n от 0 до 5, т.к. при изменении амплитуды токов фаз коэффициент несимметрии по нулевой последовательности не может превышать единицы, а пределы изменения коэффициента несинусоидальности выбраны исходя из статистически вероятных его значений в условиях реальной нагрузки. Поскольку K_n и K_{0l} характеризуют не мощность нагрузки, а лишь её соотношение по несимметрии и наличию высших гармоник, то полученные результаты можно обобщить на любую нагрузку, подключенную к четырехпроводной сети.

Для примера один из полученных графиков взаимозависимости K_n от K_{0l} представлен на рисунке 3.

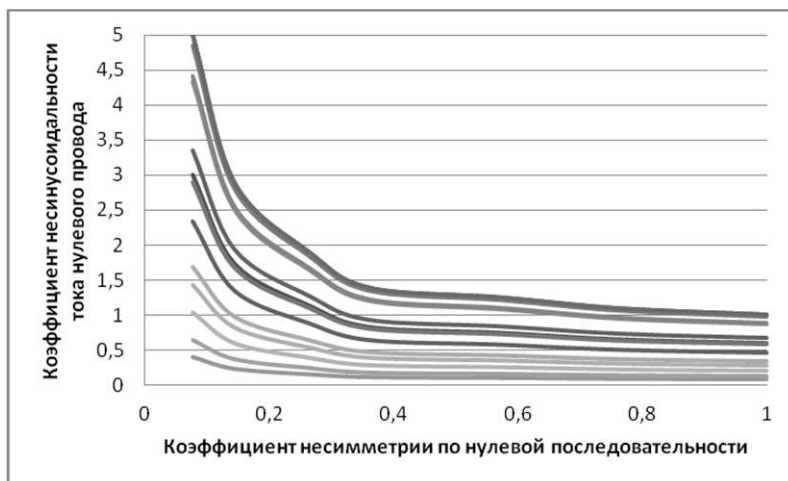


Рисунок 3 - График зависимости коэффициента несинусоидальности тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности токов фаз при несимметрии в трех фазах

Семейство графиков получено для множества значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Каждый из графиков построен для конкретных значений несинусоидальности фазных токов.

Выявлено, что чем выше коэффициент несимметрии фазных токов первой гармоники, тем ниже несинусоидальность тока нулевого провода. Таким образом установлена необходимость определения для конкретного объекта степени взаимовлияния несинусоидальности и несимметрии на ток нулевого провода. Определена закономерность, свидетельствующая о том, что при максимальной несимметрии фазных токов третьей гармоники K_n для каждого из случаев максимален, при минимальной несимметрии - минимален.

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 то-

ков фаз по нулевой последовательности; параметры нагрузки; параметры распределительной сети; напряжение нагрузки (уровень напряжения).

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.

Для выявления совместного влияния несимметрии и несинусоидальности электрической нагрузки на ток в нулевом проводе была сформирована модель трехфазной четырехпроводной сети в среде *MATLAB*, принципиальная схема которой показана на рисунке 4.

В качестве нагрузки была принята нелинейная и несимметричная нагрузка при варьировании K_n и K_{oi} в указанных выше пределах.

Установлено, что рассмотрению подлежат только коэффициент несинусоидальности в нулевом проводе и коэффициенты несимметрии в четырехпроводной системе. Причем, учитывая их независимость от мощности нагрузки, при моделировании была выбрана нагрузка от 0 до 100 кВт.

Выявлено различное влияние несинусоидальности и несимметрии на ток нулевого провода. Показано влияние несимметрии при несимметричной нагрузке либо в одной, либо в трех фазах (аналогично в двух фазах), что характеризуется зависимостью, приведенной на рисунке 5. Возможное изменение I_0 в процентах показано относительно его величины при конкретном значении коэффициентов несимметрии и несинусоидальности.

По результатам компьютерного моделирования были построены графики зависимости изменения величины действующего значения I_0 от соотношения K_{oi} к K_n (рисунок 6).

