

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»
КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 621.314.21(043)

На правах рукописи

МОРОЗ Виталий Александрович

**Автоматизация расчета потерь мощности трансформаторов 6-10/0,4 кВ
при питании нелинейной нагрузки**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени
магистра технических наук
по специальности 1-43 80 01 «Энергетика»

Научный руководитель:
к.т.н., доцент
Алферова Т.В.

Нормоконтролер:
к.т.н., доцент
Алферова Т.В.

Гомель, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

стр.

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	6
1.1 ПОТЕРИ В СЕТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	6
1.2 АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК.....	9
ГЛАВА 2 ПОМЕХОГЕНЕРИРУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПОДКЛЮЧАЕМОЕ К ОБМОТКЕ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА, И ЕГО ВКЛАД В ИСКАЖЕНИЕ КРИВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА	12
2.1 СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.....	12
2.2 ДУГОВЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ.....	13
2.3 СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	14
2.4 ЧАСТОТНЫЙ ПРИВОД.....	15
2.5 ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ.....	16
2.6 КОМПАКТНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ.....	17
2.7 БЫТОВЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ.....	18
ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ N-ЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ 6-10 КВ	20
3.1 СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ.....	20
3.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ N-ЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ 6-10 КВ.....	20
ГЛАВА 4 АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6/10-0,4 КВ ПРИ ПИТАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК	26
4.1 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	26
4.2 ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	29
ГЛАВА 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	38
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	39

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим количественным показателем технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации является величина потерь электроэнергии и тенденции ее изменения. Передача электрической энергии в идеальной энергосистеме должна происходить при нормальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. Но в реальных энергосистемах подобные условия выполняются редко.

Проблемы отклонений напряжения и частоты, а также способов управления ими являются предметами традиционного анализа режимов энергетических систем.

Питание промышленных предприятий и административно-бытовых зданий, имеющих нелинейную нагрузку, вызывает появление гармонических составляющих тока и напряжения и, как следствие, искажение формы напряжения. В последние десятилетия данная проблема приобрела особую значимость. Это вызвано высокими темпами внедрения прогрессивных технологических процессов и систем, и как следствие, непрерывным ростом числа мощности нелинейных, несимметричных потребителей электроэнергии. Влияние несинусоидальности напряжений и токов приводит с одной стороны, к увеличению потерь напряжения и мощности в сетях, уменьшению их пропускной способности, а с другой – к нарушению нормальной работы и уменьшению срока службы электрооборудования, снижению производительности труда, а также количества и качества выпускаемой продукции. Например, известно, что при допустимых значениях несимметрии напряжения 2% и несинусоидальности 5% срок службы асинхронных двигателей сокращается на 21 %, синхронных – на 32%, трансформаторов – на 8 %, кабельных линий – на 40% [3].

В настоящее время рост установленной мощности нелинейных нагрузок даже в развитых странах опережает внедрение мероприятий по минимизации генерируемых ими электромагнитных помех. И при превышении мощности нелинейных электропотребителей на 10-15% от суммарной мощности следует ожидать появления различных проблем в эксплуатации, а также последствий, причины которых не являются очевидными.

По данным центра электромагнитной безопасности [2], исследовавшего в России состояние электрических сетей крупнейших зданий, последние подвергаются интенсивному воздействию высших гармоник тока и напряжения. Очевидно, что схожая проблема существует и в Республике Беларусь.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Разработка программного комплекса для расчета потерь мощности и энергии в трансформаторах 6-10/0,4 кВ при питании нелинейной нагрузки и снижение временных затрат для выполнения расчета в проектных организациях.

Цель и задачи исследования

Цель работы: Автоматизация расчета потерь активной мощности и электрической энергии, вызванных несинусоидальными режимами, при питании нелинейной нагрузки трансформаторами 6-10кВ, получение спектров высших гармоник на различных подстанциях г. Гомеля и определение процента дополнительных потерь от несинусоидальности кривой напряжения.

В ходе работы над диссертацией были решены следующие задачи:

- проведен обзор существующих направлений по теме диссертации;
- получены спектры высших гармоник на четырёх подстанциях г. Гомеля с трансформаторами ТМГ11-1000-10/0,4 и ТМ-1000-10/0,4;
- проведена математическая обработка полученных результатов при помощи персонального компьютера;
- определена величина дополнительных потерь активной мощности и энергии в натуральном выражении;
- для автоматизации расчета потерь мощности и энергии написано программное обеспечение.

Объектом исследования диссертационной работы являются силовые трансформаторы 6-10/0,4 кВ.

Предметом исследования диссертационной работы является:

- определение влияния коэффициентов n-ых гармонических составляющих напряжения на величину дополнительных потерь активной мощности в силовом трансформаторе.

Положения, выносимые на защиту

Результаты проведенных экспериментов о влиянии коэффициентов n-ых гармонических составляющих на потери активной мощности в трансформаторах. Разработанная программа по расчету потерь мощности и энергии в трансформаторах 6-10 кВ при питании нелинейной нагрузки.

Личный вклад соискателя

Соискателем получены экспериментальные данные о дополнительных потерях электрической энергии при несинусоидальности кривой напряжения. Разработаны структура и алгоритм программы для среды Delphi для расчета

потерь мощности и энергии в трансформаторах 6-10/0,4 кВ при питании нелинейной нагрузки, предназначенной для автоматического расчета потерь мощности и снижения временных затрат при проектировании или в процессе эксплуатации подстанций, а также исключения человеческого фактора (ошибок).

Апробация результатов диссертации

Результаты проделанной работы были доложены:

– на XVI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления».

Опубликованность результатов диссертации

Достигнутые научные результаты были опубликованы в виде тезисов в объеме менее одного авторского листа. Имеется одна публикация результатов научной деятельности в сборнике материалов XVI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. – Гомель ГГТУ им. П. О. Сухого 2016 г.

Структура и объем диссертации

Диссертационное исследование включает в себя введение, пять глав основного текста, заключение и библиографический список. Полный объем работы – 40 страница, включая 16 рисунков. Библиографический список насчитывает 15 наименований. Список публикаций соискателя содержит 1 наименование.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.1 Потери в сети, обусловленные низким качеством электроэнергии

Всякое ухудшение качества электроэнергии влечет за собой ее перерасход. Такое положение справедливо и для тех случаев, когда это ухудшение лежит в пределах нормы и соответствует [13]. При перерасчетах, связанных с проектированием и эксплуатацией СЭС, не учитывают потери, возникающие в устройствах, применяемых для поддержания напряжения на допустимом уровне.

Проблема несинусоидальности – проблема высших гармоник возникла в последнее время в связи с применением мощных электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, таких, как электросварка, дуговые сталеплавильные печи, неуправляемые и, особенно, управляемые вентильные преобразователи. В настоящее время проблема высших гармоник является одной из важных частей общей проблемы электромагнитной совместимости приемников электроэнергии с питающей электрической сетью.

Несинусоидальный ток в сопротивлениях питающей сети создает несинусоидальные падения напряжения так, что даже при синусоидальной ЭДС источника энергии в сети с выпрямительной нагрузкой имеют место несинусоидальные токи и напряжения. Таким образом, нагрузка потребляет из питающей сети искаженный ток, в состав которого входят гармоники, с частотами, превышающими основную частоту. Падения напряжения, обусловленные этими токами, вызывают искажение кривой напряжения питания, что ведет к дополнительным потерям передаваемой мощности, может нарушить работу других приемников, создает опасность возникновения резонанса и перегрузку цепей, содержащих емкости. Поэтому выпрямительную нагрузку можно рассматривать как генератор высших гармонических напряжения.

Высшие гармоники оказывают отрицательное влияние на технологический процесс и режим работы электролизеров. Наличие пульсирующего напряжения с большим содержанием высших гармоник способствует увеличению обратимых восстановительных процессов в электролите, влияет на подвижность ионов, перенос заряда и, следовательно, приводит к снижению коэффициента полезного действия электролизных установок, ухудшению качества продукции.

При прохождении токов высших гармоник по элементам системы электроснабжения возникают дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Наибольшие дополнительные потери активной мощности имеют место в трансформаторах, двигателях и генераторах. В ряде случаев эти потери

могут привести к недопустимому перегреву обмоток электрических машин и во всех случаях приводят к дополнительным потерям электрической энергии.

При наличии гармоник в кривой напряжения процесс старения изоляции протекает более интенсивно, что объясняется ускорением при высоких частотах электрического поля физико-химических процессов в диэлектриках, обуславливающих их старение.

Высшие гармоники тока и напряжения влияют на погрешности электроизмерительных приборов. В практике эксплуатации существенное значение имеет увеличение погрешностей индукционных счетчиков активной и реактивной энергии. Значения этих погрешностей существенно отражаются при учете потребления электрической энергии.

Наличие высших гармоник затрудняет и в ряде случаев делает невозможным использование силовых цепей в качестве каналов для передачи информации. Высшие гармоники ухудшают работу телемеханических устройств, вызывают сбои в их работе, если силовые цепи используются в качестве каналов связи.

Ограничение несинусоидальности напряжения с наибольшей эффективностью может быть достигнуто на стадии проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий, но требует дополнительных затрат. Поэтому такое ограничение является технико-экономической проблемой, которую нельзя решать в отрыве от задачи компенсации реактивной мощности [14].

Поддержание у всех электроустановок оптимальных качественных показателей электрической энергии обеспечит минимальное потребление электрической энергии данными электроустановками. Однако реализация вышеуказанного положения требует неоправданно больших затрат, так как подразумевает наличие более дорогих электрических сетей, очень большое число специальных регулирующих устройств и другой аппаратуры, поэтому приходится допускать отклонения от оптимальных значений качественных показателей электрической энергии для данной установки. Следует отметить, чем больше допускаемые отклонения показателей качества электрической энергии, тем меньше затраты в энергосистеме на их обеспечение, но тем больше потери электрической энергии в электроустановках, следовательно, оптимальные значения отклонения соответствуют минимуму суммарных затрат. Определение структуры потерь электрической энергии при отклонении напряжения от оптимального и номинального значений, выявленное в процессе обработки результатов инструментального обследования системы электроснабжения, является весьма актуальным.

Структура потерь электроэнергии, вызванных ее низким качеством, приведена на рисунке 1.1



Рисунок 1.1 – Структура потерь электроэнергии в системах электро-снабжения, вызванных низким качеством электроэнергии

Гармоники высшего порядка вносят ощутимый вклад в ухудшение параметров энергосети предприятия путем генерации паразитной мощности в сеть. Данная мощность не потребляется нагрузкой и стремится к источнику (трансформатору).

Вихревые токи, индуцируемые в проводнике, препятствуют равномерному распределению плотности тока по поперечному сечению проводника – плотность тока на оси провода оказывается меньше, чем у его поверхности. Ток более высокой частоты как бы вытесняется на поверхность провода, при этом вихревые токи по оси проводника текут против направления основного тока, а на поверхности – в том же направлении.

