

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАГИСТРАТУРА

Кафедра «Электроэнергетика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ,
ПОЛУЧЕННОЙ ОТ АВТОНОМНОЙ (СОЛНЕЧНОЙ) ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

6N0718 «Электроэнергетика»

Исполнитель _____ Ж.К. Магауина
(подпись, дата)

Научный руководитель

д.т.н., профессор _____ Е.В. Иванова
(подпись, дата)

Допущена к защите:

Зав. кафедрой «Электроэнергетика»

д.т.н., профессор _____ Е.В. Иванова
(подпись, дата)

Павлодар 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	3
Введение	4
1 Содержание проблемы ЭМС в сетях общего назначения	13
1.1 Проблемы ЭМС в электрических сетях	13
1.2 Основные источники кондуктивных ЭМП в сетях 0,4 кВ	18
1.3 Системный подход к достижению цели исследований	22
1.4 Выводы по 1 главе	24
2 Кондуктивные электромагнитные помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения	25
2.1 Организационное обеспечение ЭМС	25
2.2 Методология исследования кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения	28
2.3 Экспериментальные исследования кондуктивных ЭМП в сетях 0,4 кВ	30
2.4 Выводы по 2 главе	47
3 Электромагнитная совместимость электрической сети 10 кВ и автономной электроэнергетической системы 0,4 кВ	48
3.1 Анализ спектра высших гармонических составляющих напряжения в электрической сети 10 кВ	48
3.2 Критерий передачи искажений в смежную сеть	57
3.3 Обеспечение электромагнитной совместимости технических средств в сети 10 кВ	61
3.4 Выводы по 3 главе	64
Заключение	65
Список использованных источников	66

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данной магистерской работе использовались следующие обозначения и

сокращения:

ЭМС – Электромагнитная совместимость

ЭМП – Электромагнитные помехи

ЭП – Электроприёмник

ГОСТ – Государственный общеобразовательный стандарт

ЭЭС – Электроэнергетические системы

ЭМО – Электромагнитная обстановка

ФЭП - Фотоэлектрический преобразователь

КЭ - Качество электроэнергии

ПКЭ - Показатели качества электрической энергии

МС - Microcomputer Circuit Analysis Program (MicroCAP)

Matlab – (сокр. от англ. Matrix Laboratory) матричная лаборатория

КЗ – Короткое замыкание

СИГРЭ – CIGRE (от французского Conseil International des Grands Réseaux Électriques) Международный совет по большим электроэнергетическим системам

АБ – Аккумуляторная батарея

НГ VDC – Нагрузка постоянного напряжения

НГ VAC - Нагрузка переменного напряжения

РЩПБ –Электрораспределительный щит питания с берега

K_U - Коэффициент несинусоидальности кривой напряжения

δK_U - Кондуктивная электромагнитная помеха

$\Psi(K_U)$ – Плотность вероятности распределения величины K_U

$M[K_U]$ – Математическое ожидание величины K_U

$\sigma[K_U]$ – Средние квадратические отклонения величины K_U

γ – Угол коммутации

u_k – Напряжение короткого замыкания

ВВЕДЕНИЕ

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств в ЭЭС возникает у приёмников электрической энергии и в системах распределения этой энергии. Если нарушается их нормальное функционирование обнаруживается наличие электромагнитных влияний.

Для оценки общетехнических состояний введен термин – качество функционирования технических средств: совокупность показателей технического средства, характеризующих его способность удовлетворять требованиям эксплуатации [1].

При несинусоидальных и несимметричных напряжениях усложняется электромагнитная обстановка (ЭМО), возрастает вероятность повреждения изоляции. Источниками искажений являются синхронные генераторы электростанций, силовые трансформаторы, работающие при повышенных значениях магнитной индукции в сердечнике (при повышенном напряжении на их выводах), преобразовательные устройства переменного тока в постоянный и электроприемники с нелинейными вольт - амперными характеристиками (или нелинейные нагрузки).

Искажения, создаваемые синхронными генераторами и силовыми трансформаторами, малы и не оказывают существенного влияния на систему электроснабжения и на работу электроприёмников. Главной причиной искажений являются вентильные преобразователи, электродуговые сталеплавильные и руднотермические печи, установки дуговой и контактной сварки, преобразователи частоты, индукционные печи, ряд электронных технических средств (телевизионные приемники, ПЭВМ), газоразрядные лампы и др. Электронные приемники электроэнергии и газоразрядные лампы создают при своей работе невысокий уровень гармонических искажений на выходе, но общее количество таких электроприёмников (ЭП) велико. Из-за этого обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Соответствие уровней ЭМС для кондуктивных электромагнитных помех требованиям ГОСТ 13109-97 необходимо: для обеспечения мероприятий по защите жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного имущества и по охране окружающей среды; для повышения технико-экономических показателей производств и качества выпускаемой ими продукции.

ГОСТ Р 50397-92 вводит понятие влияния электромагнитной помехи (ЭМП): снижение показателей качества функционирования технического средства, вызванного ЭМП [1]. На рисунке 1.1 приведена схема влияния источника ЭМП на рецептор [2].

Потребителями автономного источника электрической энергии чаще всего являются коммунальные потребители или небольшие предприятия. Но и здесь необходимо соблюдение норм качества электроэнергии.

Качество электроэнергии является составляющей электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду. Под электромагнитной совместимостью понимают способность оборудования нормально функционировать, не создавая недопустимых электромагнитных помех для другого оборудования, функционирующего в той же среде.

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы систем электроснабжения и линии связи. Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;
- старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы;
- ложная работа оборудования.

Резонансы в системах электроснабжения обычно рассматриваются применительно к конденсаторам, в частности к силовым конденсаторам. При превышении гармониками тока уровней, предельно допустимых для конденсаторов, последние не ухудшают свою работу, однако через некоторое время выходят из строя.

Другой областью, где резонансы могут приводить к выходу из строя элементов оборудования, являются системы управления нагрузкой с помощью тональных частот. Для того, чтобы предотвратить поглощение сигнала силовыми конденсаторами, их цепи разделяют настроенным последовательным фильтром (фильтр-"пробка"). В случае местного резонанса гармоники тока в цепи силового конденсатора резко возрастают, что приводит к отказу настроенного конденсатора последовательного фильтра. Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводниках статора и ротора из-за вихревых токов и поверхностного эффекта при этом больше, чем определяемые омическим сопротивлением. Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, приводят к дополнительным потерям.