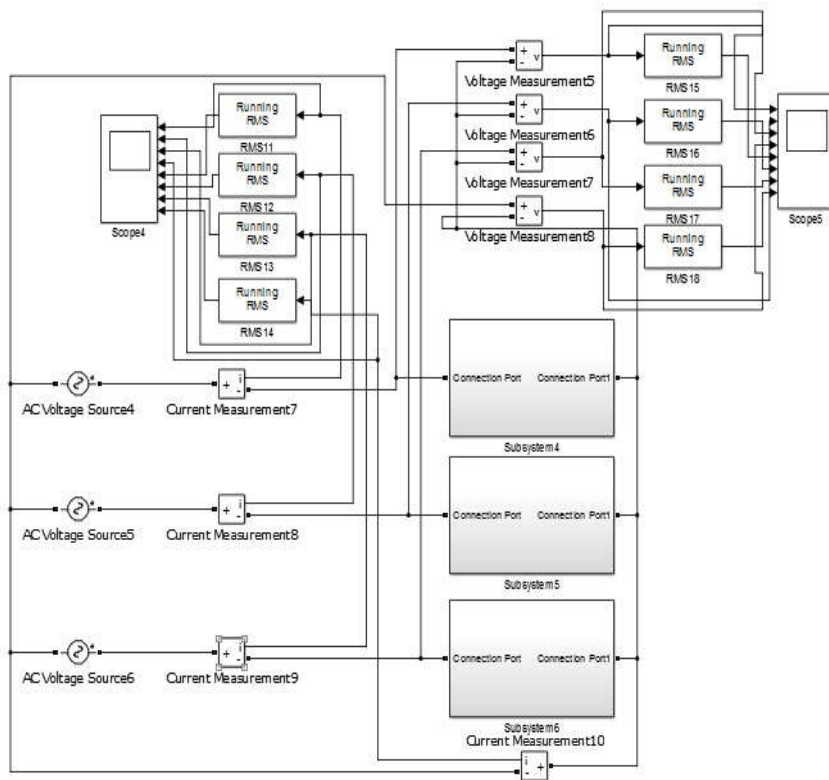


Рисунок 4 - Модель трехфазной четырехпроводной сети в системе *MATLAB*

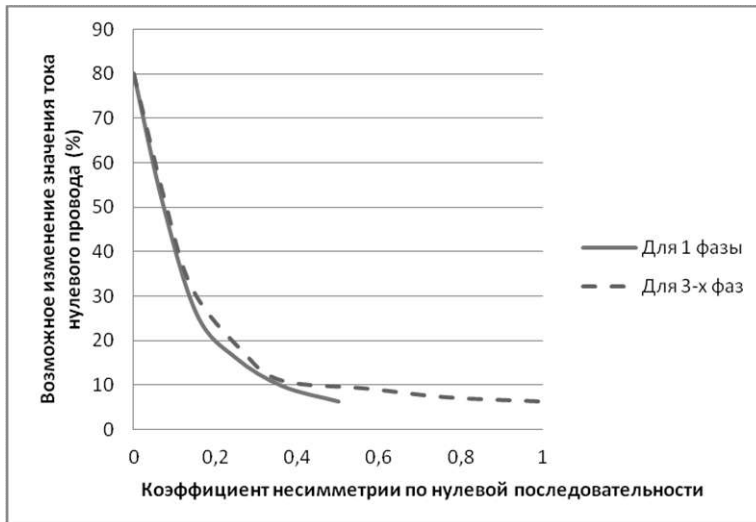


Рисунок 5 - График зависимости возможного изменения тока нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

