

На правах рукописи



БЕЛИЦКИЙ АНТОН АРНОЛЬДОВИЧ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НЕНОРМИРУЕМЫХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ
ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» на кафедре общей электротехники.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Шклярский Ярослав Элиевич.

Официальные оппоненты:

Коровкин Николай Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Теоретическая электротехника и электромеханика" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург;

Семыкина Ирина Юрьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электропривода и автоматизации института энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово;

С 01.09.2019: профессор кафедры "Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети" федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Севастопольский государственный университет", г. Севастополь;

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва.

Защита диссертации состоится «02» октября 2019 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах»

Автореферат разослан «05» июля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05
к.т.н., доцент



Стоцкая А.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В электротехнических комплексах предприятий в последнее время все чаще и чаще внедряются мощные электропотребители, которые вносят значительные нарушения в напряжения и токи системы электроснабжения. Несмотря на это для качественной работы подобного оборудования необходимо напряжение, полностью удовлетворяющее международным стандартам качества электроэнергии. В связи с этим возникает ситуация взаимовлияния работы оборудования и качества электрической энергии. Кроме того в трехфазных четырехпроводных электрических сетях несимметричные и нелинейные потребители приводят к увеличению нагрузки на нулевой рабочий проводник. Наибольшее влияние это оказывает на эксплуатируемые сети, к которым подключается вновь вводимая в работу нелинейная нагрузка. Это зачастую приводит к аварийным ситуациям, вызывающим прекращение электроснабжения, перекос фаз по напряжению и даже пожары.

В настоящее время государственными стандартами нормируются только коэффициенты несинусоидальности и несимметрии (для основной гармоники) по напряжению, которые, к сожалению, не учитывают возможность возникновения тока в нулевом рабочем проводнике.

Зарубежные и международные стандарты качества электроэнергии частично учитывают и нормируют гармонический состав фазных токов, например IEEE 519-2014 (США) ограничивает пределы содержания гармонических составляющих в токах нагрузки, которые они потребляют из сети, а IEC 61000-3-2:2014 (и на его основе ГОСТ IEC 61000-3-2-2017) устанавливают аналогичные пределы для нагрузок 0,38 кВ с потребляемым током ≤ 16 А в одной фазе.

Однако вопрос остается актуальным для нагрузок с потребляемым током свыше 16 А, а также для комплекса неравномерно распределенных нелинейных нагрузок, усиливающих несимметричную составляющую тока нулевого рабочего проводника за счет токов гармоник, не кратных 3-м.

В ГОСТ Р 50571.5.52-2011 (вступивший в силу в 2013 г.) единственным расширением параметров нулевого рабочего проводника является увеличение допустимого сечения нулевого рабочего проводника. Однако для существующих предприятий замена нулевого рабочего проводника на новый с большим сечением может быть сопряжена с большими материальными затратами и технологическими сложностями, связанными с его прокладкой по старым кабельным трассам.

В связи со всем вышесказанным относительно тока нулевого рабочего проводника возникла новая ситуация, связанная с его сечением, нелинейностью и несимметрией нагрузки и прочими факторами, оказывающими влияние на величину тока в нулевом рабочем проводнике. Для действующего предприятия все это приводит к вопросу о необходимости решения комплексной задачи снижения тока нулевого рабочего проводника в зависимости от различных факторов, оказывающих влияние на его величину.

Вопросами тока нулевого рабочего проводника занимались многие ученые: Г.Я. Вагин, М.А. Юндин, Н.В. Хорошилов, A. Baggini, Z. Hanzelka и пр. В частности, Вагин Г.Я. с соавторами – исследовали влияние нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе в сетях 380/220 В. Авторы высказали мнение, что при превышении током нулевого провода фазного тока необходимо принимать меры по его уменьшению с помощью корректоров коэффициента мощности или фильтров высших гармоник.

Юндин М.А. совместно с соавторами предложили устройство для компенсации тока 3-й гармоники в нулевом проводе 4-х проводной сети. Однако основным недостатком подобного устройства является невозможность его применения к несимметричным нагрузкам, поскольку конструкция устройства полностью симметрична.

Хорошилов Н.В. и соавторы предложили способ защиты трехфазной электрической сети с нулевым проводом от несимметричных режимов. Однако он не позволяет в полной мере оценить влияние того или иного фактора на ток в нулевом рабочем проводнике, а лишь защищает трехфазную сеть от возможных перегрузок с помощью плавких предохранителей, что при

современном уровне технического развития защитных устройств является малоперспективным способом для распределительных сетей низкого напряжения.

Таким образом, во-первых, очевидно, что проблема превышения допустимых значений тока в нулевом рабочем проводнике существует и, во-вторых, она полностью не решена с точки зрения взаимного влияния на его величину несимметрии и несинусоидальности.

Отсюда следует, что тема работы является актуальной, так как связана с энергоэффективностью электротехнического комплекса предприятий и с обеспечением безаварийной работы его 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», а также формуле специальности: «...объектами изучения являются электротехнические комплексы и системы...электрооборудования...».

Цель работы

Обеспечение безаварийной работы оборудования электротехнического комплекса предприятия путем использования алгоритма эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети.

Основные задачи исследования

1. Выявление основных факторов, оказывающих влияние на изменение тока нулевого рабочего проводника в трехфазной четырехпроводной распределительной системе электрооборудования;

2. Анализ существующих и разработка новых ненормируемых показателей качества электроэнергии и определение зависимости величины тока нулевого рабочего проводника от взаимовлияния выявленных факторов, выраженных этими показателями;

3. Разработка по выявленным зависимостям алгоритма эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети;

4. Разработка метода расчета потерь мощности в проводнике, связанных с несимметрией и несинусоидальностью фазных нагрузок;

5. Разработка технического устройства по созданному алгоритму для выявления фактора, вносящего определяющий вклад в величину тока нулевого рабочего проводника.

Объект исследования

Трехфазная четырехпроводная распределительная электрическая сеть напряжением до 1000 В электротехнического комплекса предприятия.