В индукционном двигателе с ротором со скошенными пазами и пульсирующими магнитными потоками в статоре и роторе высшие гармоники вызывают дополнительные потери в стали. Величина этих потерь зависит от угла скоса пазов и характеристик магнитопровода. Среднее распределение

потерь от высших гармоник характеризуется следующими данными; обмотки статора 14 %; цепи ротора 41 %; торцевые зоны 19 %; асимметричные пульсации 26 %. За исключением потерь на асимметричные пульсации их распределение в синхронных машинах приблизительно аналогично.

Дополнительные потери - одно из самых отрицательных явлений, вызываемое гармониками во вращающихся машинах. Они приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с ротором типа "беличья клетка" допускают более высокие потери и температуру, чем двигатели с фазным ротором. Некоторые руководства ограничивают допустимый уровень тока обратной последовательности в генераторе 10 %, а уровень напряжения обратной последовательности на вводах индукционных двигателей 2 %. Допустимость гармоник в этом случае определяют по тому, какие уровни напряжений и токов обратной последовательности они создают.

Токи гармоник в статоре машины вызывают движущую силу, приводящую к появлению на валу вращающих моментов в направлении вращения магнитного поля гармоники. Обычно они очень малы и к тому же частично компенсируются из-за противоположного направления. Несмотря на это, они могут привести к вибрации вала двигателя.

Гармоники тока в линиях электропередачи приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения. В кабельных линиях гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимального значения амплитуды. Это, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабеля и стоимость ремонтов. В линиях сверхвысокого напряжения гармоники напряжения по той же причине могут вызывать увеличение потерь на корону.

Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь на гистерезис и потерь, связанных с вихревыми токами в стали, а так же потерь в обмотках. Сокращается также срок службы изоляции. Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в преобразовательном трансформаторе, так как наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоники тока в трансформаторе. Поэтому требуется устанавливать большую мощность трансформатора. Наблюдаются также локальные перегревы бака трансформатора. Отрицательный аспект воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке.

Дополнительные потери в электрических конденсаторах приводят к их перегреву. В общем случае конденсаторы проектируются так, чтобы допускать

определенную токовую перегрузку. Конденсаторы, выпускаемые в Великобритании, допускают перегрузку 15%, в Европе и Австралии – 30%, в США – 80%, в СНГ – 30%. При превышении этих величин, наблюдающихся в условиях повышенных напряжений высших гармоник на вводах конденсаторов, последние перегреваются и выходят из строя.

Гармоники могут нарушать работу устройств защиты или ухудшать их характеристики. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства. Цифровые реле и алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или точки пересечения нуля, особенно чувствительны к гармоникам. Чаще всего изменения характеристик несущественны. Большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20%. Однако увеличение доли мощных преобразователей в сетях может в будущем изменить ситуацию.

Проблемы, возникающие из-за гармоник, различны для нормальных и аварийных режимов и ниже рассмотрены отдельно.

Влияние гармоник в аварийных режимах. Устройства защиты обычно реагируют на напряжение или ток основной частоты, а все гармоники в переходном режиме либо отфильтровываются, либо не воздействуют на устройство. Последнее характерно для электромеханических реле, особенно используемых в максимальной токовой защите. Эти реле имеют большую инерцию, что делает их практически не чувствительными к высшим гармоникам.

Более существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, строящейся на измерении сопротивления. Дистанционная защита, в которой производится измерение сопротивлений на основной частоте, может давать значительные ошибки в случае наличия в токе короткого замыкания высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток короткого замыкания течет через землю (сопротивление земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма высока.

В случае металлического короткого замыкания в токе преобладает основная частота. Однако в связи с насыщением трансформатора возникает вторичное искажение кривой, особенно в случае большой апериодической составляющей в первичном токе. При этом также возникают проблемы обеспечения нормальной работы защиты.

В установившихся режимах работы нелинейность, связанная с перевозбуждением трансформатора, вызывает только гармоники нечетного порядка. В переходных режимах могут возникнуть любые гармоники, наибольшие амплитуды имеют обычно 2- и 3-я. Однако при правильном проектировании большинство из перечисленных проблем легко разрешаются.

Правильный выбор оборудования устраняет множество трудностей, связанных с измерительными трансформаторами. Фильтрация гармоник, особенно в цифровых защитах, наиболее важна для дистанционных защит. Работы, выполненные в области цифровых способов фильтрации, показали, что хотя алгоритмы такой фильтрации часто достаточно сложны, получение нужного результата не представляет особых трудностей.

Влияние гармоник на системы защиты в нормальных режимах работы электрических сетей. Низкая чувствительность устройств защиты к параметрам режима в нормальных условиях обуславливает практическое отсутствие проблем, связанных с гармониками в этих режимах. Исключение составляет проблема, связанная с включением в сеть мощных трансформаторов, сопровождающимся броском намагничивающего тока. Амплитуда пика зависит от индуктивности трансформатора, сопротивления обмотки и момента времени, в который происходит включение. Остаточный поток в момент перед включением несколько увеличивает или уменьшает амплитуду в зависимости от полярности потока по отношению к начальному значению мгновенного напряжения. Так как ток на вторичной стороне в течение намагничивания отсутствует, большой первичный ток может вызвать ложное срабатывание дифференциальной защиты. Наиболее простым способом исключения ложных срабатываний является использование задержки времени, однако это может привести к серьезному повреждению трансформатора, если авария произойдет во время его включения. На практике нехарактерную для сетей 2-ю гармонику, присутствующую в токе включения, используют для блокировки защиты, хотя защита остается достаточно чувствительной к внутренним повреждениям трансформатора во время включения.

Бытовая аппаратура также является источником высших гармоник, так как во многом с целью автоматизации управления оснащена устройствами с нелинейными характеристиками.

В цветных телевизорах используются транзисторные регуляторы с тщательно разработанными защитами от перенапряжений и сверхтоков и малым потреблением мощности от электрической сети. Однако большое число телевизоров, подключенных к сети сводит на нет уменьшение амплитуды тока в каждом из них. Наибольшее значение в токе, потребляемом телевизором, составляет 3-ая гармоника. По данным СИГРЭ коэффициент искажения синусоидальности напряжения, обусловленный работой телевизоров, может достигать 1% даже в сетях 220 кВ. Эти гармоники могут вызвать искажения изображения и изменение яркости в телевизорах.

Другие бытовые приборы, радиоприемники, стереосистемы, зарядные устройства и т.п. также генерируют токи, создающие гармоники кратные трем.