Skin – эффект обусловлен тем, что при распространении электромагнитной волны в проводящей среде возникают вихревые токи, в результате чего часть электромагнитной энергии преобразуется в теплоту.

Это приводит к увеличению напряженностей электрического и магнитного полей и плотности тока на поверхности проводника.

Skin – эффект часто имеет нежелательные последствия:

– в проводах и кабельных линиях переменный ток протекает главным образом по поверхностному слою, т.е. сечение провода не используется полностью, сопротивление провода и потери мощности в нем при данном токе возрастают;

– в ферромагнитных пластинах или лентах магнитопроводов трансформаторов, электрических машин и других устройств вследствие этого ухудшается использование сечения магнитопровода, возрастают намагничивающий ток и потери в стали.

Для более эффективного энергоснабжения с учетом данной паразитной мощности приходится увеличивать сечения кабельных линий, мощности трансформаторов.

1.2 Анализ составляющих потерь активной мощности в трансформаторах от высших гармоник

При протекании электрического тока через любое электротехническое устройство в последнем возникают потери активной мощности. Все потери в трансформаторе можно разделить на условно-постоянные (потери холостого хода), возникающие из-за перемагничивания стали сердечника, и условно-переменные (нагрузочные потери) [13]. Сумма этих двух составляющих определяет общие потери в трансформаторе.

Условно-постоянные потери (P_{xx}) измеряются при проведении опыта холостого хода. В режиме холостого хода потребляемая трансформатором активная мощность идет на покрытие потерь в стали магнитопровода и представляется суммой двух составляющих: потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов.

Нагрузочные потери ($P_{нагр}$) определяются из опыта короткого замыкания и разделяются на основные потери ($P_{осн}$), их иногда еще называют омические потери, в обмотках трансформатора и добавочные потери от действия полей рассеяния ($P_{доп}$).

Потери от полей рассеяния могут быть определены как потери из-за рассеяния электромагнитного потока в обмотках, стенках бака, прессующих кольцах, ярмовых балках, нажимных и стяжных пластинах, бандажах и экранах.

В свою очередь, потери от полей рассеяния разделяют на потери в проводнике обмоток ($P_{обм}$) и потери рассеяния в других частях трансформатора, кроме обмотки.

Потери от рассеяния в обмотках включают потери на вихревые токи и потери из-за циркуляции токов [7]. Токи, замыкающиеся внутри отдельных проводов, называются вихревыми, а замыкающиеся между параллельными 100С10вями обмоток – циркулирующими.

Добавочные потери в обмотках от вихревых и циркулирующих токов неодинаково распределены по обмоткам трансформатора, так как вызывающее их магнитное поле рассеяния обмоток для различных проводников обмотки имеет разное значение. Наиболее сильно оно вблизи канала между обмотками. Следовательно, в этой зоне наибольшая индукция поля рассеяния вызовет наибольшие добавочные потери. С отдалением от канала рассеяния добавочные потери в обмотке уменьшаются.

Добавочные потери в баке, прессующих балках и т.д. зависят от распределения и интенсивности поля рассеяния, от удаленности, размеров и формы ферромагнитных деталей и их магнитных свойств. Их расчет является достаточно сложной задачей. Для решения ее используют разные методы, основанные на допущениях, однако даже эти методы с применением для расчета вычислительной техники дают расхождения в результатах [7].

Для удобства восприятия изложенного материала в дальнейшем представим упомянутые выше потери активной мощности в графическом виде с помощью диаграммы (рисунок 1.2)

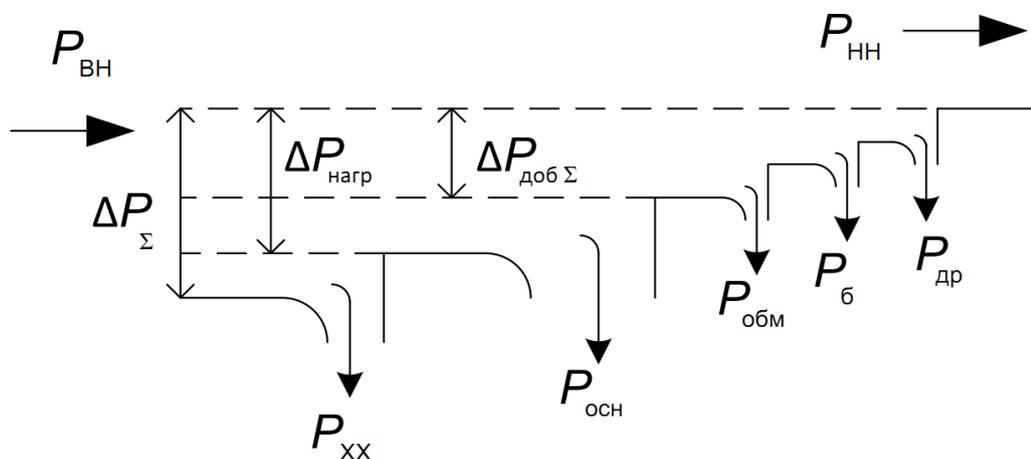


Рисунок 1.2 – Диаграмма распределения потерь активной мощности в трансформаторе

($P_{ВН}$ – суммарная мощность на стороне высокого напряжения; $P_{НН}$ – 100С10марная мощность на стороне низкого напряжения; $P_{ХХ}$ – потери холостого хода; $P_{нагр}$ – нагрузочные потери (потери короткого замыкания); $P_{осн}$ – основные (омические) потери; $P_{доб}$ – дополнительные потери от действия полей рассеяния; $P_{обм}$ – потери от вихревых и циркулирующих токов в обмотках, вызванные действием полей рассеяния; $P_{б}$ – потери в баке трансформатора; $P_{др}$ –

потери от вихревых токов в других частях трансформатора (кроме обмоток и бака), вызванные действием полей рассеяния)

Обмотки трехфазного стержневого трансформатора представляют неодинаковые условия для протекания токов разных гармоник. Токи гармоник, не кратных трем, могут свободно протекать по обмотке при любой схеме их соединения. Гармоники тока, кратные трем, образуя токи нулевой последовательности без угла сдвига по фазам, имеют свои особенности. При соединении обмоток в треугольник эти токи замыкаются в нем, так как схема треугольник для них является короткозамкнутым контуром. При схеме соединения «звезда» токи гармоник, кратным трем, могут протекать только при наличии нейтрального проводника. Магнитные потоки разных гармоник как и токи являются потоками прямой, обратной и нулевой последовательности.

Потоки прямой и обратной последовательностей свободно замыкаются по стали магнитопровода, в отличие от потоков гармоник, кратных трем. Они вынуждены замыкаться по маслу или другой немагнитной среде, т.е. по пути с очень большим магнитным сопротивлением. Из-за этого величина магнитного потока будет мала при любой схеме соединения обмоток и не может вызвать значительных потерь от вихревых токов в стенках бака и других проводящих конструкциях. [7, 8]

Основные потери

Высшие гармоники тока увеличивают среднеквадратическое значение тока нагрузки, что влечет за собой пропорциональное увеличение основных потерь в обмотке. Кроме того, при увеличении значения среднеквадратического тока увеличивается средняя температура обмотки, что влечет за собой изменение активного сопротивления. Средняя температура обмотки, к которой приводятся основные потери, равна 75 °С.

Добавочные потери от вихревых токов в обмотках

Потери от вихревых токов ($P_{обм}$) по мнению многих исследователей [7, 9, 10] увеличиваются пропорционально квадрату тока нагрузки и приблизительно пропорциональны квадрату частоты.

Потери холостого хода

Потери на гистерезис при неизменной форме кривой и амплитуде индукции зависят от частоты, а потери на вихревые токи от квадрата частоты [7].

При представлении трансформатора Г-образной схемой замещения видно, что потери активной мощности в шунте намагничивания зависят от приложенного несинусоидального напряжения, а не от протекающего по обмоткам несинусоидального тока. Также ток намагничивания составляет для распределительных трансформаторов несколько процентов.

ГЛАВА 2 ПОМЕХОГЕНЕРИРУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ПОДКЛЮЧАЕМОЕ К ОБМОТКЕ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА, И ЕГО ВКЛАД В ИСКАЖЕНИЕ КРИВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

В связи с быстрым ростом применения устройств использующих в своей схеме тиристоры, которые часто генерируют в сеть гармоники, появилось достаточно большое количество возмущений в электросетях.

Эти возмущения приводят к систематическому недопроизводству, а то и сбоям производственного оборудования. К помехогенерирующему оборудованию относятся:

- промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители);
- преобразователи частоты для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока;
- источники бесперебойного питания;
- офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.);
- бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы).
- некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

2.1 Сварочные выпрямители

В промышленности широкое применение находят сварочные установки, в которых в качестве источника питания используются полупроводниковые выпрямители. Сварочные выпрямители коммутируются по трехфазной мостовой схеме с использованием неуправляемых вентилей либо управляемых – тиристоров.

В расчетах сварочная дуга учитывается в виде постоянной противо-ЭДС. Токи ВГ, генерируемые сварочными выпрямителями, различны для отдельных режимов работы сварочных установок. В зависимости от нагрузки сварочный выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме, может работать в одном из трех режимов коммутации:

- прерывистых токов при малых нагрузках, которому соответствует двухвентильная коммутация (А);
- смешанной двух- и трехвентильной коммутации при средних нагрузках (В);
- трехвентильной коммутации при больших нагрузках (С).

В кривых тока сварочных выпрямителей уровни 5-й и 7-й гармоник тока являются нестабильными; незначительные изменения условий горения дуги

могут вести к увеличению или уменьшению тока 5-й и 7-й гармоник в несколько раз. Также в полигармоническом сигнале имеются ВГ четных порядков и кратные трем; основной причиной их появления является разброс углов зажигания групп вентилях, который обусловлен разбросом и нестабильностью характеристик отдельных вентилях. Сказывается также возникающее при этом подмагничивание магнитопровода трансформатора постоянным магнитным током [1].

2.2 Дуговые электропечи

В системах электроснабжения предприятий электродуговые сталеплавильные печи (ЭДСП) рассматриваются как резкопеременные нагрузки, обуславливающие колебания напряжения в сети. На генерирование ВГ обычно обращают внимание в значительно меньшей мере, поскольку в сравнении с вентиляхными преобразователями (ВП) той же мощности уровни ВГ, генерируемых ЭДСП, оказываются в 3-4 раза меньше. Данное утверждение относится к периоду расплавления, в течение которого колебания и ВГ проявляются более интенсивно, чем в другие периоды плавки (окисление, рафинирование). Поэтому для практических целей важно знать уровни ВГ для стадии расплавления. В этот период кривые токов и противо-ЭДС дуг значительно искажены, искажения различны по фазам сети; токи ВГ образуют системы прямой и обратной последовательностей. Значение коэффициента несимметрии гармоник тока, как правило, возрастает с ростом n .