Предмет исследования

Ток в нулевом рабочем проводнике и его вариативность.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач применялись методы теории электрических цепей и электрооборудования, математического моделирования электрических цепей, компьютерного моделирования с использованием программных продуктов и Proteus Design Suite, интерполяции и аппроксимации данных, эвристического алгоритма поиска решения задачи, а также экспериментальных исследований режимов работы электрической распределительной сети.

Научная новизна

1. Научная идея по определению вклада несимметрии нагрузки предприятия и несинусоидальных режимов его электрической сети в величину тока нулевого рабочего проводника, базирующаяся на принципе применения вновь введенных ненормируемых показателей качества электроэнергии, а именно показателя несинусоидальности и показателя несимметрии, разработанных на основе полученных функциональных зависимостей величины тока от совместного влияния несинусоидальности, выраженной токами гармоник, кратных трем, и несимметрии, вносящей в состав тока все остальные гармоники, в т.ч. и первую;

2. Полученные на основе математического моделирования зависимости взаимовлияния показателей несимметрии и несинусоидальности, используемые для выявления фактора, вносящего определяющий вклад в значение тока нулевого рабочего проводника при фиксированных граничных условиях по его сечению, базирующиеся на выявленных оценках вариативного анализа влияния параметров нагрузки на значение показателей в их взаимосвязи;

3. Метод определения потерь мощности от несимметрии и несинусоидальности фазных нагрузок, включающий необходимый учет взаимовлияния несимметрии и несинусоидальности и позволяющий существенно повысить точность оценки суммарных потерь мощности в нулевом рабочем проводнике по сравнению с существующими методами. Корректность метода подтверждена экспериментальным моделированием;

4. Разработан алгоритм эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети, в основу которого положено применение программного кода на базе выявленных взаимозависимостей ненормируемых показателей качества электроэнергии при условии выполнения требований стандартов на измерение электрических величин.

Личный вклад автора

1. Проведены экспериментальные исследования в трехфазной четырехпроводной электрической распределительной сети предприятия по определению показателей качества электрической энергии;

2. Разработана имитационная модель трехфазной четырехпроводной распределительной электрической сети 0,38 кВ с несимметричной и нелинейной нагрузкой;

3. Проведены аналитические исследования, на основе которых получены взаимозависимости показателей несимметрии и несинусоидальности, позволяющие определить основополагающий фактор возникновения тока нулевого рабочего проводника;

4. Разработан метод определения потерь мощности в кабеле и проведено экспериментальное исследование, подтверждающее его эффективность;

5. Разработан алгоритм эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети, а также техническое устройство, подтверждающее адекватность его работы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Научная идея применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для определения основополагающего фактора, влияющего на величину тока в нулевом рабочем проводнике;

2. Взаимозависимости показателей несимметрии и несинусоидальности, позволяющие определить основополагающий фактор, влияющий на изменение тока в нулевом рабочем проводнике;

3. Метод расчета потерь мощности в распределительной сети, возникающих из-за несимметрии и несинусоидальности, в т.ч. в нулевом рабочем проводнике;

4. Алгоритм эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети.

Достоверность выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов математического и имитационного моделирования электрических распределительных сетей, а также достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований величины тока в нулевом рабочем проводнике.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что результаты, полученные на основе применения предложенных ненормируемых показателей качества электроэнергии, могут быть реализованы на предприятиях, модернизирующих свой электротехнический комплекс за счет внедрения нелинейной и/или несимметричной нагрузки. С помощью созданного алгоритма эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети, реализованного в виде технического устройства, можно снизить аварийность в системе электроснабжения, вызванную превышением допустимого значения тока нулевого рабочего проводника.

Кроме того с помощью предложенного метода расчета потерь мощности в кабельных линиях можно существенно повысить точность расчета суммарных потерь мощности и теплового нагрева кабельных каналов при проектировании новых объектов, а также объективно корректировать повышающие коэффициенты, применяемые при оплате за электроэнергию.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», а также приняты к внедрению в производственный процесс ОАО «Фортекс».

Апробация

Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на: «II-й Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетический», 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, конференции 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, г. Санкт-Петербург, 29 января-1 февраля 2018 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, входящих в систему международного цитирования Scopus, 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 4 в прочих научных изданиях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 72 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 116 наименований и 2 приложения. Общий объем диссертации 139 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ существующих систем электроснабжения предприятий. Выявлено, что практически каждый электротехнический комплекс промышленного предприятия или крупного объекта инфраструктуры содержит в составе своей электрической сети низковольтную составляющую, в большей степени характеризуемую современными нелинейными

и несимметричными нагрузками, что в свою очередь вызывает увеличение значения тока в нулевом рабочем проводнике.

Нулевой рабочий проводник, как и фазный провод, имеет ограничение по величине тока. Показано, что из-за некорректного подключения потребителей или повреждения фазных проводников суммарный ток, проходящий в нулевом рабочем проводнике, может превышать номинальное значение, что приведет к дополнительному нагреву.

Также выявлено, что ток в нулевом рабочем проводнике может превышать фазный ток при различных типах нагрузки. Особенно ярко это проявляется с несимметричной и нелинейной нагрузкой.

Согласно анализу данных МЧС о пожарах в РФ за 2012-2016 годы установлено, что основной причиной возгораний электроустановок (77.68%) являлся кабель/провод, в среднем их количество составило 31734 в год, причем ежегодный рост числа возгораний составил в среднем 750 (рисунок 1).

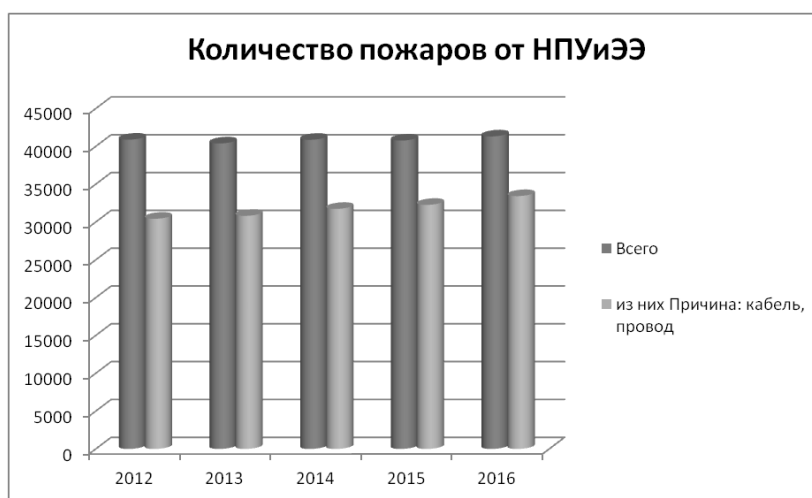


Рисунок 1 – Общее количество возгораний от нарушения правил установки и эксплуатации электрооборудования за 2012-2016 годы

Все вышесказанное приводит к выводу о том, что несимметричная и нелинейная нагрузка, вызывающая перегрузку нулевого рабочего проводника, также приводит и к увеличению аварийности на производстве (в т.ч. к пожарам), что ставит вопрос об определяющем факторе возникновения тока нулевого рабочего проводника и способах его компенсации.