Существенным источником таких гармоник являются люминесцентные лампы. При этом гармоники кратные трем от разных источников практически совпадают по фазе и, следовательно, суммируются алгебраически, т.е. взаимной компенсации их естественным путем не происходит. При определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

Существуют пределы на допустимые уровни искажений в сетях, питающих компьютеры и системы обработки данных. В некоторых случаях они выражаются в процентах от номинального напряжения (для компьютера IBM - 5%) либо в виде отношения пика напряжения к действующему значению (CDC устанавливает допустимые его пределы значениями $1,41 \pm 0,1$).

Вырезы на синусоиде напряжения, возникающие во время коммутации вентилей, могут влиять на синхронизацию другого подобного оборудования или устройств, управление которыми осуществляется в момент перехода кривой напряжения нулевого значения.

Теоретически гармоники могут влиять на оборудование с тиристорно-регулируемой скоростью вращения несколькими способами:

- вырезы на синусоиде напряжения вызывают неправильную работу из-за пропусков зажигания тиристоров;
- гармоники напряжения могут вызвать зажигание не в требуемый момент;
- возникающий резонанс при наличии разных типов оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин.

Описанные выше воздействия могут ощущаться и другими потребителями, присоединенными к той же сети. Если потребитель не испытывает затруднений с тиристорно-управляемым оборудованием в своих сетях, он вряд ли окажет влияние на других потребителей. Потребители, питающиеся от разных шин, теоретически могут влиять друг на друга, однако электрическая удаленность снижает вероятность такого взаимодействия.

Измерительные устройства обычно калибруются при чисто синусоидальном напряжении и увеличивают погрешность при наличии высших гармоник. Величина и направление гармоник являются важными факторами, так как знак погрешности определяется направлением гармоник. Погрешности измерения, вызываемые гармониками, сильно зависят от типа измерительной аппаратуры. Обычные индукционные счетчики, как правило, завышают показания на несколько процентов (по 6%) при наличии у потребителя источника искажения. Такие потребители оказываются автоматически наказанными за внесение искажений в сеть, поэтому в их собственных интересах установить соответствующие средства для подавления этих искажений. Количественных данных о влиянии гармоник на точность измерения максимума нагрузки нет.

Влияние гармоник на точность измерения максимума нагрузки предположительно такое же, как и на точность измерения энергии. Точное измерение энергии независимо от формы кривых тока и напряжения обеспечивается электронными счетчиками, имеющими более высокую стоимость.

Гармоники оказывают воздействие и на точность измерения реактивной мощности, которая четко определена лишь для случая синусоидальных токов и напряжения, и на точность измерения коэффициента мощности. Редко упоминается влияние гармоник на точность поверки и калибровки приборов в лабораториях, хотя эта сторона вопроса также важна.

Гармоники в силовых цепях вызывают шумы в цепях связи. Малый уровень шума приводит к определенному дискомфорту, при его увеличении часть передаваемой информации теряется, в предельных случаях связь становится вообще невозможной. В связи с этим при любых технологических изменениях систем электроснабжения и систем связи необходимо рассматривать влияние линий электропередачи на линии телефонной связи. Воздействие гармоник на шумы в телефонных линиях зависит от порядка гармоники. В среднем система телефонный аппарат - человеческое ухо имеет функцию чувствительности с максимальным значением на частоте порядка 1 кГц. Для оценки влияния различных гармоник на шумы в телефоне используются коэффициенты, представляющие собой сумму гармоник, взятых с определенными весами. Токи гармоник в трех фазах не полностью компенсируют друг друга из-за неравенства амплитуд и фазовых углов и воздействуют на телекоммуникации возникающим при этом током нулевой последовательности (аналогично токам замыкания на землю и токам в земле от тяговых систем). Влияние может быть также вызвано самими токами гармоник в фазах вследствие различия расстояний от фазных проводов до расположенных поблизости линий телекоммуникации. Эти типы влияния могут быть уменьшены правильным выбором трасс линий, однако при неизбежных пересечениях линий такое влияние возникает. Особенно сильно оно проявляется в случае вертикального расположения проводов линии электропередачи и при транспозиции проводов линии связи вблизи от линии электропередачи. При больших расстояниях (более 100 м) между линиями ток нулевой последовательности оказывается основным влияющим фактором, При снижении номинального напряжения линии электропередачи влияние падает, но оно оказывается заметным из-за использования общих опор или траншей для прокладки силовых линий низкого напряжения и линий связи.

Исследования Горелова В.П., Дьякова А.Ф., Ивановой Е.В., Короткевича М.А., Манусова В.З., Сальникова В.Г. и др. охватывают различные аспекты

обеспечения ЭМС технических средств. Однако, рассматриваемая проблема многогранна и одна из научно-технических задач – повышение качества функционирования сети напряжением 0,4 кВ при кондуктивных ЭМП, распространяющихся по проводам, не решена. Поэтому тема диссертации является **актуальной**.

Объектом исследования являются распределительные электрические сети низкого напряжения общего назначения.

Предметом исследования являются процессы искажения синусоидальности напряжения в сетях общего назначения.

Идея работы заключается в установлении углубленных связей с помощью процессов искажения синусоидальности напряжения при работе электроприемников и, воздействуя на которые можно повысить качество функционирования сетей.

Целью работы является разработка научных положений и рекомендаций, позволяющих повысить эффективность функционирования электрических сетей общего назначения. Для достижения этой цели в работе ставились и решались следующие **взаимосвязанные задачи**:

- исследование содержания проблемы повышения качества функционирования сетей 0,4 кВ;
- экспериментальные исследования кондуктивных электромагнитных помех по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения;
- разработка математической модели критерия передачи искажений из сети 10 кВ в смежную сеть – электроэнергетическую систему 0,4 кВ.

Методы исследования. В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований, методы теоретических основ электротехники, методы математической статистики и теории вероятностей (теория производящих функций, теория ошибок), методы системного анализа. Экспериментальные исследования выполнялись комплексным методом с применением специальных программ MatLab и MicroCAP для расчётов на компьютере. Программа MicroCAP позволяет создавать проектируемые аналоговые, цифровые и смешанные аналого-цифровые электрические схемы, выполнять их ввод для моделирования и получения характеристик, изменять параметры схем для получения требуемых характеристик.

Программа позволяет выполнять анализ нелинейных электронных схем по постоянному току, расчет переходных процессов, строить частотные характеристики и графики результатов моделирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: отбором значимых для проведения научных исследований процессов и специальных программ MatLab и MicroCAP;

принятыми уровнями допущений при математическом описании явлений; достаточным объёмом исследований и практической реализацией основных выводов и рекомендаций.