Наличие магнитной несимметрии между фазами сети обуславливает возрастание гармоник, кратных трем, до 13%, 5-й – до 11% и 11-й до – 4%.

Поскольку нелинейность дуги ЭДСП проявляется по-разному в зависимости от мощности печи, материалов электродов, состава и особенностей подготовки шихты, системы управления режимом горения дуг и многих других факторов, то прогнозирование уровней ВГ печи на основании чисто теоретических соображений весьма затруднено; корректность соответствующих результатов невысока. Поэтому для оценки ВГ тока рекомендуется пользоваться в качестве аналога результатами измерений, проведенных на действующих ЭДСП (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты измерений, проведенных на действующих ЭДСП

ДСП-5		ДСП-10		ДСП-25	
Плавка	Рафинирование	Плавка	Рафинирование	Плавка	Рафинирование
7	3,7	8	2	9,5	2
11,2	2,2	9,2	4	4,8	3

Продолжение таблицы 2.1

2,7	2,2	2	1,1	4,8	0,3
8,9	4,3	2,8	4,5	6	2,9
4,9	2,7	1,6	1,2	1,3	1,2
1,3	0,9	0,7	0,2	0,2	0,3

Дуговая нагрузка (дуговые печи и сварочные аппараты) приводит к появлению интергармок в питающей сети. Дуговые печи обычно не производят значительные интергармоники, кроме тех случаев, когда в результате резонанса происходит их усиление. Переходные процессы – источник интергармоник – практически всегда возникают в начале режима плавления (рисунок 1.3).

Сварочные аппараты производят непрерывные по спектру частот составляющие, для каждого режима свои. Длительность каждого процесса варьируется от одной до нескольких секунд в зависимости от типа сварочного аппарата [2].

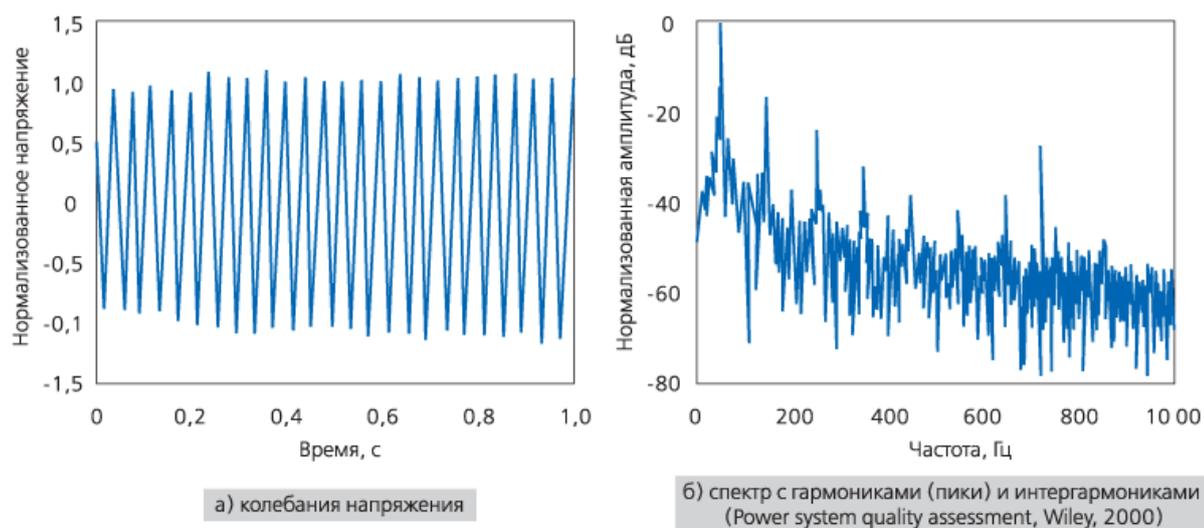


Рисунок 1.3 – Колебания и спектр гармоник в типичном процессе работы дуговой печи, измеренное на вторичной обмотке трансформатора

2.3 Силовые трансформаторы

Являются источниками ВГ намагничивающего тока. Вследствие несимметрии магнитопровода трехфазных трехстержневых трансформаторов действующие значения намагничивающих токов крайних фаз в 1,3-1,35 раза больше намагничивающего тока средней фазы. По той же причине в намагничивающих токах имеются все нечетные ВГ, в том числе и кратные трем. Эти ВГ образуют системы прямой и обратной последовательностей. Наибольший удельный вес, кроме основной имеют 3, 5 и 7-я гармоники. Амплитудный спектр намагничивающих токов практически одинаков при схемах соединений звезда-

звезда и звезда-треугольник [3]. Усредненные значения коэффициента намагничивания приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Усредненные значения коэффициента намагничивания

Гармоника	Крайняя фаза, %	Средняя фаза, %
3-я	0,1	0,2
5-я	0,29	0,22
7-я	0,12	0,1

2.4 Частотный привод

Частотный привод является одним из распространенных типов регулируемого электропривода. Регулирование частоты вращения в этом случае осуществляется при помощи тиристорных преобразователей частоты, которые могут быть выполнены в виде автономных инверторов, осуществляющих преобразование постоянного тока в переменный, и преобразователей с непосредственной связью, преобразующих переменный ток одной частоты в ток другой частоты посредством переключения встречно-параллельно соединенных силовых вентилях [1].

Преобразователи частоты имеют контур обратной связи постоянного тока с входным преобразователем на стороне питания и выходной преобразователь (обычно функционирующий как инвертор) на стороне нагрузки. И в конфигурации преобразования напряжения, и тока контур постоянного тока имеет фильтр, который разъединяет ток или напряжения по питанию от выходного. Но поскольку идеальных фильтров просто не существует, все равно некая связь остается. В результате, компоненты тока, связанные с нагрузкой, присутствуют и в связующей цепи постоянного тока и, соответственно, передаются на сторону питания. Эти компоненты по отношению в основной частоте являются субгармониками и интергармониками [3].

Гармонические искажения создаются самим преобразователем частоты ввиду особенностей его конструкции и принципа действия. Выпрямитель преобразователя частоты создает пульсирующее напряжение постоянного тока. При каждом пике этого напряжения происходит заряд конденсатора в промежуточной цепи постоянного тока. Во время заряда этого конденсатора возникают входные токи со сравнительно большой амплитудой. Ввиду такой несинусоидальной нагрузки происходит искажение синусоиды напряжения питания, причем степень искажения зависит как от величины токовой нагрузки, так и от импеданса сети. Возникающие при этом помехи сети питания представляют собой высокочастотные составляющие - гармоник (обычно 3,5,7 и 9 гармоники) основной частоты питающего напряжения (50 Гц).

Асинхронные электродвигатели, на которых установлены преобразователи частоты, также могут быть источником интергармоник из-за щелей между металлом в роторе и статоре, особенно при насыщении магнитного контура (так называемые щелевые гармоники). При постоянной скорости вращения частоты возмущающих компонентов обычно находятся в пределах 500–2 000 Гц, но в период пуска и разгона двигателя их значения могут быть шире. Естественные элементы асимметрии конструкции электропривода (отклонения от детальных чертежных геометрических размеров, несоосность, например) могут также являться причиной возникновения интергармоник (рисунок 1.4).

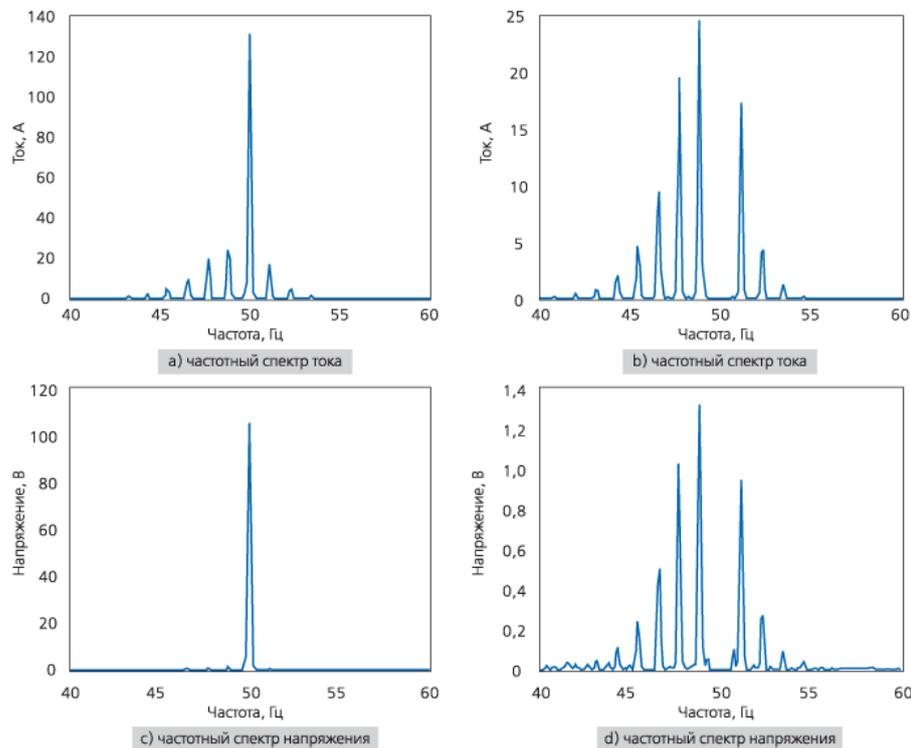


Рисунок 1.4 – Результаты спектроизмерения фаз тока и напряжения электродвигателя на его разъемах; а), с) – полный спектр; б), d) – спектр с исключенной основной частотой

2.5 Газоразрядные лампы

Газоразрядные лампы находят широкое применение в промышленности и городских сетях. Удельный вес их в осветительной нагрузке отдельных производств составляет 75-80%. Нелинейность вольт-амперной характеристики цепи дугового разряда лампы является причиной искажения формы кривой тока, потребляемого из сети. В таблице 1.3 приведены относительные (в долях тока от 1-ой гармоники) значения ВГ дуговых и люминесцентных ламп [1].

Таблица 1.3 – Относительные значения ВГ дуговых и люминесцентных ламп

Номер ВГ	Люминесцентные светильники с балластным сопротивлением		Светильники с лампами		
	Индуктивным	Индуктивно-емкостным	ДРЛ без компенсации	ДРЛ с компенсацией	ДНаТ с компенсацией
3	4	16-21	6,2-9	18	19
5	0,6	0,9-3	1,2-2,5	5,8-7,2	9,5
7	0,2	0,5-1,2	0,5-0,8	1-5,2	1-1,4
9	0,2	0,1-0,6	0,2-0,4	1-1,4	2,4-3
11	-	0,3-1,1	0,2	5,4-8,8	11
13	-	0,2-0,3	-	2,6-8,8	4,5-5,9

2.6 Компактные люминесцентные лампы

Люминесцентные лампы производят яркий дневной свет, который не утомляет глаза, создает комфорт и уютную атмосферу при номинальном тепловыделении. Однако, система зажигания современных люминесцентных ламп изменили картину формы тока и напряжения в электросетях. На рисунке 1.5 показано распределение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения и тока в зависимости от номера гармоники, n ,%.