В связи с вышесказанным была сформулирована цель и задачи исследования.

Был выбран объект исследования – трехфазная четырехпроводная распределительная электрическая сеть системы электроснабжения низкого напряжения, входящая в состав электротехнического комплекса предприятия. Особый акцент был сделан на показателях несимметрии и несинусоидальности, в связи с чем в качестве предприятия был выбран социальный объект, в котором эти показатели имеют максимальные значения.

Во второй главе проанализированы существующие показатели качества электроэнергии, их достоинства и недостатки и оценена на основе аналитического исследования возможность их применения для оценки значения тока в нулевом рабочем проводнике

Выявлено, что существующие коэффициенты некорректно использовать для оценки значения тока в нулевом рабочем проводнике, поскольку они не позволяют в полной мере выявить конкретные причины возникновения тока в нулевом рабочем проводнике, что иллюстрируется зависимостями (рис. 2-3).

Зависимости получены при математическом моделировании трехфазной четырехпроводной распределительной системы на основе известных соотношений для фазных токов, тока нулевого

рабочего проводника, их гармонических и симметричных составляющих для нагрузки мощностью до 200 КВА.

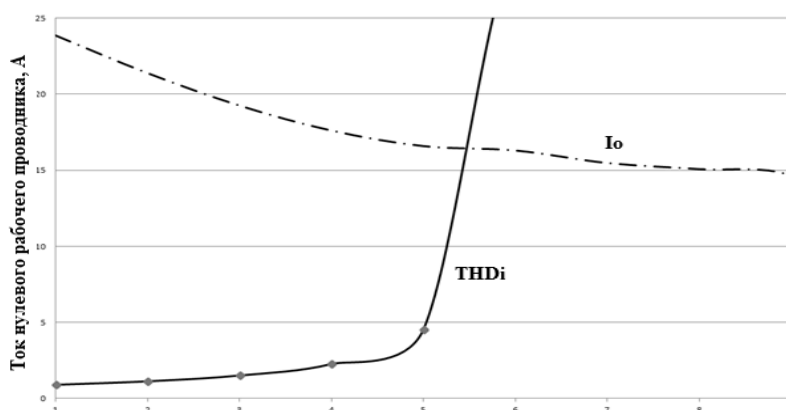


Рисунок 2 – Зависимости изменения коэффициентов несинусоидальности и тока нулевого рабочего проводника

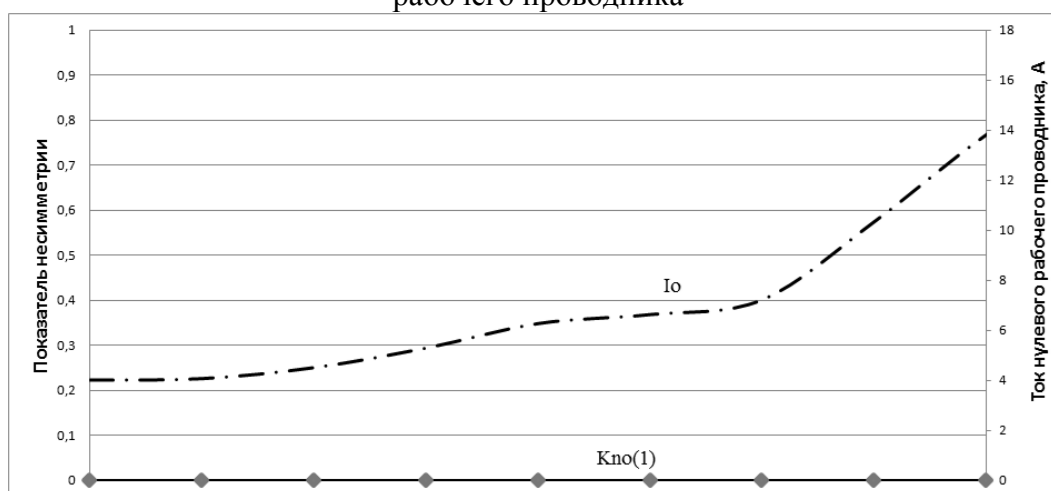


Рисунок 3 – Зависимости изменения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности и тока нулевого рабочего проводника

Из анализа зависимостей, приведенных на рисунках 2 и 3, следует, что существующие коэффициенты показатели качества электроэнергии не позволяют оценить значение тока нулевого рабочего проводника во всем диапазоне его возможного изменения, т.к. суммарный коэффициент гармонических составляющих тока нулевого рабочего проводника принимает значение ∞ при отсутствии основной гармоники в его составе, а коэффициент фазных токов по нулевой последовательности не изменяется при несимметрии высших гармонических составляющих фазных токов.

На основе анализа существующих нормируемых коэффициентов для оценки значения тока в нулевом рабочем проводнике и в результате применения эвристического метода предложено использование дополнительных, вновь введенных, ненормируемых показателей качества электроэнергии, таких как:

1. Показатель, определяющий влияние несимметрии фазных токов на ток нулевого рабочего проводника (далее – показатель несимметрии):

$$K_A = \frac{\sqrt{I_{0(1)}^2 + I_{0(2)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_{(0)}}, \quad (1)$$

где $n=1,2,4,5,\dots$, кроме $n=3(2k+1)$, где $k=0,1,2,\dots$, т.е. кроме токов гармоник, кратных трем, $I_{0(n)}$ - гармоническая составляющая n-ной гармоники, $I_{(0)}$ - ток нулевого рабочего проводника.