На защиту выносятся:

- Математическая модель критерия передачи искажений из сети 10 кВ в смежную сеть – электроэнергетическую систему 0,4 кВ
- Рекомендации по повышению качества функционирования сетей напряжением 0,4 кВ.

Научная новизна работы заключается в развитии теоретических основ ЭМС технических средств в ЭЭС. В рамках решаемой автором научной задачи она характеризуется следующим новым научным положением:

разработана математическая модель критерия передачи искажений из сети 10 кВ в смежную сеть 0,4 кВ.

Практическая ценность работы заключается в том, что внедрение следующих научных положений в проектную и эксплуатационную практику обеспечивает повышение уровня ЭМС электрических сетей 0,4 кВ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и региональных конференциях:

1. «X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых», которая состоялась в Восточно-Казахстанском Государственном Университете им. Д.Серикбаева.
2. В XXXVI научно-практической конференции МАН РК «Интеграция образования и науки — шаг в будущее», ИнЕУ.
3. В Региональной научно-технической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием) в Омском институте водного транспорта (филиал) ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»
4. Во II Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве», ИнЕУ.

ГЛАВА 1 СОДЕРЖАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭМС В СЕТЯХ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

1.1 Проблемы ЭМС в электрических сетях

Нормальная ЭМО обеспечивает допустимые уровни ЭМС технических средств в электрических сетях [18, 21, 32]. ЭМС – способность технических средств функционировать с заданным качеством в заданной ЭМО и не создавать недопустимых ЭМП другим техническим средствам. Техническое средство – это оборудование, аппаратура, изделие функционирование которого основано на законах электротехники и электроники. Проблемы ЭМС чаще всего возникают у приемников электроэнергии, и как следствие нарушается их нормальное функционирование. В этом случае электроприемники становятся рецепторами, т.е. техническими средствами, реагирующими на ЭМП.

ЭМП достигают рецептора различными путями. На рисунке 1.1 приведен механизм связи источника ЭМП и рецептора.

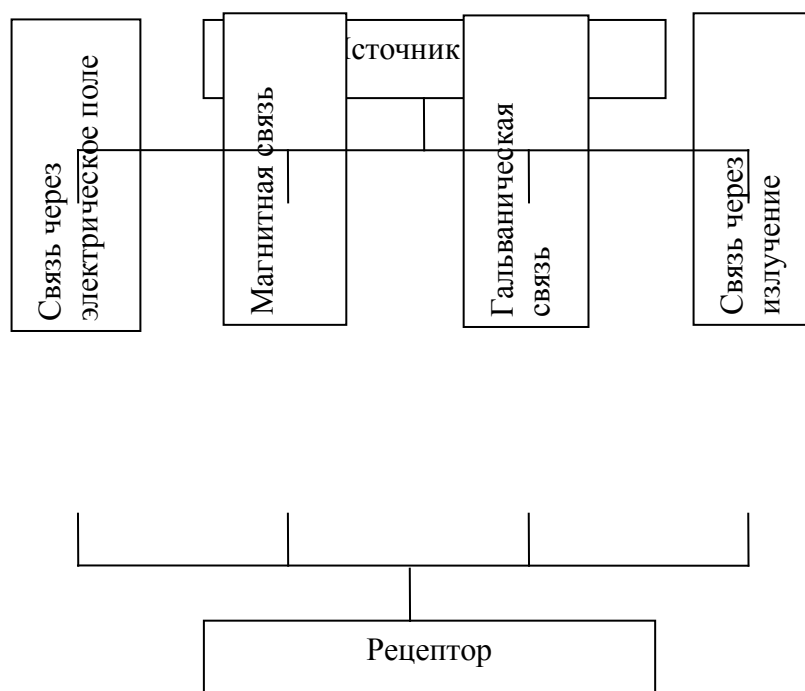


Рисунок 1.1 - Механизм связи источника ЭМП и рецептора

В электроэнергетике гальваническая связь между приемниками электроэнергии наблюдается в основном через общие питающие сети и контуры заземления. При этом электроприёмники могут подвергаться воздействию коммутационных и грозовых перенапряжений, гармоническому воздействию, перегрузкам и т.д. [32]. Электромагнитные помехи через емкости рассеяния

оказывают существенное влияние на средства связи, цепи вторичной коммутации электрических подстанций, устройств автоматики и учета электроэнергии и т.д

Магнитная или индуктивная связь возникает между двумя или несколькими контурами с током. Переменный ток в первом контуре вызывает переменное магнитное поле, которое индуцирует в других контурах, подверженных помехам, напряжение, накладывающееся на полезный сигнал. Воздействие магнитного поля первого контура на другие моделируется взаимной индуктивностью или электродвижущей силой. Появление взаимной индукции в цепи рецептора обуславливает появление ЭМП [41].

Связь через излучение это любая связь через электромагнитное излучение, когда электрическое и магнитные поля возникают одновременно и связаны через волновое сопротивление.

Выделяются следующие виды проблем ЭМС: влияние качества электроэнергии на электрическую сеть, помехоустойчивость технических средств и помехоэмиссия из технических средств. На основании системного анализа содержание проблемы ЭМС технических средств в электроэнергетической системе представлено на рисунке 1.2.

Проблемы ЭМС технических средств в электрических сетях, обусловленные гальваническими связями источников ЭМП и рецепторов, имеются в каждой региональной электроэнергетической системе. Гальванические связи по комбинациям и условиям их возникновения многообразны, поэтому разработка рекомендаций по минимизации ЭМП должна быть индивидуальна для каждой электрической сети.

Отметим, что рассматриваемая схема отображает модель действия ЭМП между двумя системами: источником ЭМП и рецептором. Если принять это во внимание, то представленная схема отображает все случаи взаимодействия, является основой для всевозможных исследований [13,19, 28, 36, 61].

Следует уточнить, что источником ЭМП может быть источник искусственного или естественного происхождения, который создаёт или может создать ЭМП. Генерируемая источником энергия может излучаться в пространство или распространяться кондуктивным путём. Излучение представляет явление, процесс, при котором энергия излучается источником в пространство в виде электромагнитных волн [56,58].

Механизм связи электромагнитных влияний источника ЭМП и рецептора является многоканальным, так как природа электромагнитных влияний не однозначна.