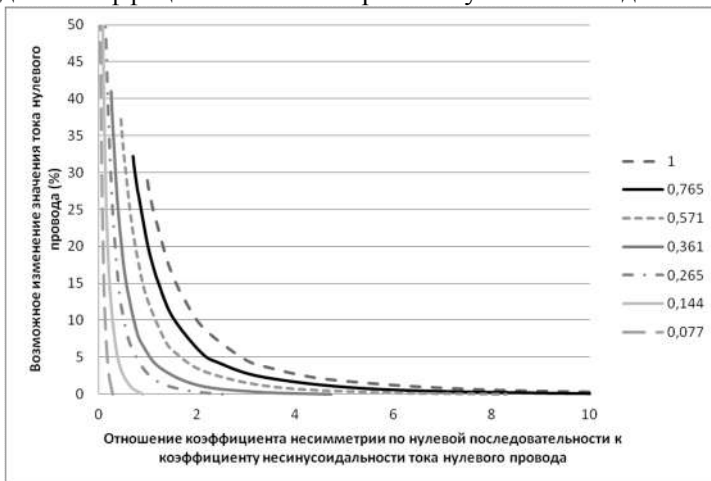


Рисунок 6 - Семейство графиков зависимости возможного изменения тока нулевого провода от отношения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода

Как видно из рисунка 6, чем меньше соотношение K_{0I} к K_n , тем выше эффект от уменьшения тока 3-ей гармоники. Причем максимальное изменение тока (79 %) может быть достигнуто при минимальном значении K_{0I} (0,07 для 1-й фазы; 0,077 для 2-х фаз) и при минимальном значении соотношения K_{0I} к K_n (0,014 для 1 фазы; 0,015 для 2-х фаз).

Указанные кривые были аппроксимированы зависимостью вида:

$$\Delta I = A \left(\frac{K_n}{K_{0I}} \right)^{-B}, \quad (1)$$

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

Зависимость (1) является универсальной, т.к. в ней используются только безразмерные величины. Её следует использовать при оценке текущего значения I_0 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.

Для определения экономической эффективности была сформирована функция затрат вида:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_0, \quad (2)$$

где Z_1 - затраты на устройства компенсации высших гармоник;

Z_2 - затраты на устройства компенсации несимметрии;

Z_0 - затраты на замену нулевого кабеля.

На основании проведенных исследований был сформирован метод выбора эффективного способа уменьшения тока в нулевом проводе и разработан алгоритм, представленный на рисунке 7.