Значения этого коэффициента могут изменяться от 0 до 1:

0 – при отсутствии несимметрии фазных токов; 1 – при отсутствии фазных токов гармоник, кратных трем.

Учет токов гармоник, кратных трем, в этом показателе не производится, поскольку при несимметрии фазных токов гармоник, кратных трем, их результирующая составляющая в токе нулевого рабочего проводника может изменяться только в сторону уменьшения. Тогда как для первой и остальных высших гармоник в результате несимметрии их результирующая составляющая в токе нулевого рабочего проводника может только увеличиваться.

2. Показатель, определяющий влияние фазных токов гармоник, кратных трем, на ток нулевого рабочего проводника (далее – показатель несинусоидальности):

$$K_B = \frac{\sqrt{I_{0(3)}^2 + I_{0(9)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_{(0)}}, \quad (2)$$

где $n=3(2k+1)$, $k=0,1,2,\dots$

Значения этого коэффициента могут изменяться от 0 до 1:

0 – при отсутствии фазных токов гармоник, кратных трем, либо при сокращении всех токов гармоник, кратных трем, из-за несимметрии; 1 – при отсутствии несимметрии фазных токов.

В этом показателе учитываются только фазные токи гармоник, кратных трем, поскольку при отсутствии несимметрии фазных токов в составе тока нулевого рабочего проводника будут присутствовать только токи гармоник, кратных трем, причем их результирующая составляющая будет максимальной.

Для подтверждения разработанного подхода к определению влияния взаимосвязи факторов на ток в нулевом рабочем проводнике проведено экспериментальное исследование на реальном объекте, сняты графики тока и напряжения в трехфазной четырехпроводной системе электроснабжения.

В качестве наиболее яркого представителя нелинейной и несимметричной нагрузки по току выбран компьютерный томограф (КТ), графики фазных токов и тока нулевого рабочего проводника которого приведены на рисунке 4.

С помощью стандартной программы MATLAB произведено разложение кривых тока в ряд Фурье, на основе чего были получены их спектры.

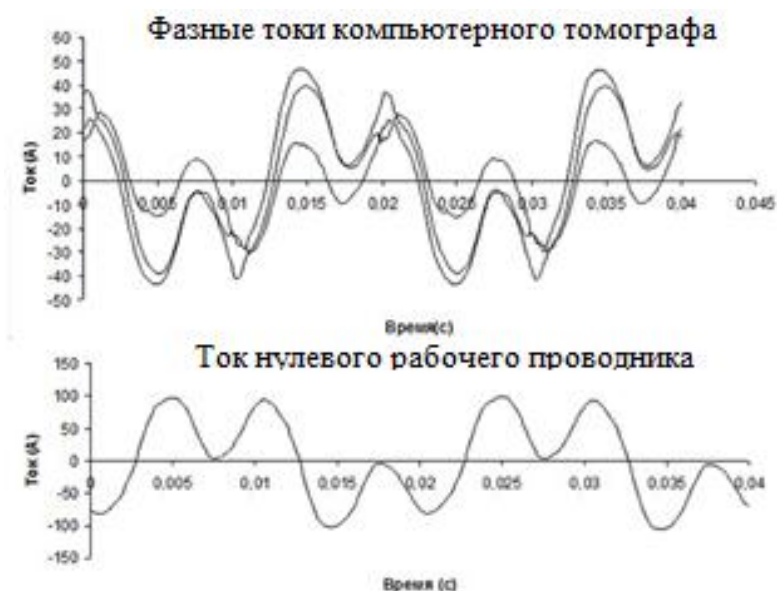


Рисунок 4 - Кривые тока КТ

Из анализа спектров кривых на рисунке 4 выявлено, что:

- фазные токи КТ содержат 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 гармоники. Из высших гармоник наиболее выражена третья;

- ток в нулевом рабочем проводнике КТ содержит также 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 гармоники, причем их значение выше, чем в фазных токах, что объясняется ярко выраженной несимметричной нагрузкой (рис. 4);

- показатель несимметрии составил – 0,77, показатель несинусоидальности – 0,64.

Проведен анализ взаимовлияния показателей несимметрии и несинусоидальности на ток нулевого рабочего проводника.

Из анализа зависимостей, приведенных на рисунке 5 можно сделать вывод, что существует такая точка их пересечения, по одну сторону от которой эффективно применение устройств компенсации несимметрии, а по другую – устройств компенсации несинусоидальности.

Поскольку:

$$\sqrt{K_A^2 + K_B^2} = \frac{\sqrt{I_{0(1)}^2 + I_{0(2)}^2 + \dots + I_{0(n)}^2}}{I_{(0)}} = 1, \quad (3)$$

где $n=1,2,3,4,5\dots$, то эта точка составляет значение $K_{крит} = \sqrt{0,5} = 0,707$, что подтверждается графиками на рисунке 5.