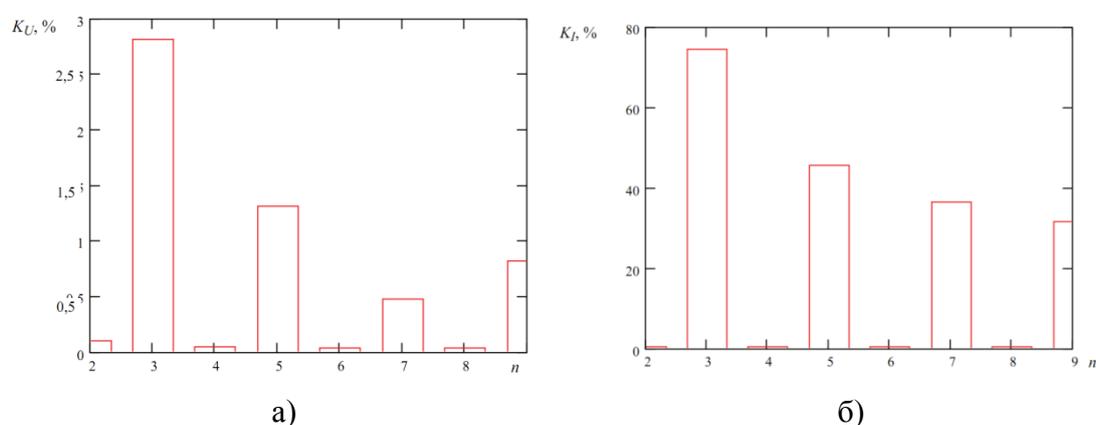


Рисунок 1.5 – Распределение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения (а) и тока (б) в зависимости от номера гармоники

Из анализа полученных данных следует, что в гармонических составляющих напряжения и тока преобладают нечетные гармоники. Особенно искажается кривая тока. Величина третьей гармоники тока достигает 74% от основной частоты. Величина третьей гармоники напряжения не превышает нормально допустимых значений 5% в сети напряжением 0,38кВ.

На основании экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от потребляемой мощности люминесцентных ламп (рисунок 1.6). Полученные данные показывают, что даже незначительное увеличение потребляемой активной мощности газоразрядными лампами вызывает возрастание коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения [4].

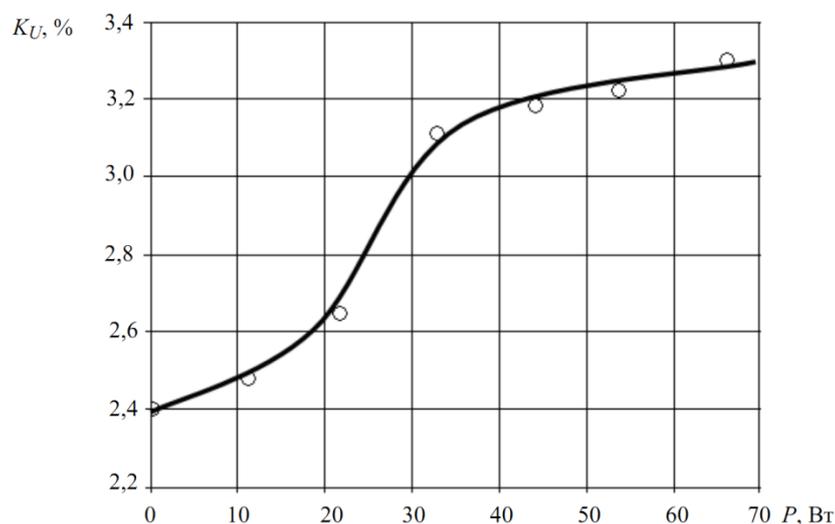


Рисунок 1.6 – Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от потребляемой мощности люминесцентных ламп

2.7 Бытовые потребители

Анализ характера современной административно-бытовой нагрузки позволяет сделать вывод о том, что в современных жилых домах и административных зданиях практически не осталось приборов и техники, потребляющих из сети чисто синусоидальный ток. Данное обстоятельство дает повод задуматься о вероятных проблемах, связанных с ВГ в электрических сетях таких потребителей. Ведь, несмотря на то, что мощность каждого отдельного такого прибора или устройства мала, суммарная мощность искажений большого их количества может негативно сказаться на работе системы электроснабжения (СЭС). На рисунке 1.7 приведены осциллограммы и гармонические спектры токов, потребляемых административно-бытовыми электроприемниками [5].

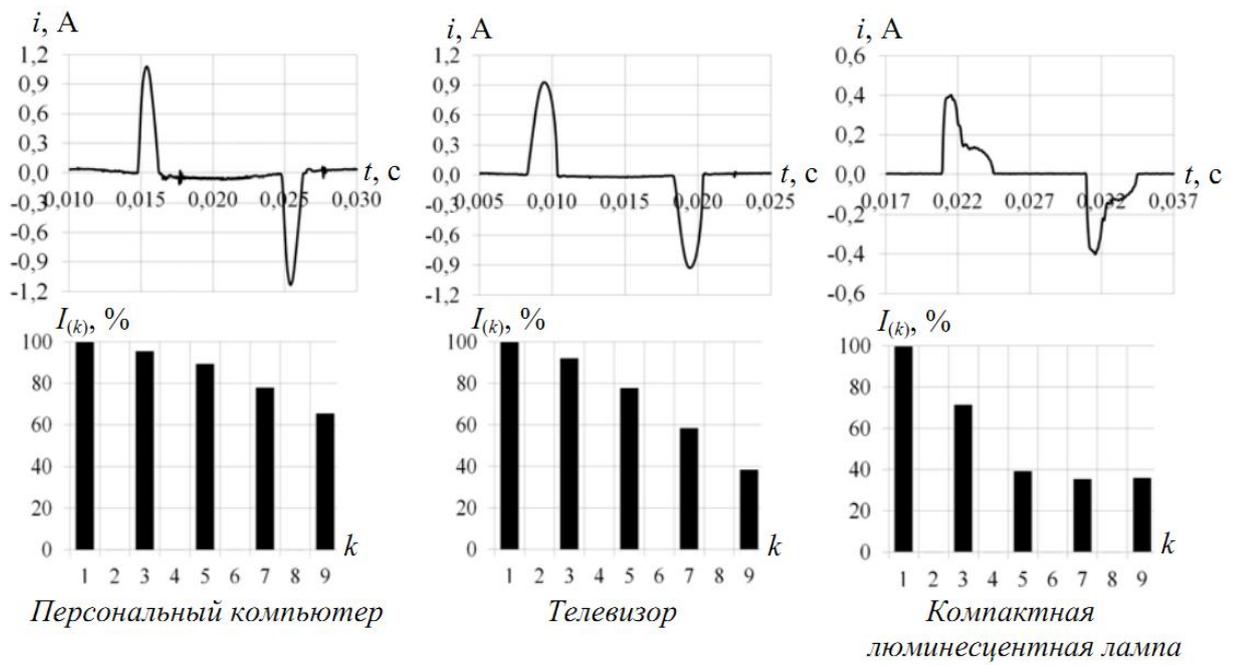


Рисунок 1.7 – Осциллограммы и гармонические спектры токов, потребляемых из сети некоторыми однофазными административно-бытовыми электроприемниками

ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ n-ЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ 6-10 кВ

3.1 Средство измерения показателей качества электрической энергии и его функциональные возможности

В настоящее время, с учетом допущений, разрешаемых ГОСТ 32144-2013 [6], задачи приборного контроля качества электрической энергии могут решаться с помощью выпускаемого в РБ прибора УК1.

Устройство контроля параметров качества электрической энергии УК1 (ТУ РБ 100230547.012-2015) представляет собой высокоточный измерительный прибор, построенный на основе современных цифровых технологий. Устройство устанавливается на энергообъектах и осуществляет сбор, обработку и хранение информации о параметрах качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013.

Функциональные возможности устройства контроля параметров качества электрической энергии УК1:

- подключается к одно- и трехфазным сетям 0,38 кВ непосредственно, к сетям с высоким напряжением – через измерительные трансформаторы;
- измеряет все параметры качества электроэнергии в точном соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013;
- вычисляет и хранит сами значения параметров качества, а не результаты статистической обработки, что позволяет детально проследить за состоянием контролируемой электросети за весь интервал измерений;
- автономно накапливает информацию более двух месяцев, накопленная информация (результаты измерений, в том числе на разных энергообъектах) хранится в устройстве неограниченное время;
- производит статистическую обработку накопленных данных и сравнение результатов с установленными нормами качества электроэнергии.

Устройство УК1 внесено в Государственный реестр средств измерений РБ под № РБ 03 13 1654 02 и имеет соответствующий сертификат.

3.2 Определение коэффициентов n-ых гармонических составляющих напряжения на системных подстанциях 6-10 кВ

Показатели качества электрической энергии были сняты для четырех системных подстанций 6-10кВ для двух трансформаторов ТМГ11-1000-10/0,4 и двух ТМ-1000-10/0,4. Эксперименты проводились на шинах 0,4кВ в соответствии с [6], время каждого измерения составляло 24 часа.

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанций №1 и №2 с трансформаторами ТМГ11-1000-10/0,4 приведены в таблице 3.1; 3.2 и на рисунках 3.1; 3.2 соответственно.