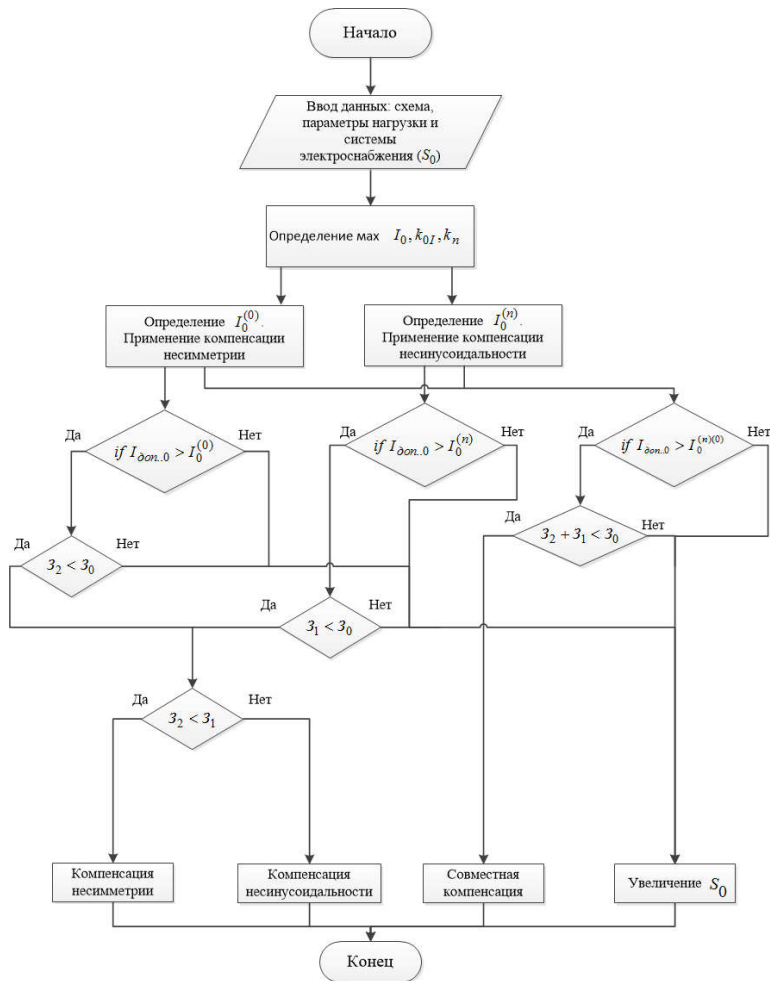


Рисунок 7 - Алгоритм выбора эффективного способа уменьшения тока в нулевом проводе: $I_0^{(0)}$ - ток нулевого провода при компенсации несимметрии; $I_0^{(n)}$ - ток нулевого провода при компенсации несинусоидальности; $I_0^{(n)(0)}$ - ток нулевого провода при совместной компенсации; $I_{доп.0}$ - допустимый ток нулевого провода.

Вышеприведенный алгоритм проиллюстрирован на примере его применения в электрической сети 0,4 кВ в СЗГМУ им. Мечникова.

Кривые фазных токов и тока нулевого провода представлены на рисунках 8, 9.

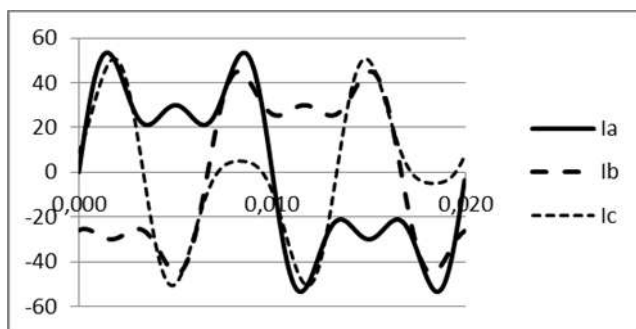


Рисунок 8 - Осциллограмма фазных токов

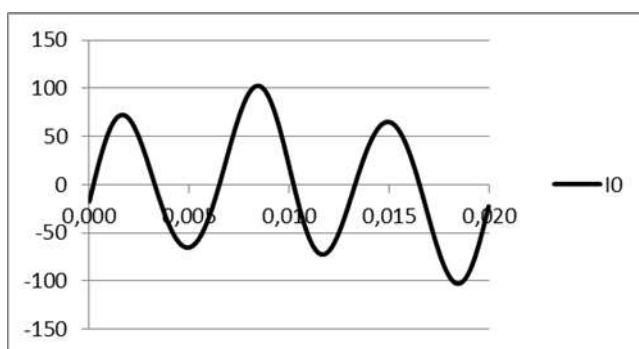


Рисунок 9 - Осциллограмма тока нулевого провода

Выявленные коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности — $K_{0l} = 0,2$, несинусоидальности тока нулевого провода — $K_n = 4,08$.

Действующие значения токов фаз составили $A - 35$ А, $B - 33$ А, $C - 30$ А. Нулевого провода — 59,4 А. Сечение фазных и нулевого провода сети — 6 мм².

Для проверки эффективности компенсации несимметрии формируется график зависимости минимально возможного сечения нулево-

го провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности при отсутствии несинусоидальности (рисунок 10).