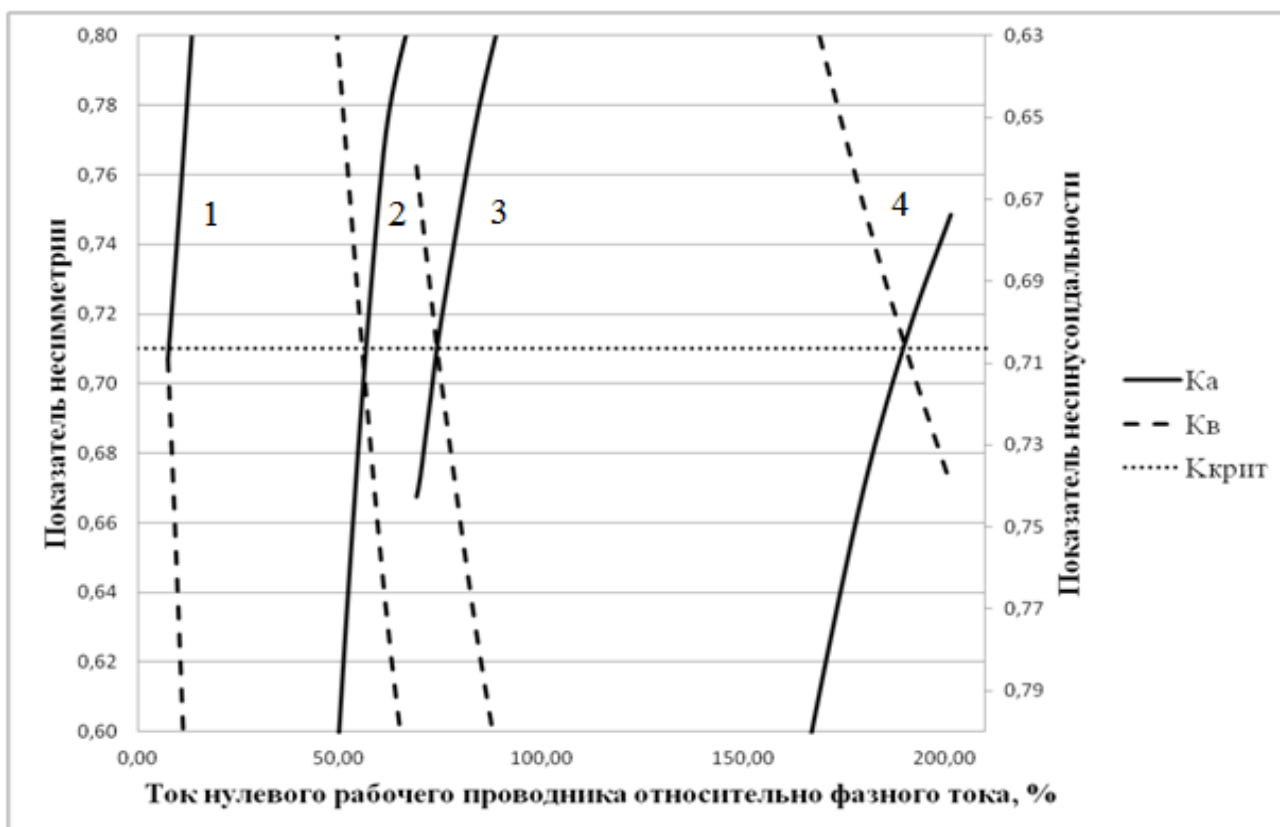


Рисунок 5 - Ток нулевого рабочего проводника в зависимости от показателей несинусоидальности и несимметрии

Кроме того из анализа зависимостей выявлено, что:

1. Если расчетный показатель несимметрии K_A выше значения $K_{крит}$, то основной вклад в величину тока нулевого рабочего проводника вносит несимметрия фазной нагрузки;
2. Если расчетный показатель несинусоидальности K_B выше значения $K_{крит}$, то основной вклад в величину тока нулевого рабочего проводника вносит нелинейность фазной нагрузки;
3. Если расчетные показатели несимметрии и несинусоидальности равны значению $K_{крит}$, то вклад несимметрии и нелинейности фазной нагрузки равнозначен:

А) если ток нулевого рабочего проводника не превышает максимально допустимый более чем в 2 раза, что очевидно обуславливается выражением $\sqrt{K_A^2 + K_B^2} = 1$ – вклад каждого из факторов равнозначен и не превышает максимально допустимого значения тока нулевого провода;

Б) если ток нулевого рабочего проводника превышает максимально допустимый более чем в 2 раза – вклад каждого из факторов равнозначен и превышает максимально допустимое значения тока в нулевом рабочем проводнике.

Стоит отметить, что определение основополагающего фактора возникновения тока в нулевом рабочем проводнике целесообразно только в тех случаях, когда ток нулевого рабочего проводника превышает максимально допустимое значения для существующего сечения кабеля.

Также при превышении максимально допустимого значения тока нулевого рабочего проводника в зависимости от значения показателей несимметрии и несинусоидальности в соответствии с полученными выводами выбирается тот или иной вид компенсации тока в нулевом рабочем проводнике:

- для случая «1»: компенсация несимметричной составляющей;
- для случая «2»: компенсация нелинейной составляющей;
- для случая «3А»: компенсация одной из составляющих;
- для случая «3Б»: компенсация обеих составляющих.

В третьей главе проведена оценка потерь мощности в кабеле, связанных с несимметрией и несинусоидальностью фазных нагрузок. Оценка необходима, так как возникла ситуация, когда потери в нулевом рабочем проводнике из-за несимметрии и нелинейности нагрузки могут быть сопоставимы с потерями в фазном проводе и даже превышать их. В связи с чем может быть необходима объективная корректировка повышающих коэффициентов, применяемых при оплате электроэнергии.

В работе предложен метод расчета, учитывающий влияние обоих факторов на потери активной мощности:

1. Потери активной мощности в фазах А, В, С:

$$\Delta P_{(A,B,C)} = r_{оф} l_{(A,B,C)} \sum_{V=2}^n I_{V(A,B,C)}^2 (k_{ПV} + k_{бвф}), \quad (4)$$

где $k_{ПV} = 0,021\sqrt{f}$ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта;

$k_{бвф} = \frac{1,18 + k_{ПV}}{0,27 + k_{ПV}} \left(\frac{d_{ф}}{a}\right)^2$ – коэффициент, учитывающий эффект близости фазных проводников в линии электропередачи; $r_{оф}$ – удельное сопротивление фазного проводника постоянному току (с учетом температуры), Ом/м; $l_{(A,B,C)}$ – длина участка цепи фазы А, В, С, м; f – частота v -той гармоники, Гц; $d_{ф}$ – диаметр жилы фазного проводника, мм; a – среднее расстояние между центрами жил, мм; $I_{V(A,B,C)}$ – ток v -той гармоники фаз А, В, С.

2. Потери активной мощности в нулевом рабочем проводнике:

$$\Delta P_0 = r_{он} l_0 \sum_{V=2}^n I_{V0}^2 (k_{ПV} + k_{бv0}), \quad (5)$$

где $k_{бv0} = \frac{1,18 + k_{ПV}}{0,27 + k_{ПV}} \left(\frac{d_0}{a}\right)^2$ – коэффициент, учитывающий эффект близости фазных проводников в линии электропередачи; $r_{он}$ – удельное сопротивление нулевого рабочего проводника постоянному току (с учетом температуры), Ом/м; l_0 – длина участка цепи нулевого рабочего проводника, м; d_0 – диаметр жилы нулевого рабочего проводника, мм; I_{V0} – ток v -той гармоники нулевого рабочего проводника.