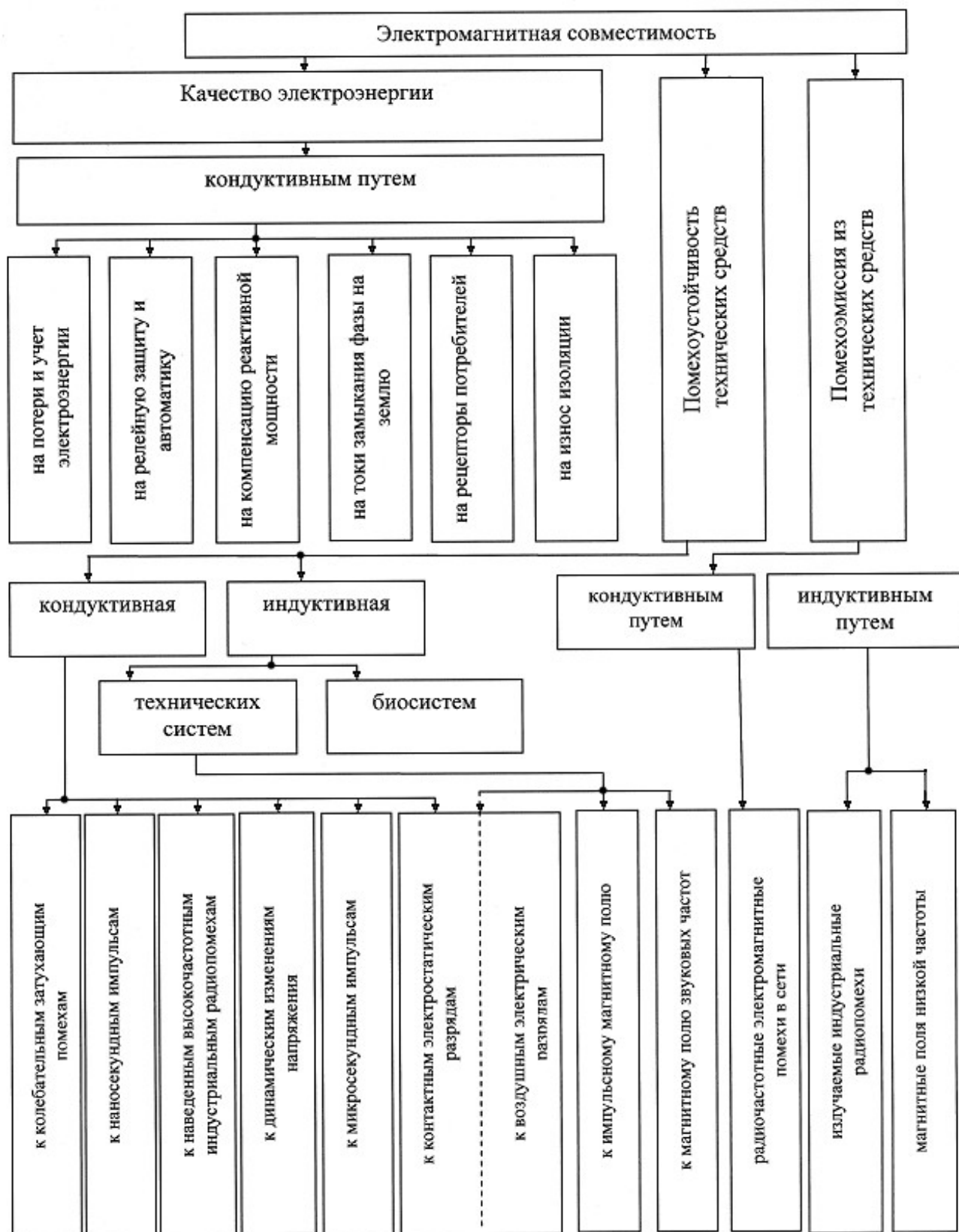


Рисунок 1.2 - Содержание проблемы ЭМС технических средств в электроэнергетической системе

На рисунке 1.3 приведена схема влияния источника ЭМП на рецептор [31, 40].

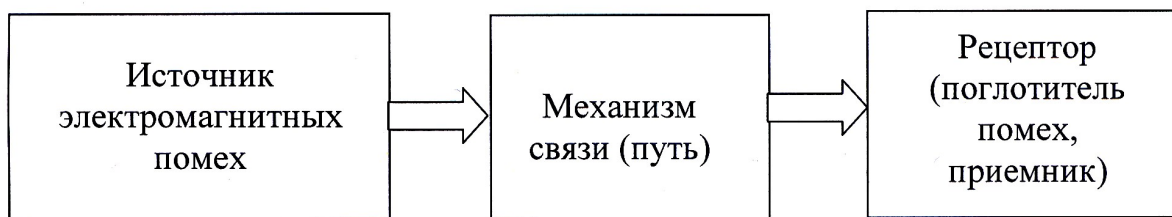


Рисунок 1.3 - Схема влияния электромагнитных помех на рецептор

Применительно к сформулированным задачам исследования на рисунке 1.4 приведена схема структуры электроснабжения от автономного источника питания.

Ретроспективный анализ выполненных исследований в области ЭМС технических средств [9, 28, 40, 41] позволяет сформулировать следующий вывод:

- наиболее негативное влияние на работу силового электрооборудования напряжением 0,4 кВ оказывают кондуктивные ЭМП, распространяющиеся по сетям (гальваническая связь). Эти кондуктивные ЭМП обусловлены нестандартными показателями качества электроэнергии (КЭ) в электрических сетях. Они отображают особенности работы сетей. Исследования этих помех и является основной задачей при решении проблемы повышения качества функционирования сетей 0,4 кВ.

1.2 Основные источники кондуктивных ЭМП в сетях 0,4 кВ

Электроприёмники и аппараты, присоединенные к электрическим сетям, предназначены для работы при определенных номинальных параметрах: номинальной частоте, номинальном напряжении, номинальном токе, изменяющемся по синусоидальному закону. При работе ЭП возможно отклонение от этих требований, определяемых показателями качества электрической энергии (ПКЭ).

На ПКЭ заметное влияние оказывают параметры сетей, а электроприёмники и аппараты могут присоединяться в их различных точках. Например, значение напряжения на зажимах ЭП зависят от протяженности и схемы электрической сети. В свою очередь и ЭП влияют на КЭ, внося искажения напряжения. Общим параметром режима для ЭП является напряжение. Поэтому все ПКЭ представляют собой характеристики напряжения.