Таблица 3.1 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №1 с трансформатором ТМГ11-1000-10/0,4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
2	0,03	0,02	0,02
3	1,55	1,28	1,3
4	0	0,01	0,01
5	1,31	1,39	1,36
6	0,01	0,01	0,01
7	1,12	1,19	1,15
8	0	0,01	0
9	0,69	0,69	0,68
11	0,16	0,16	0,18
13	0,05	0,13	0,07
15	0,11	0,12	0,11
17	0,02	0	0,03
19	0,01	0	0
21	0,03	0,04	0,03

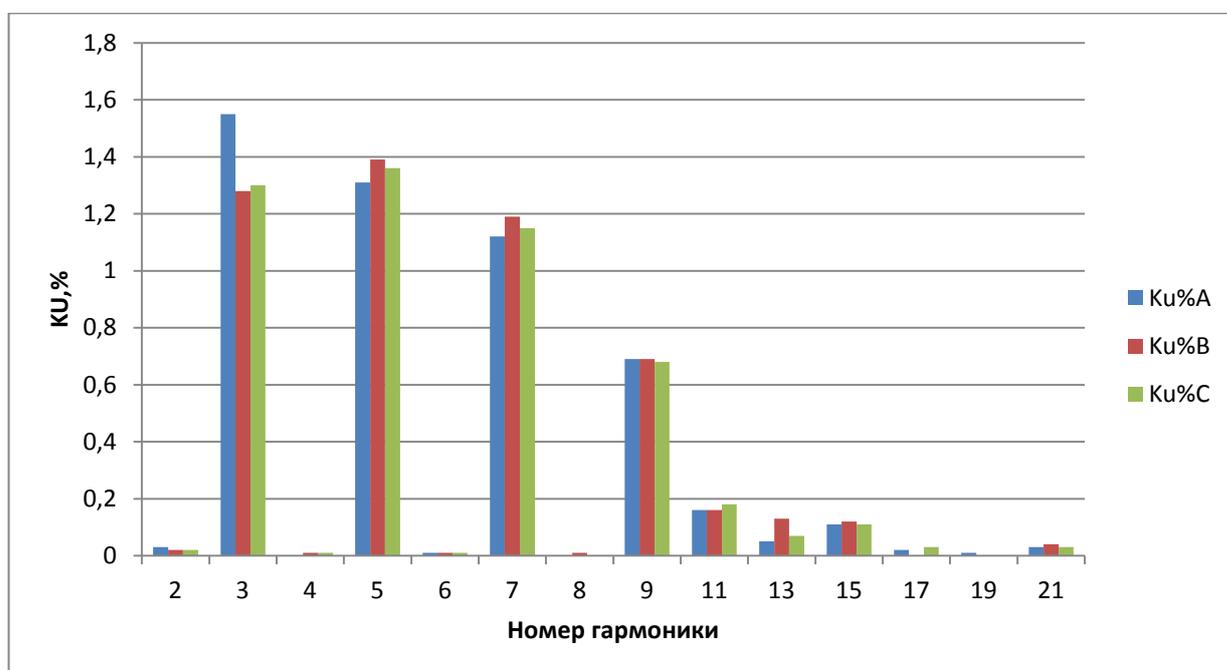


Рисунок 3.1 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №1

Из анализа таблицы 3.1 и рисунка 3.1 можно сделать вывод, что в спектре гармонических составляющих напряжения в основном преобладают нечетные гармоники, особенно 3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13-я и 15-я. Данные гармонические составляющие будут оказывать наибольший вклад в суммарные потери электроэнергии, связанные с ее качеством.

Таблица 3.2 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №2 с трансформатором ТМГ11-1000-10/0,4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
2	0,32	0,34	0,35
3	0,96	1,19	0,9
4	0,22	0,2	0,2
5	1,5	1,64	1,22
6	0,1	0,1	0,1
7	0,71	0,62	0,65
8	0,17	0,17	0,22
9	0,47	0,42	0,52
10	0,1	0,1	0,14
11	0,31	0,32	0,44
12	0,28	0,34	0,32
13	0,56	0,42	0,58
14	0,2	0,17	0,32
15	0,17	0,24	0,26
17	0,24	0,54	0,5
19	0,42	0,22	0,28
21	0,1	0	0,1
23	0,17	0,24	0,14
25	0,14	0,14	0,1

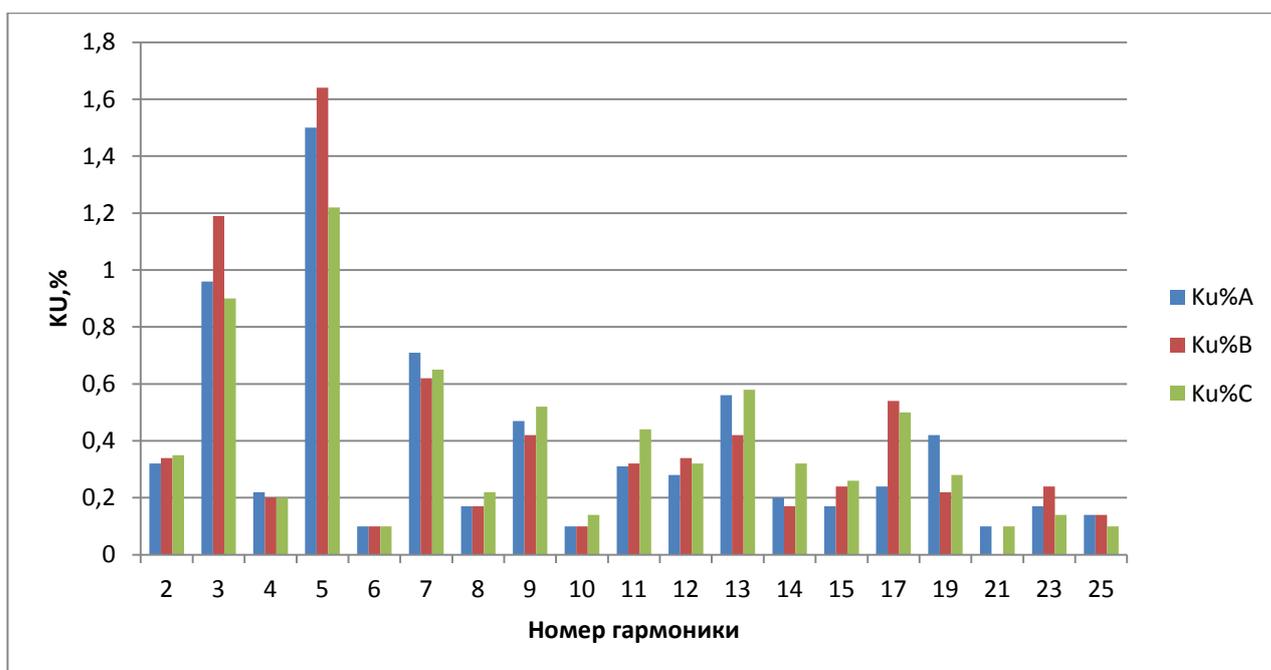


Рисунок 3.2 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №2

Из анализа таблицы 3.2 и рисунка 3.2 можно сделать вывод, что в спектре гармонических составляющих напряжения на подстанции №2 присутствуют практически все гармоники до 25-ой включительно. В основном преобладают нечетные гармоники, особенно 3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13 -я и 17-я. Данные гармонические составляющие будут оказывать наибольший вклад в суммарные потери электроэнергии, связанные с ее качеством.

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанций №3и №4 с трансформаторами ТМ-1000-10/0,4 приведены в таблице 3.3;3.4 и на рисунках 3.3; 3.4 соответственно.

Таблица 3.3 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №3 с трансформатором ТМ-1000-10/0,4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
2	0,04	0,05	0,05
3	0,68	0,59	0,22
5	0,6	0,37	0,3
6	0	0,01	0
7	0,42	0,45	0,31
11	0,08	0,07	0,06
13	0,02	0,01	0,01
19	0,01	0	0,01

Продолжение таблицы 3.3

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
29	0,03	0,03	0,03
31	0,01	0	0
35	0	0	0,01
37	0,01	0	0

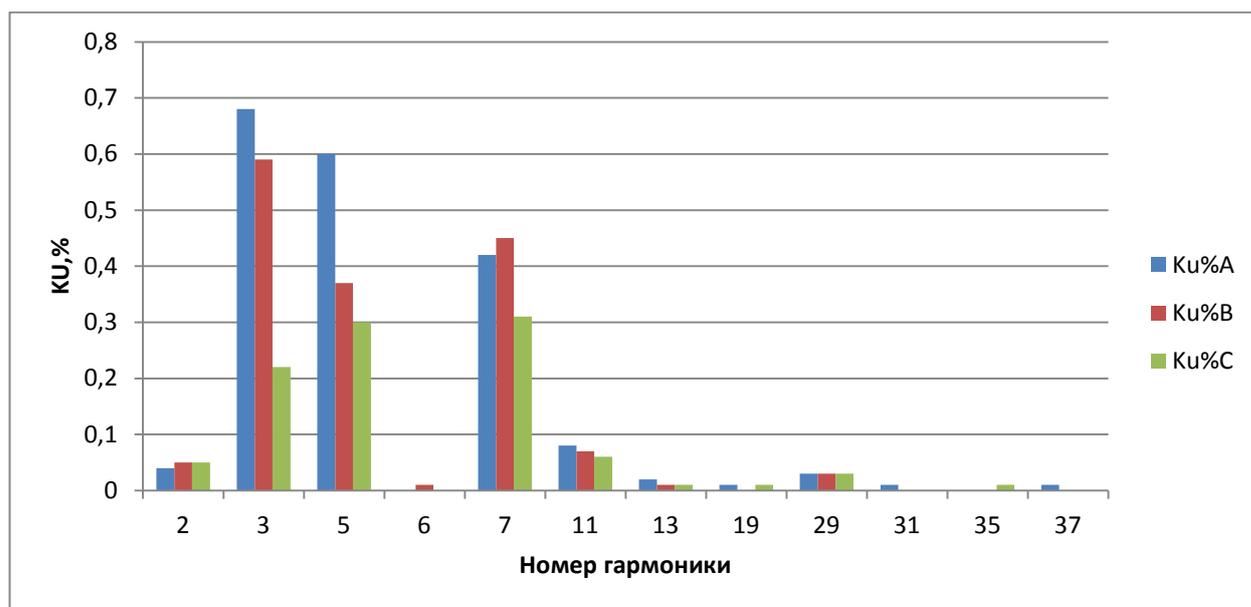


Рисунок 3.3 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №3

Таблица 3.4 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №4 с трансформатором ТМ-1000-10/0,4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
2	0,23	0,23	0,24
3	1,32	0,87	1,19
4	0,08	0,08	0,09
5	2,62	2,51	2,74
6	0	0	0,02
7	1,72	1,81	1,89
8	0,05	0,07	0,12
9	0,05	0,07	0,13
10	0,01	0,01	0,02
11	0,4	0,4	0,57
13	0,26	0,33	0,27
15	0,01	0,07	0,07
17	0,22	0,16	0,29

Продолжение таблицы 3.4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения по фазам		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С
19	0,14	0,2	0,11
21	0	0,01	0
23	0,16	0,15	0,24
25	0,05	0,13	0,03
29	0,2	0,2	0,26
31	0,04	0,06	0,05
35	0,04	0,01	0,04
37	0	0,02	0

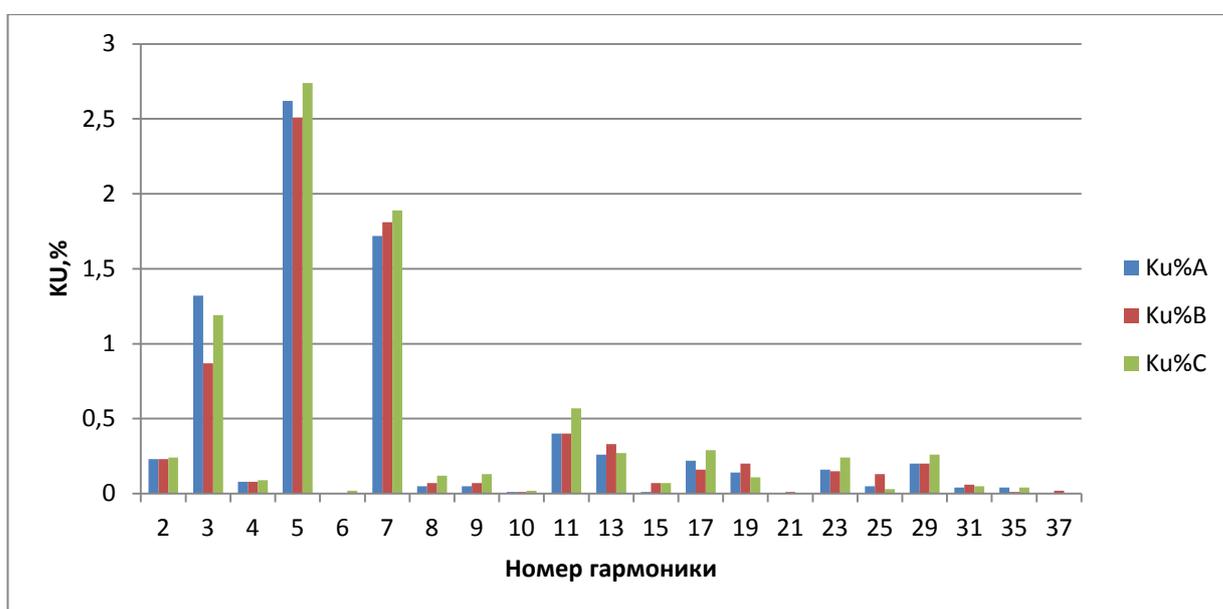


Рисунок 3.4 – Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения для подстанции №4

Из анализа таблиц 3.3; 3,4 и рисунков 3.3; 3.4 можно сделать вывод, что на подстанциях №3 и №4 преобладают гармоники номер 3-и, 5-ь, 7-ь и 11-ь, именно они будут иметь наибольшее влияние на потери мощности и электроэнергии.