Тогда суммарные потери активной мощности в трехфазной сети с нелинейной и несимметричной нагрузкой можно определить по выражению:

$$\Delta P_{\Sigma V} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_0. \quad (6)$$

Для подтверждения разработанного метода расчета потерь был проведен лабораторный эксперимент, направленный на определение добавочных коэффициентов при изменении частоты токов, протекающих в кабеле, а также на определение потерь в нулевом рабочем проводнике, обусловленных несимметрией и нелинейности нагрузки.

Экспериментальная установка включала в себя четырехжильный кабель, трехфазный программируемый источник переменного тока и напряжения «Энергоформа 3.3», а также однофазный анализатор качества электроэнергии Fluke 43.

Данные по полученным добавочным коэффициентам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
кэксп	1,03	1,02	1,04	1,02	1,03	1,04	1,04	1,06	1,08	1,07
красч	1,00	1	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08
Номер гармоники	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
кэксп	1,07	1,13	1,10	1,12	1,17	1,13	1,14	1,18	1,19	
красч	1,09	1,1	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,19	

Данные таблицы 1 проиллюстрированы графиком зависимости поправочного коэффициента от номера гармоники, приведенного на рисунке 6.

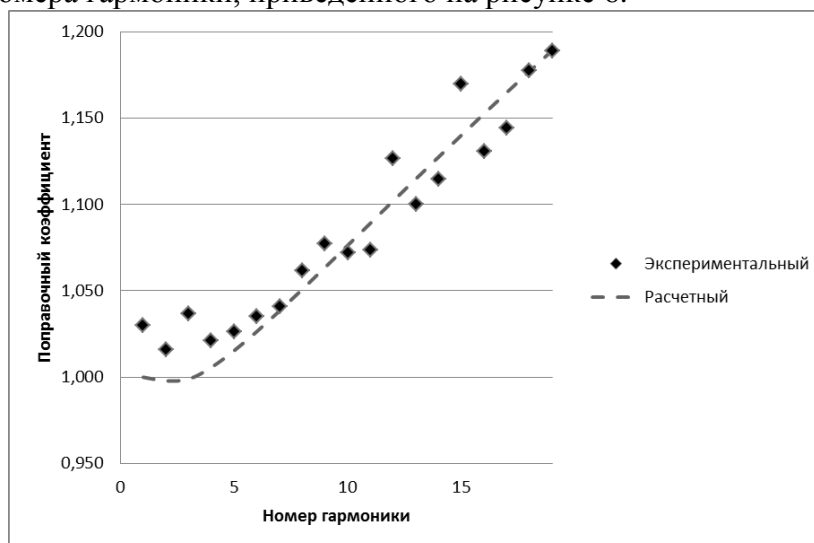


Рисунок 6 – График зависимости поправочного коэффициента от номера гармоники

Эксперимент подтвердил предположение о том, что потери мощности в кабеле увеличиваются при нарастании степени как несимметрии, так и несинусоидальности нагрузки.

В четвертой главе описан алгоритм эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети, позволяющий определить основополагающий фактор возникновения тока в нулевом рабочем проводнике по полученным взаимозависимостям показателей несимметрии и несинусоидальности, а также микропроцессорное техническое средство, созданное на его основе.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунках 7-8.

Применение алгоритма позволяет выявить определяющий фактор возникновения тока в нулевом рабочем проводнике сечением от 2.5 до 35 мм² без анализа спектрального состава фазных токов, что позволяет снизить объем используемых данных, а также значительно сократить промежуточные математические вычисления.