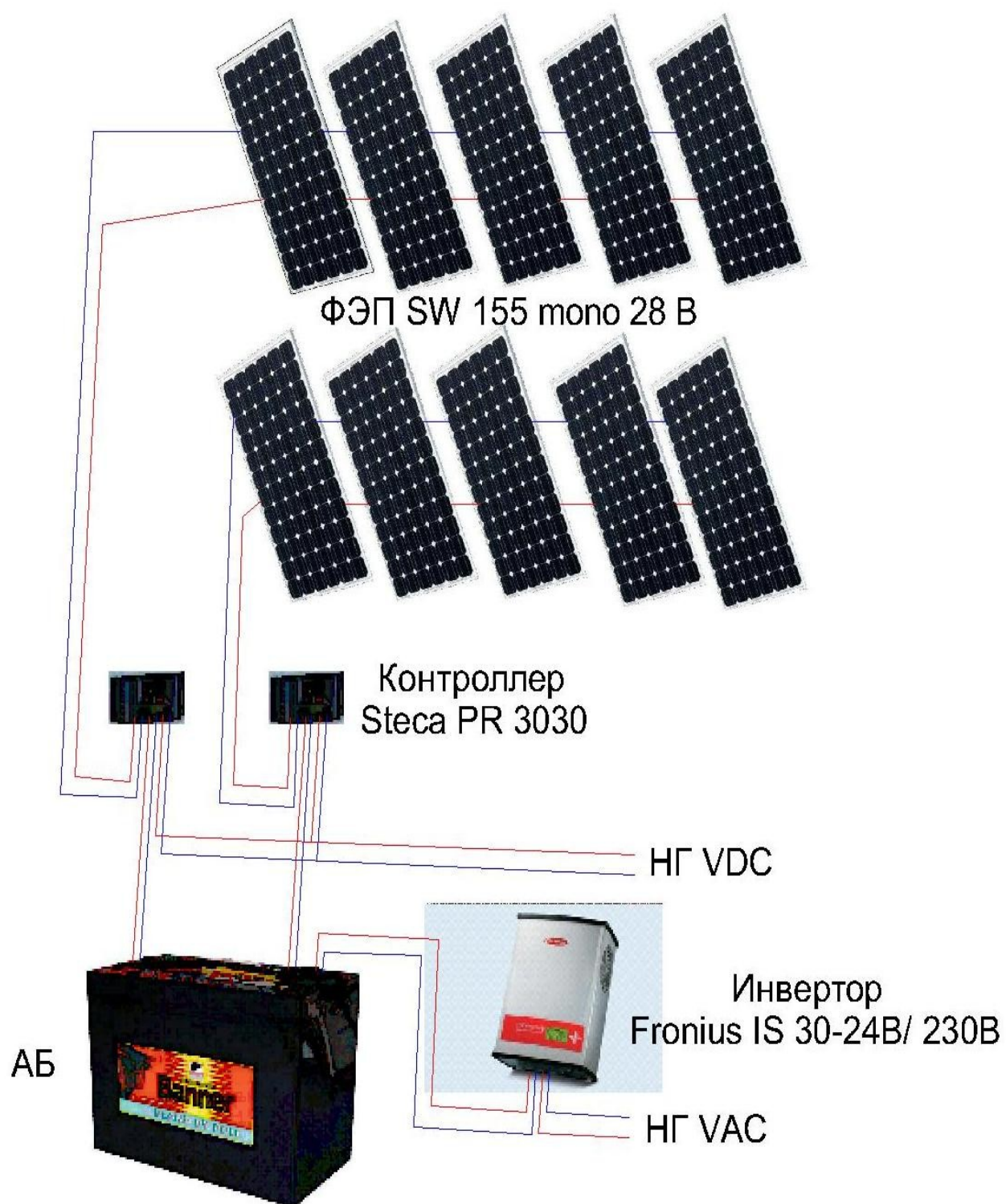


Рисунок 1.4 - Фотопреобразовательная система мощностью 1,55 кВт

Основным ПКЭ, характеризующим уровень ЭМС является коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.

Кондуктивные ЭМП, характерные для электрических сетей обуславливаются работой различных несимметричных приемников электроэнергии, потребителей с резкопеременной нагрузкой, приемниками с нелинейной вольтамперной характеристикой. Источниками этих помех являются следующие технические средства.

Вентильные преобразователи. Работа преобразователей обуславливается питающей сетью переменного тока, поэтому они отличаются ярко выраженной нелинейностью вольтамперных характеристик. При наличии этого общего свойства функции, выполняемые такими преобразователями, существенно различаются. Так, выпрямители осуществляют преобразование переменного тока в постоянный. Инверторы преобразуют энергию источника постоянного тока в переменный с отдачей ее в сеть. Преобразователи частоты преобразуют энергию сети переменного тока в энергию переменного тока с частотой, отличающейся от частоты питающей сети. Преобразователи переменного напряжения предназначены для изменения подводимого к приемнику напряжения при питании его на переменном токе, и, следовательно, изменения мощности, передаваемой электроприемнику.

Формы кривых токов и напряжений преобразователей близки к идеальным и в международной практике приняты за основу для получения характеристик гармоник стандартных схем преобразователей. На эти данные обычно ссылаются при оценке гармоник в кривых, отличающихся от синусоиды [56, 67].

Мощным источником высших гармоник является тиристорный электропривод на базе вентильного каскада. Этот электропривод предназначен для механизмов газоперекачивающих станций магистральных трубопроводов, у которых изменение технологического режимов достигается регулированием частоты вращения синхронного двигателя.

Электросварочные установки могут являться причиной нарушения нормальных условий работы для других ЭП. В частности, сварочные агрегаты, мощность которых в настоящее время достигает 1500 кВт в единице, вызывают значительно большие колебания напряжения в электрических сетях, чем, например, пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Кроме того, эти колебания напряжения происходят длительно и с широким диапазоном частот, в том числе и в самом неприятном для установок **электрического освещения** диапазоне (порядка 10 Гц).

Электротермические установки в зависимости от метода нагрева делятся на группы: дуговые печи, печи сопротивления прямого и косвенного

действия, электронные плавильные печи, вакуумные, шлакового переплава, индукционные печи. Данная группа ЭП также оказывает неблагоприятное влияние на питающую сеть, например, дуговые печи, которые могут иметь мощность до 10 МВт, в настоящее время сооружаются как однофазные. Это приводит к нарушению симметрии токов и напряжений (последнее происходит в связи с падениями напряжения на сопротивлениях сети от токов разных последовательностей). Кроме того, дуговые печи, как и вентильные установки, являются нелинейными ЭП с малой инерционностью. Поэтому они приводят к несинусоидальности токов, а, следовательно, и напряжений.