Из анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что на всех подстанциях значения коэффициентов n-ых гармонических составляющих находятся в пределах допустимых значений, а если выходят за их пределы, то на очень незначительное время.

При дальнейшем расчете потерь активной мощности и энергии в силовых трансформаторах 6-10 кВ будем использовать усредненные данные для трансформаторной подстанции №4, так как на ней было зарегистрировано самое большое искажение синусоидальности

ГЛАВА 4 АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6/10-0,4 КВ ПРИ ПИТАНИИ НЕЛИНЕЙ- НЫХ НАГРУЗОК

4.1 Построение математической модели объекта исследования

Сокращение срока службы трансформаторов при снижении качества электрической энергии (КЭ) происходит в результате дополнительного нагрева изоляции обмоток, вызванными дополнительными потерями активной мощности, возникающими, как правило, из-за протекания в них токов обратной последовательности и токов высших гармоник (ВГ). Поэтому общепринятый подход к оценке срока службы силовых трансформаторов при несинусоидальности и несимметрии напряжений основан на определении дополнительных потерь активной мощности соответствующего увеличения температуры обмотки (его принимают пропорциональным дополнительным потерям) и расчет срока службы изоляции ведут по эмпирическим выражениям.

Дополнительные потери активной мощности при несимметрии напряжений представляют в виде суммы дополнительных потерь холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Добавочные потери в обмотках трансформатора возрастают пропорционально квадрату номера гармоники:

$$\Delta P_T = \xi_u^2 \left(\Delta P_{x.x} + \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \right), \text{ Вт} \quad (4.1)$$

где ξ_u – коэффициент несимметрии напряжений, равный отношению напряжения обратной последовательности к номинальному;

$\Delta P_{x.x}$ – потери холостого хода при основной частоте, кВт;

$\Delta P_{к.з}$ – потери короткого замыкания на основной частоте, кВт;

$u_{к.з}$ – напряжение КЗ, о.е.

Для учёта различного спектрального состава напряжения в каждой фазе выразим величину потери холостого хода и короткого замыкания для одной фазы.

В номинальном симметричном режиме потери холостого выражают:

$$\Delta P_{x.x} = 3 \cdot U_n \cdot I_{x.x} \cdot \cos \phi_{x.x}, \text{ Вт} \quad (4.2)$$

где $I_{x.x}$ – номинальный ток холостого хода, %;

$\cos \phi_{x.x}$ – коэффициент мощности холостого хода.

Приняв допущение о том, что потери холостого хода в номинальном режиме равны для каждой из трех фаз, можно записать:

$$\Delta P_{x.x} = 3 \cdot U_n \cdot I_{x.x} \cdot \cos \phi_{x.x} = 3 \cdot \Delta P_{x.x}^{(1)}, \text{ Вт} \quad (4.3)$$

где $\Delta P_{x.x}^{(1)}$ – потери холостого хода для одной фазы, кВт.

Потери холостого хода для трансформатора в номинальном режиме для одной фазы составят:

$$\Delta P_{x.x}^{(1)} = \frac{\Delta P_{x.x}}{3}, \text{ Вт} \quad (4.4)$$

Потери короткого замыкания в номинальном режиме считаются аналогично потерям холостого хода и для одной фазы составят:

$$\Delta P_{k.з}^{(1)} = \frac{\Delta P_{k.з}}{3}, \text{ Вт} \quad (4.5)$$

В [11] дополнительные потери холостого хода ΔP_{xv} при несинусоидальности напряжения рассчитывают по выражению:

$$\Delta P_{xv} = P_x \cdot \sum_{v=2}^n U_{v*}^2, \text{ Вт} \quad (4.6)$$

где U_{v*} – относительное значение напряжения на v -й гармонике,
 $U_{v*} = U_v / U_{\text{ном}}$.

Дополнительные потери активной мощности короткого замыкания при несинусоидальности напряжения будут равны:

$$\Delta P_{kv} = 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{k.з}}{u_{k.з}^2} \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_{v*}^2, \text{ Вт} \quad (4.7)$$

Суммарные потери, обусловленные несинусоидальным режимом работы трансформатора, для одной фазы определяются по формуле:

$$\Delta P_v = \Delta P_{x.x}^{(1)} \sum_{v=2}^n U_{v*}^2 + 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{k.з}}{u_{k.з}^2} \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_{v*}^2 \quad (4.8)$$

Суммарные потери в трансформаторе, работающем в режиме несимметрии и несинусоидальности составят:

$$\Delta P = \Delta P_T^{A,B,C} + \Delta P_v^{A,B,C} + \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot \beta^2, \quad (4.9)$$

где β – коэффициент нагрузки трансформатора;

При работе электрооборудования в номинальном режиме дополнительные потери от высших гармоник приводят к перегреву токоведущих частей выше допустимой температуры. К повышению температуры весьма чувствительна изоляция обмоток, срок службы которой снижается.

Согласно [11] прирост температуры от высших гармоник определяется по выражению:

$$\Delta \tau = \tau_{м.н.} \cdot \left[\left(\frac{\sum \Delta P}{\sum P_{ном}} \right)^{n_0} - 1 \right] + \tau_{(об-м)н.} \cdot (\beta^{2n} - 1), \quad (4.10)$$

где n, n_0 – коэффициенты, значения которых находятся в диапазонах соответственно 0,7–0,8 и 0,6–0,8

$\tau_{м.н.}$ и $\tau_{(об-м)н.}$ – установившиеся превышения температур соответственно масла и обмоток при номинальных условиях;

С учетом формул 4.1 и 4.8 формула 4.10 преобразуется к виду []:

$$\Delta \tau = \frac{\tau_{м.н.} \cdot n_0 \cdot \frac{\Delta P_{к.з}}{S_{ном}}}{u_{к.з}^2 \cdot \left(\frac{\Delta P_{к.з}}{S_{ном}} + \frac{\Delta P_{x.x}}{S_{ном}} \right)} \cdot (\xi_u^2 + 0.607 \cdot \sum_{v=2}^{50} \frac{1 + 0.05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_v^2) + \frac{\tau_{(об-м)н.} \cdot n}{u_{к.з}^2} \cdot (\xi_u^2 + 1.291 \cdot \sum_{v=2}^{50} \frac{U_v^2}{v^2}), \quad ^\circ C \quad (4.11)$$

Относительное сокращение срока службы изоляции определяются по выражению

$$\Delta V = \frac{V - V_{нкэ}}{V} = 1 - e^{-\alpha \cdot \Delta \tau}, \quad \% \quad (4.11)$$

где $V_{нкэ}$ – срок службы при некачественной ЭЭ;

α – коэффициент старения изоляции, для трансформаторов $\alpha = 0,1155^\circ C^{-1}$.

4.2 Пример использования математической модели

Для определения дополнительных потерь активной мощности воспользуемся выражениями 4.1 и 4.8. Для анализа будем использовать усредненные данные для трансформаторной подстанции №4, так как на ней было зарегистрировано самое большое искажение синусоидальности.

При расчете принимаем следующие допущения:

Амплитудная несимметрия напряжений и токов высших гармоник пренебрежимо мала ($E_u=0$), т.е. несимметрия напряжений и токов в общем случае может иметь место в сети лишь на основной частоте[15].

Параметры трансформатора:

$$P_{xx}=1400 \text{ Вт}; \quad S_{\text{НОМ}}=1000 \text{ кВА} \quad u_{k3}=5.5\%$$

$$P_{k3}=10800 \text{ Вт}; \quad I_{xx}=1,4\% \quad \beta=0.7$$

Коэффициенты N-ых гармонических составляющих напряжения представлены в таблице 4.4

Дополнительные потери активной мощности при несимметрии режима (4.1):

$$\Delta P_T = \xi_u^2 \left(\Delta P_{x.x} + \frac{\Delta P_{k.3}}{u_{k.3}^2} \right) = 0 \cdot \left(1400 + \frac{10400}{5,5^2} \right) = 0, \text{ Вт}$$

Дополнительные потери активной мощности при несинусоидальности режима фазы «А» (4.8):

$$\begin{aligned} \Delta P_v^A &= \Delta P_{x.x}^{(1)} \sum_{v=2}^n U_{v*}^2 + 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{k.3}^{(1)}}{u_{k.3}^2} \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_{v*}^2 = \frac{1400}{3} \cdot \sum_{v=2}^n U_{v*A}^2 + \\ &+ 0,607 \cdot \frac{10400}{3 \cdot 5,5^2} \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_{v*A}^2 = 3775, \text{ Вт} \end{aligned}$$

Аналогично по фазе «В» и «С» потери мощности составят $\Delta P_v^B=4150 \text{ Вт}$, $\Delta P_v^C=4145 \text{ Вт}$.

Определение снижения срока службы трансформатора, вызванными высшими гармониками

Дополнительный нагрев изоляции трансформатора (4.10):

$$\begin{aligned} \Delta \tau &= \tau_{\text{м.н.}} \cdot \left[\left(\frac{\sum \Delta P}{\sum P_{\text{НОМ}}} \right)^{n_0} - 1 \right] + \tau_{(\text{об-м})\text{н.}} \cdot (\beta^{2n} - 1) = 40 \cdot \left[\left(\frac{\sum 3775+4150+4145+10400+1400}{\sum 10400+1400} \right)^{0,7} - 1 \right] + \\ &+ 25 \cdot (0,7^{2 \cdot 0,7} - 1) = 3.14 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Относительное сокращение срока службы изоляции (7):

$$\Delta V = 1 - e^{-\alpha \cdot \Delta \tau} = 1 - e^{-0,1155 \cdot 4,5} = 30\%$$

При данном коэффициенте искажения синусоидальности для подстанции №1 сокращение срока службы изоляции нашего трансформатора составит 30%.