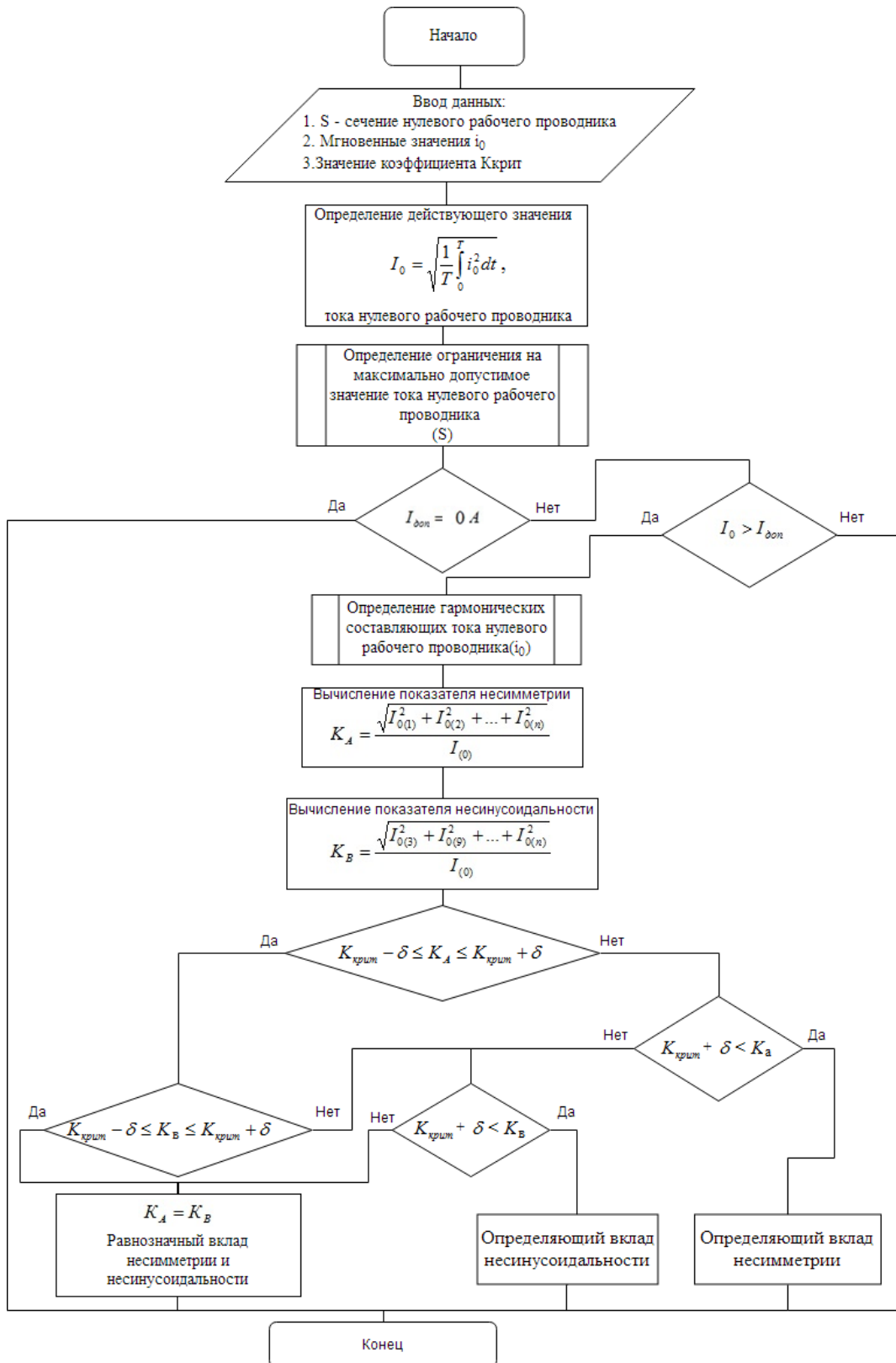


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети

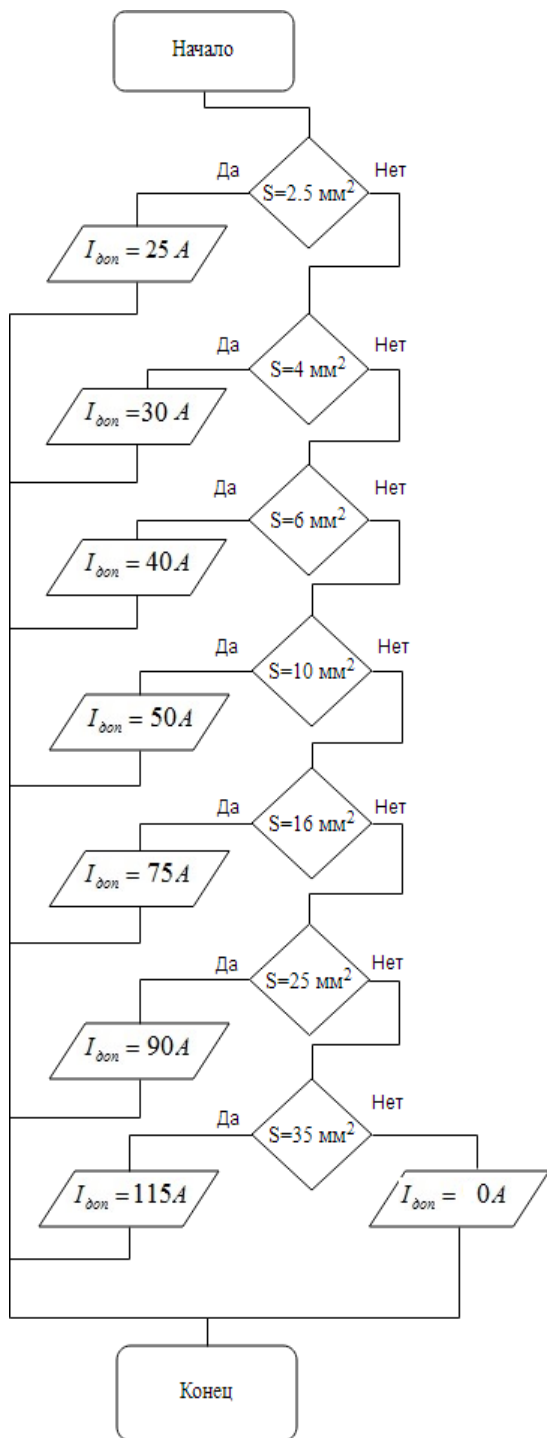


Рисунок 8 – Блок-схемы процедур а) «Определение ограничения на максимально допустимое значение тока нулевого рабочего проводника»; б) «Определение гармонических составляющих тока нулевого рабочего проводника»

Для подтверждения работоспособности разработанного алгоритма было создано техническое микропроцессорное устройство и проведено экспериментальное моделирование его работы.

Экспериментальное тестирование устройства показало эффективность применения разработанного алгоритма при решении задач снижения тока в нулевом рабочем проводнике до допустимых пределов.

Моделирование устройства производилось в системе Proteus Design Suite. Прошивка микропроцессора осуществляется на языке программирования C++ с помощью интегрированной среды разработки программного обеспечения для микроконтроллеров CodeVision AVR.

Схема устройства приведена на рисунке 9. Устройство состоит из микропроцессора Atmega 32, 12-ти сегментного переключателя, позволяющего выбрать режим работы устройства в зависимости от сечения нулевого рабочего проводника, 7-ми разрядного двоичного шифратора и черно-белого LCD-дисплея.

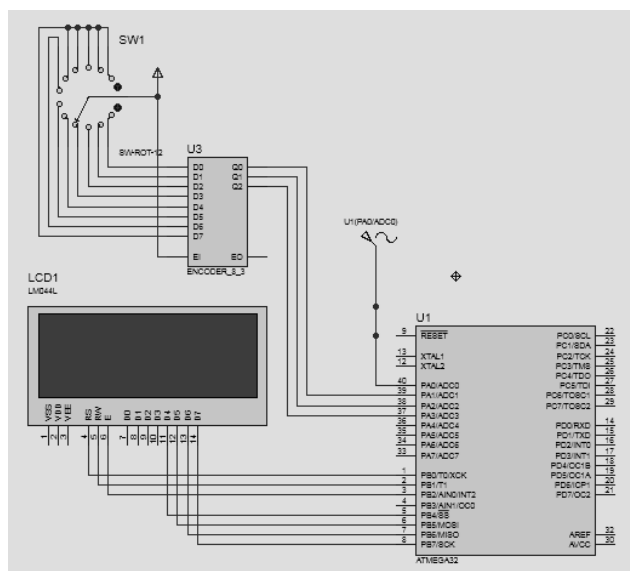


Рисунок 9 – Микропроцессорное техническое устройство

В устройстве существует 8 режимов работы – режим «Стоп» и режимы, зависящие от используемого сечения нулевого рабочего проводника.