Современная электрическая нагрузка квартиры (коттеджа) характеризуется широким спектром бытовых ЭП, которые по их назначению и влиянию на электрическую сеть можно разделить на следующие группы: пассивные потребители активной мощности (лампы накаливания, нагревательные элементы утюгов, плит, обогревателей); ЭП с асинхронными двигателями, работающими в трехфазном режиме (привод лифтов, насосов - в системе водоснабжения и отопления и др.); ЭП с асинхронными двигателями, работающими в однофазном режиме (привод компрессоров холодильников, стиральных машин и др.); ЭП с коллекторными двигателями (привод пылесосов, электродрелей и др.); сварочные агрегаты переменного и постоянного тока (для ремонтных работ в мастерской и др.); выпрямительные устройства (для зарядки аккумуляторов и др.); радиоэлектронная аппаратура (телевизоры, компьютерная техника и др.); высокочастотные установки (печи СВЧ и др.); лампы люминесцентного освещения.

Воздействие каждого отдельно взятого бытового ЭП незначительно, совокупность же ЭП, подключаемых к шинам 0,4 кВ трансформаторной подстанции, оказывает существенное влияние на питающую сеть.

Высшие гармоники тока и напряжения вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения: в линиях электропередачи, трансформаторах, электрических машинах, статических конденсаторах, так как сопротивления этих элементов зависят от частоты.

Так, например, емкостное сопротивление конденсаторов, устанавливаемых в целях компенсации реактивной мощности, с повышением частоты подводимого напряжения уменьшается. Поэтому, если в напряжении питающей сети есть высшие гармоники, то сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц. Из-за этого в конденсаторах, предназначенных для компенсации реактивной мощности, даже небольшие напряжения высших гармоник могут вызвать значительные токи гармоник. На предприятиях с большим удельным весом

нелинейных нагрузок батареи конденсаторов работают плохо. Они или отключаются защитой от перегрузки по току или за короткий срок выходят из строя из-за вспучивания банок (или ускоренного старения изоляции). Известны случаи, когда на предприятиях с развитой кабельной сетью напряжением 6 –10 кВ батареи конденсаторов оказываются в режиме резонанса токов (или близких к этому режиму) на частоте какой – либо из гармоник, что приводит к опасной перегрузке их по току.

Высшие гармоники вызывают:

- паразитные поля и электромагнитные моменты в синхронных и асинхронных двигателях, которые ухудшают механические характеристики и КПД машины. В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей наблюдается:

- ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей;

- ухудшение коэффициента мощности ЭП;

- ухудшение или нарушение работы устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники;

- погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, которые приводят к неполному учету потребляемой электроэнергии;

- нарушение работы самих вентильных преобразователей при высоком уровне высших гармонических составляющих;

- наличие высших гармоник неблагоприятно сказывается на работе не только электрооборудования потребителей, но и электронных устройствах в энергосистемах;

- для некоторых установок (система импульсно-фазового управления вентильными преобразователями, комплектные устройства автоматики и др.) допустимые значения отдельных гармоник тока (напряжения) указываются изготовителем в паспорте изделия.

Согласно новой концепции предоставления технологических услуг обеспечение надежности электрооборудования должно достигаться путём реализации трёх основных направлений: своевременным и качественным ремонтом (42,5%); техническим перевооружением действующих энергообъектов (30%); модернизацией электрооборудования (10%). Техническое перевооружение и модернизация требуют значительных инвестиций в электроэнергетику и обуславливают отдельную сложную технико-экономическую проблему.

Сложившаяся ситуация в электроэнергетике такова, что в ближайшие десятилетия бесперебойное электроснабжение будет определяться надежностью действующего в настоящее время оборудования региональных ЭЭС. Поэтому актуален поиск путей продления ресурса действующего электрооборудования и сетей за счёт улучшения параметров ЭМО, обеспечивающих нормированные уровни электромагнитной совместимости технических средств.

К основным направлениям совершенствования эксплуатации электрических сетей от 6 до 35 кВ относятся [36, 37, 39]:

- внедрение высокопроизводительных механизмов и машин для выполнения ремонтных работ и технического обслуживания (малогабаритные машины для разработки грунта, кабелеукладчики, автомастерские, передвижные электролаборатории для отыскания мест повреждения линий, вспомогательные механизмы, средства малой механизации, средства радиосвязи);

- внедрение автоматизированной системы управления производством, где решаются задачи автоматизации планирования работ технического обслуживания и ремонта, оценки износа изоляции силовых трансформаторов, управление техническими службами и другие технические задачи;

- внедрение автоматизированной системы диспетчерского управления, где решаются задачи оптимизации мест размыкания замкнутой электрической сети, расчёта электрических режимов с целью оценки их допустимости и формирования разрешений на вывод в ремонт и обратного включения того или иного оборудования и линий, коммерческого учёта и управления качеством электроэнергии;

- внедрение мониторинга кондуктивных ЭМП, обусловленных некачественной электроэнергией и распространяющихся по сетям, где решаются задачи защиты электрических сетей как рецепторов [20, 21] и др.

Наибольшее негативное влияние на работу силового оборудования (электродвигатели, генераторы, трансформаторы и т.д.) и передаточных устройств (линии электропередачи) напряжением 0,4 кВ и (6-10) кВ оказывают кондуктивные ЭМП, распространяющиеся по сетям (гальваническая связь). Эти помехи обуславливаются нестандартными (низкими) показателями КЭ в электрических сетях [7, 9, 14, 38 и др.].

Кондуктивные ЭМП, распространяющиеся через проводники электрической сети, увеличивают риск причинения «вреда жизни или здоровью граждан». В связи с этим должны выполняться требования директивных документов [1, 3, 60].

Таким образом, учитывая изложенное и результаты обзора технической

литературы [14, 15, 18, 19, 22-25, 34-37, 41-45, 50-54, 66] и директивных документов [3, 4, 10-13, 26, 28, 33] на рисунке 1.5 представлена взаимосвязь основных факторов, формирующих ЭМО в сетях 0,4 кВ ЭЭС при электроснабжении судна от береговой электрической сети. На механизм формирования кондуктивных ЭМП в береговой электрической сети оказывают влияния качество электрической энергии в электрической сети общего назначения, интегральные показатели сети (6-10) кВ — мощность трёхфазного короткого замыкания и ёмкостный фазы на землю I_c , рассчитанный при нормируемых показателях КЭ.