4.3 Описание программы и ее возможностей

Для решения поставленной задачи и автоматизации расчетов потерь мощности в трансформаторе была разработана компьютерная программа, которая позволяет производить расчет потерь мощности трансформаторов 6-10/0,4 кВ, питающих нелинейную нагрузку.

Данная программа предназначена для решения следующих задач:

- расчета дополнительных потерь мощности в обмотках трансформаторов с учетом несинусоидальной нагрузки;
- расчета дополнительных потерь мощности в обмотках трансформаторов с учетом несимметричности нагрузки;
- дополнительный нагрев изоляции трансформатора с учетом несимметричной и несинусоидальной нагрузки;
- определения снижения срока службы трансформатора, вызванными высшими гармониками;
- расчета суммарных потерь электроэнергии.

Программа написана на языке Delphi. Внешний вид окна программы представлен на рисунке 4.1. Программа имеет простой и интуитивно понятный интерфейс, что позволяет затрачивать минимум времени при вводе исходных данных.

Рисунок 4.1 – Главное окно программы

В качестве исходных данных пользователю предлагается выбрать из стандартного каталога или ввести: паспортные параметры трансформатора (P_{xx} , R_{kz} , U_{kz} , I_{xx} , $S_{ном}$), а также задать коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения. U_v , коэффициент загрузки трансформатора K_z , время использования максимума нагрузки $T_{нб}$, коэффициента несимметрии напряжения. E_u .

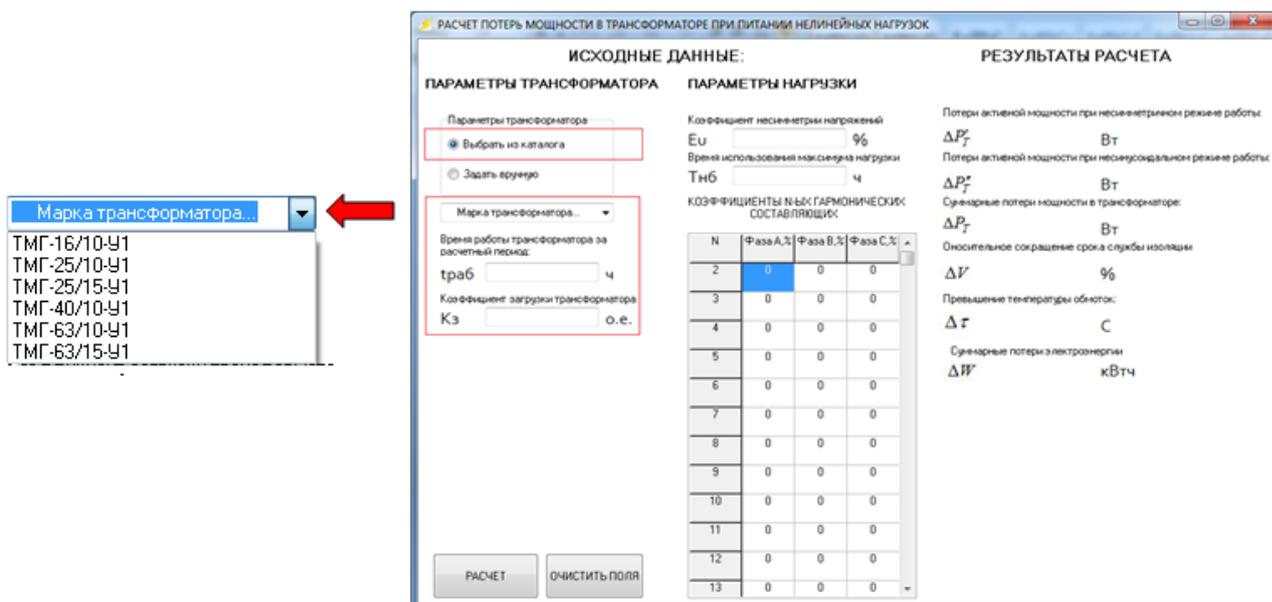


Рисунок 4.2 – Ввод исходных данных из каталога

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Параметры трансформатора

Выбрать из каталога

Задать вручную

Время работы трансформатора за расчетный период:

траб ч

Коэффициент загрузки трансформатора

Кз о.е.

Номинальная мощность

Сном кВА

Потери холостого хода

Рхх Вт

Потери короткого замыкания

Ркз Вт

Напряжение короткого замыкания

Укз %

Ток холостого хода

Ихх %

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

Коэффициент несимметрии напряжений

Eu %

Время использования максимума нагрузки

Тнб ч

КОЭФФИЦИЕНТЫ N-ЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

N	Фаза А,%	Фаза В,%	Фаза С,%
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Потери активной мощности при несимметричном режиме работы:

$\Delta P'_T$ Вт

Потери активной мощности при несинусоидальном режиме работы:

$\Delta P''_T$ Вт

Суммарные потери мощности в трансформаторе:

ΔP_T Вт

Относительное сокращение срока службы изоляции

ΔV %

Превышение температуры обмоток:

$\Delta \tau$ С

Суммарные потери электроэнергии

ΔW кВтч

Рисунок 4.3 – Ввод исходных данных

После нажатия кнопки «Расчет» программа производит расчеты по алгоритму, представленному на рисунке 4.4. Результаты расчетов выводятся с правой стороны окна программы. Для примера работы программы были взяты данные из пункта 4.2. Результат работы представлен на рисунке 4.5

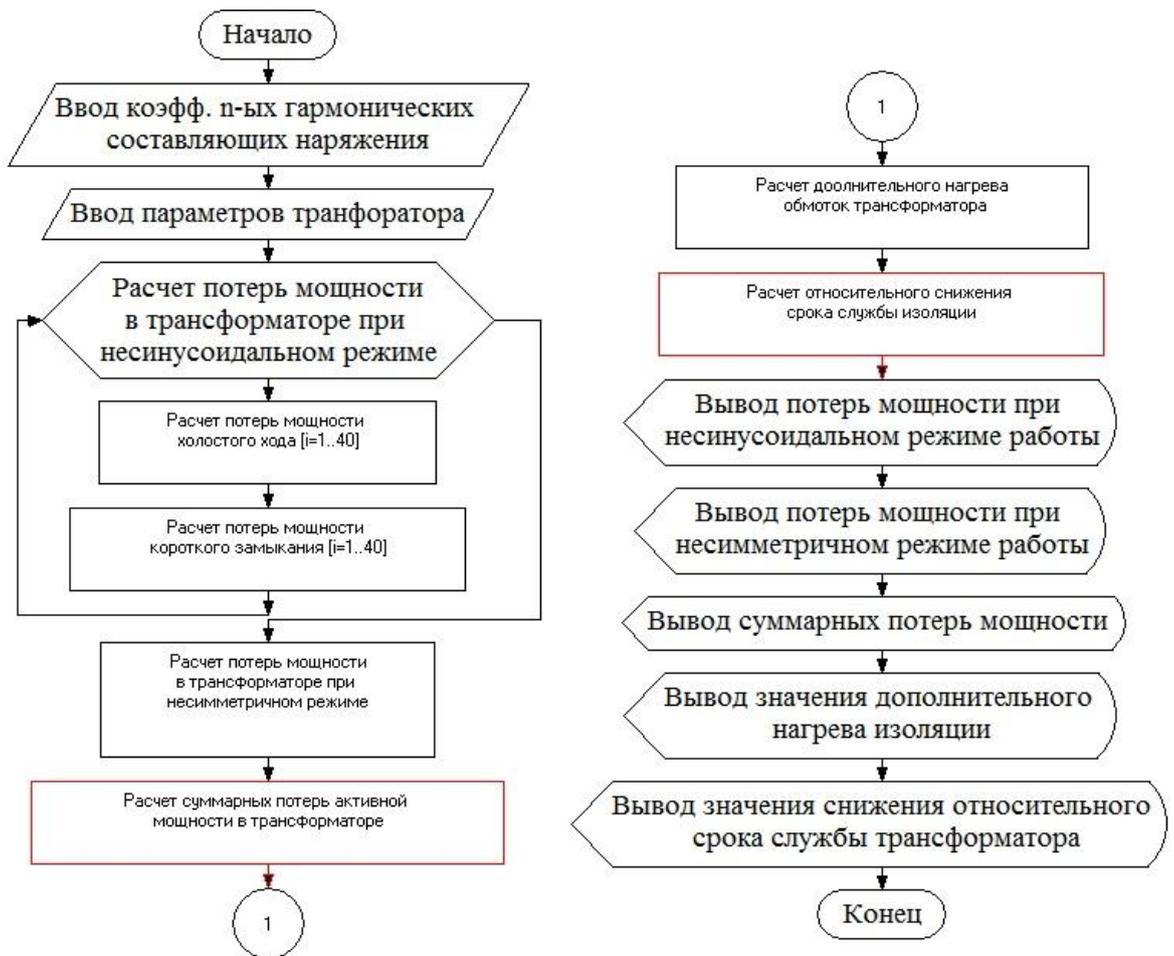


Рисунок 4.4 – Алгоритм работы программы

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ПИТАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Параметры трансформатора
 Выбрать из каталога
 Задать вручную

Время работы трансформатора за расчетный период:
 траб 24 ч

Коэффициент загрузки трансформатора
 Кз 0,7 о.е.

Номинальная мощность
 Sном 1000 кВА

Потери холостого хода
 Pхх 1400 Вт

Потери короткого замыкания
 Pкз 10400 Вт

Напряжение короткого замыкания
 Uкз 5,5 %

Ток холостого хода
 Iхх 1,4 %

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

Коэффициент несимметрии напряжений
 Eu 0 %

Время использования максимума нагрузки
 Тнб 6400 ч

КОЭФФИЦИЕНТЫ N-ЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

N	Фаза А, %	Фаза В, %	Фаза С, %
2	0,23	0,23	0,23
3	0,32	0,87	0,32
4	0,08	0,08	0,07
5	2,62	2,54	2,60
6	0	0	0
7	0,72	0,8	0,76
8	0,08	0,07	0,08
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0,4	0,4	0,4
12	0	0	0
13	0,26	0,25	0,26

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Потери активной мощности при несимметричном режиме работы:
 ΔP_T^s 0 Вт

Потери активной мощности при несинусоидальном режиме работы:
 ΔP_T^r 11371,19 Вт

Суммарные потери мощности в трансформаторе:
 ΔP_T 17867,19 Вт

Относительное сокращение срока службы изоляции
 ΔU 30,39 %

Превышение температуры обмоток:
 $\Delta \tau$ 3,14 С

Суммарные потери электроэнергии
 ΔW 372,13 кВтч

РАСЧЕТ ОЧИСТИТЬ ПОЛЯ

Рисунок 4.5 – Результаты расчета программы

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Целью планирования себестоимости проведения научно-исследовательских работ (НИР) является экономически обоснованное определение величины затрат на её выполнение. Проектные работы будет выполнять инженер-энергетик с тарифным разрядом 12 и тарифным коэффициентом 2,84, а также инженер-программист с тарифным разрядом 12 и тарифным коэффициентом 2,84. Трудоемкость и продолжительность НИР приведена в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Ленточный график НИР

Наименование этапов	Исполнитель, чел	Трудоемкость работ, чел-дн.	Рабочий период, дн									
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1 Разработка технического задания	инженер-энергетик	3	←→									
2 Обзор литературы и патентной информации		14	←→									
3 Разработка алгоритма работы программы	инженер-программист	4	←→									
4 Создание базы данных		7	←→									
5 Написание тела программы		5	←→									
6 Компиляция, тестирование и доработка		12	←→									
7 Оформление технической документации	инженер-энергетик	2	←→									
8 Экономическая проработка проекта		3	←→									
Итого:		50										

Рассчитаем плановую себестоимость НИР по статьям калькуляции.