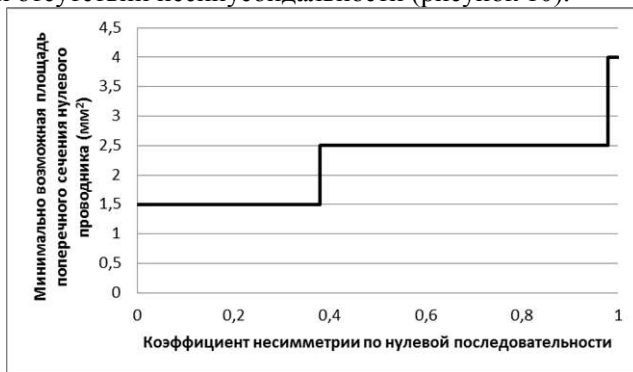


Рисунок 10 - График зависимости минимально возможного сечения нулевого провода от коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

Компенсация несимметрии неэффективна, т.к. площадь поперечного сечения существующего нулевого проводника превышает максимальные значения сечения, полученные на рисунке 10.

Проверка эффективности технической компенсации несинусоидальности осуществляется на основе анализа графика зависимости минимально возможного сечения нулевого провода от отношения K_{0l} к K_n , показанного на рисунке 11.

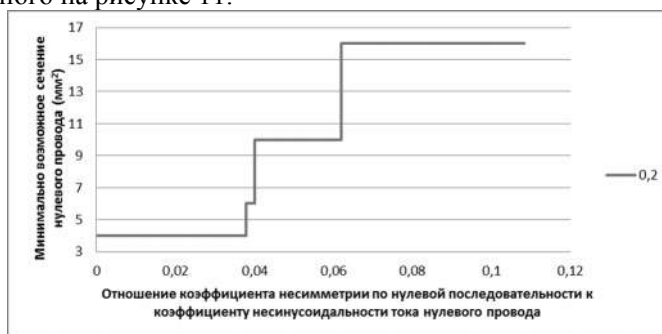


Рисунок 11 - График зависимости минимально возможного сечения нулевого провода от отношения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности к коэффициенту несинусоидальности тока нулевого провода

Как видно из рисунка 11, компенсация несинусоидальности эффективна при значении отношения коэффициентов выше 0,04. В данном случае значение отношения коэффициентов составляет 0,49, что свидетельствует о технической эффективности компенсации высших гармоник. В частности при компенсации высших гармоник, кратных трем, ток в нулевом проводе снизится с 59,4 до 18,5 А, что удовлетворяет величине существующего сечения нулевого провода.

Проверка экономической целесообразности позволила сделать вывод, что для выбранного объекта применение устройств компенсации высших гармоник эффективно как технически, так и экономически.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научно-технической задачи минимизации тока в нулевом проводе трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения предприятия при наличии нелинейной и несимметричной нагрузки.

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} от 0 до 1, K_n от 0 до 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

$$\Delta I = A \left(\frac{K_n}{K_{0I}} \right)^{-B}.$$

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.

Основные положения работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Белицкий А.А. Исследование высших гармоник в электрической сети социально значимого объекта / Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий. // Электротехнические комплексы и системы управления, 2015 . - №3(39). - С. 54-57.

2. 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, 2016. - №11(2). – С. 531-540.

3. Белицкий А.А. Разработка алгоритма формирования графика электрической нагрузки шахтного водоотлива. Часть 1 / Н.В. Козар, А.А. Белицкий. // Естественные и технические науки, 2014. - №2(70). - С. 185-188.

Прочие издания:

4. Белицкий А.А. Перегрузка нулевого провода в низковольтных электрических сетях // Современная наука и практика, 2017 . - №2(19). URL: <http://rosstudy.ru/msp/archive/67-2017-2/232-19-3> (дата обращения 10.03.2017 г.).

5. Белицкий А.А. Влияние несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения // Современная наука и практика, 2017. - №2(19). URL: <http://rosstudy.ru/msp/archive/67-2017-2/231-19-2> (дата обращения 10.03.2017 г.).

6. Белицкий А.А. Исследование высших гармоник в электрической сети социально-значимого объекта // Электронный научный журнал, 2016. - №4(7). – С.70-75. URL: <http://co2b.ru/docs/enj.2016.04.pdf> (дата обращения 10.03.2017 г.).

7. 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, 2016. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articles/2/Belitckii.pdf> (дата обращения 10.03.2017 г.).