Режимы работы устройства выбираются с помощью 12-ти сегментного переключателя, положение которого считывается 7-ми разрядным двоичным шифратором.

Работа устройства осуществляется следующим образом: информация о токе нулевого рабочего проводника поступает на вход микропроцессора с датчика тока в виде сигнала напряжения амплитудой до 5 В, в котором 1 мВ напряжения соответствует 100 мА тока нулевого рабочего проводника.

Затем этот сигнал с помощью встроенного 8-и канального, 10-и битного АЦП из аналогового вида преобразуется в цифровой и значения тока за период (0.02 с при частоте сети в 50 Гц) записываются в массив данных, над которыми уже и производятся все дальнейшие преобразования.

За один период (0.02 с) в массив записывается 64 мгновенных значения тока нулевого рабочего проводника.

Полученная кривая тока раскладывается на гармоники с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, после чего, в соответствии с разработанным критерием, вычисляются необходимые показатели несимметрии и несинусоидальности и формируются рекомендации по снижению тока нулевого рабочего проводника до допустимых пределов.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

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

2. Предложено и обосновано введение двух новых ненормируемых коэффициентов: показателя по несимметрии K_A и несинусоидальности K_B – позволяющих определить вклад того или иного фактора возникновения тока в нулевом рабочем проводнике на величину этого тока;

3. Выявлены зависимости ненормируемых показателей несимметрии и несинусоидальности тока нулевого рабочего проводника и получены следующие выводы:

1. Если расчетный показатель несимметрии K_A выше значения $K_{крит}$, то основной вклад в величину тока нулевого рабочего проводника вносит несимметрия фазной нагрузки;

2. Если расчетный показатель несинусоидальности K_B выше значения $K_{крит}$, то основной вклад в величину тока нулевого рабочего проводника вносит нелинейность фазной нагрузки;

3. Если расчетные показатели несимметрии и несинусоидальности равны значению $K_{крит}$, то вклад несимметрии и нелинейности фазной нагрузки равнозначен:

А) если ток нулевого рабочего проводника не превышает максимально допустимый более чем в 2 раза, что очевидно обуславливается выражением $\sqrt{K_A^2 + K_B^2} = 1$ – вклад каждого из факторов равнозначен и не превышает максимально допустимого значения тока нулевого провода;

Б) если ток нулевого рабочего проводника превышает максимально допустимый более чем в 2 раза – вклад каждого из факторов равнозначен и превышает максимально допустимое значение тока в нулевом рабочем проводнике.

4. Предложен метод расчета потерь мощности в кабеле, учитывающий как потери в фазных проводах, так и в нулевом рабочем проводнике с учетом влияния токов высших гармоник, подтвержденный проведенным лабораторным экспериментом. Метод позволяет оценить потери как от нелинейной, так и от несимметричной нагрузки в их взаимосвязи. По сравнению с существующими методами предложенный позволяет оценить добавочные потери не только от нелинейной нагрузки, но и от несинусоидальной в их совокупности с учетом потерь в нулевом рабочем проводнике из-за возникающего в нем тока. Отклонение потерь мощности в кабеле, рассчитанных по рассмотренным методам от предложенного составило $\Delta P_1 = 13.68\%$, $\Delta P_2 = 11.5\%$, однако согласно ГОСТ Р МЭК 62301-2011 «Приборы бытовые электрические. Измерение потребляемой мощности в режиме ожидания»: «Мощность 0,5 Вт и выше можно измерять с погрешностью, меньшей или равной 2%...», что ставит вопрос о достоверности рассмотренных методов;

5. Разработан алгоритм эффективного применения ненормируемых показателей качества электроэнергии для анализа режимов четырехпроводной распределительной сети по выявленным зависимостям. Кроме того на его основе создано микропроцессорное техническое устройств, за счет применения которого возможно достичь снижения аварийности в электроснабжении, вызванной превышением допустимого значения тока нулевого рабочего проводника, путем возможного своевременного принятия мер по ее устранению.

6. Результаты диссертационной работы приняты к внедрению в производственный процесс ОАО «Фортекс» при проектировании и изготовлении электронных модулей для трехфазных активно-реактивных счетчиков электроэнергии.

Кроме того результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» – модель технического микропроцессорного устройства используется в практических работах при обучении студентов групп по профилю «Промышленная электроника», что подтверждено соответствующими документами.

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. Оценка добавочных потерь мощности в сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / Я.Э. Шклярский, А.А. Белицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. - №7. – С. 86-93.

Публикации в изданиях, входящих в Scopus:

4. Belitskiy, A.A. The compensation criterion of overload neutral wire current in low voltage electrical networks / A.A. Belitskiy, Y.E. Shklyarskiy, A.Y. Shklyarskiy / Proceedings of the 2017 IEEE Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, ELCONRUS 2017, 2017, pp. 1012-1015.

5. Belitskiy, A.A. The question of compensation overload neutral wire current in low voltage electrical networks / A.A. Belitskiy, I.N. Voytyuk / Proceedings of the 2017 IEEE Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, ELCONRUS 2017, 2017, pp. 779-783.

6. Belitskiy, A.A. Nonlinear and unbalanced load as a basic factor of a neutral conductor current / A.A. Belitskiy, O.V. Denisova, I.I. Rastvorova / Proceedings of the 2018 IEEE Russia section young researchers in electrical and electronic engineering conference, ELCONRUS 2018, 2018, pp. 570-571.

Прочие издания:

7. Белицкий, А.А. Перегрузка нулевого провода в низковольтных электрических сетях / А.А. Белицкий // 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.).

8. Белицкий, А.А. Влияние несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения / А.А. Белицкий // 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.).

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

10. Белицкий, А.А. Несинусоидальные токи и токи несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения / А.А. Белицкий // 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/Belitskii.pdf> (дата обращения 10.03.2017 г.).