Затраты по статье “Материалы” представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Затраты по статье «Материалы»

Материалы	Единица измерения	Потреб. кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага писчая	упаковка	1	7,5	7,5
С учетом транспортно-заготовительных расходов (6%)				7,95
Распечатка листов формата А4	лист	270	0,08	21,6
Всего				29,55

Спецоборудование для научных и экспериментальных работ не приобреталось.

Рассчитаем основную заработную плату разработчиков по формуле:

$$ЗП_{\text{осн}} = ДО \left(1 + \frac{a}{100} \right) = C_1 \cdot K_T \cdot K_{\text{кор}} \cdot K_{\text{ст}} \left(1 + \frac{a}{100} \right), \quad (5.1)$$

где C_1 – ставка первого разряда, $C_1 = 29,2$ руб;

K_T – тарифный коэффициент, $K_T = 2,84$;

$K_{\text{кор}}$ – коэффициент повышения тарифных ставок по технологическим видам работ, $K_{\text{кор}} = 1,3$;

$K_{\text{ст}}$ – коэффициент, учитывающий стаж работы, $K_{\text{ст}} = 1,1$;

a – процент премии, $a = 20\%$;

Основная заработная плата инженера-энергетика:

$$ЗП_{\text{осн}}^{\text{Э}} = 29,2 \cdot 2,84 \cdot 1,3 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{20}{100} \right) = 142,3 \text{ руб / мес.}$$

Основная заработная плата инженера-программиста:

$$ЗП_{\text{осн}}^{\text{П}} = 29,2 \cdot 2,84 \cdot 1,3 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{20}{100} \right) = 142,3 \text{ руб / мес.}$$

Рассчитаем заработную плату разработчиков за период проектирования:

$$ЗП = ЗП_{\text{осн}} \cdot \frac{N}{m}, \quad (5.2)$$

где N – количество дней на выполнение задания, дни;

m – количество рабочих дней в месяце, дни;

Заработная плата инженера-энергетика:

$$ЗП^э = 142,3 \cdot \frac{18}{21} = 121,97 \text{ руб.}$$

Заработная плата инженера-программиста:

$$ЗП^n = 142,3 \cdot \frac{32}{21} = 216,84 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата составляет 8% от основной заработной платы инженеров на стадии НИР:

$$ЗП_{\text{доп}} = k_{\text{д}} \cdot ЗП, \quad (5.3)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, $k_{\text{д}} = 0,08$.

$$ЗП_{\text{доп}}^э = 0,08 \cdot 121,7 = 9,76 \text{ руб.},$$

$$ЗП_{\text{доп}}^n = 0,08 \cdot 216,84 = 17,35 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальное страхование составляют 34% и страховые взносы от несчастных случаев – 0,6% от суммы основной и дополнительной заработной платы:

$$O = k_0 \cdot (ЗП + ЗП_{\text{доп}}), \quad (5.4)$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование и страховые взносы от несчастных случаев.

$$O^э = 0,346 \cdot (121,97 + 9,76) = 45,58 \text{ руб}$$

$$O^n = 0,346 \cdot (216,84 + 17,35) = 81,03 \text{ руб}$$

Определим затраты на электроэнергию.

Стоимость электроэнергии:

$$Ц_{\text{эл}} = T_{\text{б}} \cdot (0,19 + 0,81 \cdot \frac{K_{\text{н}}}{K_{\text{б}}}), \quad (5.5)$$

где $T_{\text{б}}$ – тариф на электроэнергию, установленный декларацией, руб.,

$T_{\text{баз}} = 0,25197$ руб;

$K_{\text{н}}$ – значение курса белорусского рубля по отношению к доллару США на день оформления платежного документа и день оплаты и при установлении тарифов на электроэнергию, руб.;

$K_{\text{б}}$ – значение курса белорусского рубля по отношению к доллару при установлении тарифов на электроэнергию, руб, $K_{\text{б}} = 2,0461$ руб.

Курс доллара по данным Национального Банка Республики Беларусь составляет 1,9530 руб. за 1 \$ США (20.09.2016 г.).

$$Ц_{\text{эл}} = 0,25197 \cdot (0,19 + 0,81 \cdot \frac{1,9530}{2,0461}) = 0,24268 \text{ руб} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$$

Затраты на электроэнергию определяем по тарифу 0,24268 руб/кВт·ч. Результаты расчета сводим в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Расход электроэнергии, потребляемой оборудованием при проведении НИР

Наименование оборудования	Потребляемая мощность	Этапы графика НИР	T _{раб} , дни	T _{раб} , час	Количество единиц, шт.	K _с	W _{эл} , кВт·ч
Компьютер	0,2	1,2,7,8	18	144	1	0,3	8,64
Компьютер	0,35	3,4,5,6	32	256	1	0,5	44,8
Итого:							53,44

Затраты на электроэнергию для проведения НИР:

$$Z_{эл} = W_{эл} \cdot C_{эл} = 53,44 \cdot 0,24268 = 12,97 \text{ руб} \quad (5.6)$$

Накладные расходы на управление и хозяйственное обслуживание составляют 20% от ЗП работника:

$$НР = k_n \cdot ЗП \quad (5.7)$$

где k_n – коэффициент накладных расходов, $k_n = 0,2$.

$$НР^p = 0,2 \cdot 121,97 = 24,40 \text{ руб.},$$

$$НР^n = 0,2 \cdot 216,84 = 43,37 \text{ руб.}$$

Плановая себестоимость НИР приведена в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Плановая калькуляция себестоимости НИР

Статьи затрат	Сумма, руб		
	Инженер-энергетик	Инженер-программист	Общий
Материалы			29,88
Затраты на электроэнергию			12,97
Спецоборудование НИР	0	0	0
Заработная плата разработчика	121,97	216,84	338,81
Дополнительная заработная плата	9,76	17,35	27,11
Отчисления на социальные нужды	45,58	81,03	126,62
Накладные расходы	24,40	43,37	67,77
Полная себестоимость НИР			602,83

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской работе изучена проблема негативного влияния несинусоидального и несимметричного режимов работы на потери активной мощности и энергии в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ. Рассмотрены причины и источники возникновения несинусоидальности в системе, также проведен анализ основных гармоник напряжения, которые оказывают наибольшее влияние на составляющую потерь. Составлен и просчитан алгоритм для определения потерь активной мощности и энергии в трансформаторах, увеличения температуры изоляции обмотки трансформаторов, а также снижения относительного срока службы. Сняты спектры высших гармонических составляющих напряжения с четырех подстанций г. Гомеля.

Из анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что на всех подстанциях значения коэффициентов n -ых гармонических составляющих находились в пределах допустимых значений, а если выходили за них, то на очень незначительное время. Практически во всех полученных спектрах гармонических составляющих напряжения преобладали нечетные гармоники, особенно 3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13-я, 15-я и 17-я.

После анализа полученных результатов был сделан вывод, что с повышением коэффициента искажения синусоидальности возрастают потери активной мощности в трансформаторе. Если дополнительными потерями холостого хода, вызванными искажением синусоидальности можно пренебречь, так как их величина не превышает 1% от потерь короткого замыкания, то дополнительные потери активной мощности составляют от 2% (подстанция №2) до 32% (подстанция №4) от $P_{кз}$.

Итогом научной работы стала разработанная программа по расчету потерь активной мощности и энергии в трансформаторах 6-10 кВ, выполненная в среде программирования Delphi. Программный комплекс позволяет автоматизировать расчет потерь в трансформаторах, учитывая несинусоидальность и несимметрию режима работы, и добиться снижения временных затрат на проектирование перспективной схемы электроснабжения, также исключения человеческого фактора (ошибок).

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что при постоянно растущей доле нелинейной нагрузки необходимо периодически проводить мониторинг силовых трансформаторов по показателям качества электрической энергии. Если потери достигают больших значений, то необходимо устанавливать активные фильтры высших гармоник, либо снижать коэффициент загрузки трансформаторов, чтобы предотвратить их аварийный выход из строя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
2. Интергармоники (Interharmonics) / Збигнев Ханзелка, Анжей Бьень [Электрон. ресурс]. – 2005. – Режим доступа http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3107 – Дата доступа 11.02.2015.
3. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160с.
4. Анализ высших гармоник напряжения и тока при использовании компактных люминесцентных ламп / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, А.В. Бакулин, Н.А. Хребтов, В.В. Павлинов // Вопросы современной науки и практики. – 2011 – №3(34). – С.374-377.
5. Моделирование однофазных административно-бытовых электроприемников, потребляющих резко несинусоидальный ток /К. М. Медведев Д. В. Максименко // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2013 – №1. – С.48-54.
6. Силовые трансформаторы [Текст]: справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616с.
7. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст]: монография / Л.В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
8. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов [Текст]: монография / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
9. Crepaz, S. Eddy current losses in rectifier transformers / S.Crepaz // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1970. - №7, vol. PAS-89. p. 1651–1656.
10. Deokar, Sanjay A. Analysis of distribution transformer performance under non-linear balanced load conditions and its remedial / Sanjay A.Deokar, Laxman M. Waghmare // International journal of technology and advanced engineering. Volume 1, Issue 2, December 2011. P. 152-161.
11. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Горпинич А.В., Нестерович В.В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
12. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
13. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

14 Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии / В.М. Степанов, И.М. Базыль // Известия Тульского государственного университета. – 2013– №12-2 – С.27-31

15 Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях.– Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.

Список публикаций соискателя

1. Автоматизация расчета снижения пропускной способности трансформаторов 6-10/0,4 кВ при питании нелинейной нагрузки / В.А. Мороз // Сб. мат. XVI-й Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления». – Гомель, ГГТУ им. П. О. Сухого, 28-29 апреля 2016. – с. 211-214.