1.3 Системный подход к достижению цели исследований

В системных исследованиях электроэнергетических систем введены понятия простой, сложной и большой систем [39, 49]. Простой называют систему по уровню элементарных компонентов (элементов), которые могут быть точно количественно соизмеримы. При этом свойства простой системы достаточно полно характеризуется на основе свойств элементов, образующих систему. Под сложной системой понимают систему, в которой её составляющие компоненты (элементы) сами являются системами (подсистемами) со всей характерной сущностью системы (в первую очередь определяемой понятием целостности). Большими называют сложные иерархически построенные (многоуровневые) человеко-машинные системы, в которых пространственный (географический) фактор имеет существенное значение. Кратко сущность этой системы можно охарактеризовать, как реальную и целенаправленно развивающуюся систему. Это развитие осуществляется органами управления, располагающими неполной информацией о системе [14, 40].

В связи с изложенным на рисунке 1.4 представлена предполагаемая схема основных этапов достижения цели — повышения качества функционирования сети как рецептора. Для определения подходов к исследованию этой схемы воспользуемся методом эквивалентирования системного анализа [28, 35, 45].

В содержательном аспекте получили распространение два вида эквивалентирования — декомпозиция и агрегирование. Их главная задача — создание наиболее представительной по объёму и характеру описания процессов исходной модели (математической и физической).

Под декомпозицией понимается расчленение общей задачи описания сложной системы на подзадачи, их независимое решение и последующая увязка полученных результатов. Цель агрегирования по существу сводится к сокращению объёма задачи путём исключения из рассмотрения несущественной и малосущественной информации (связей системы). Поэтому

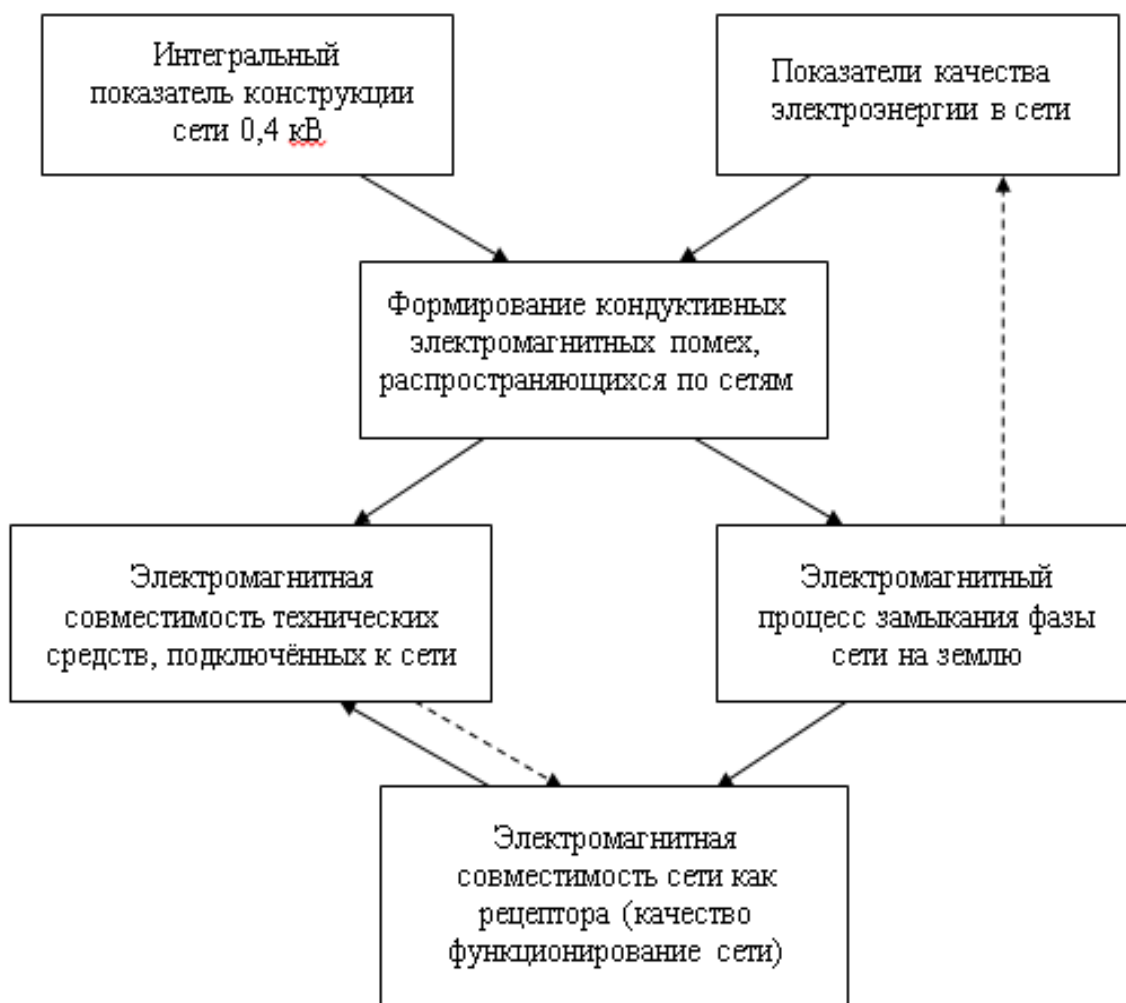


Рисунок 1.4 - Схема основных этапов исследования

основной алгоритм агрегированных преобразований заключается в наибольшем сокращении объёма составляющих исходной модели; другой возможный алгоритм – замена на более удобные для расчёта переменные или элементы; иногда оба эти алгоритма объединяются.

Под эквивалентированием, в формальном аспекте, понимается преобразование одной математической модели в другую, более простую в том или ином смысле, но соответствующую с определённой точностью исходной при сохранении в полученной модели требуемых свойств первичной модели. Применение ныне созданных формализованных методов декомпозиции и эквивалентирования математических моделей допустимо при предпосылке о том, что ранее кто-то и каким-то методом создал некую исходную математическую модель реальной системы. Эта модель далее используется как отправная для формализованных процедур декомпозиции и эквивалентирования.

В связи с этим в дальнейших исследованиях по теме работы используются уже разработанные: математические модели электрических сетей и режимов их работы; рекомендованные режимы нейтралей, а также методы и средства измерений и осциллографирования переходных процессов при замыкании фазы на землю; математические модели теории гармонического анализа (пакет программ MicroCAP); алгоритмы обеспечения ЭМС электрических сетей и технических средств; методы теории кондуктивных ЭМП, распространяющихся по сетям [2, 10, 12, 17, 18, 19, 21, 27, 44, 52, 61, 64]. При анализе полученных результатов исследований учитываются требования и рекомендации нормативно-технических документов (ГОСТы, руководящие указания, методические рекомендации).

Таким образом, главный аспект системного анализа применительно к задачам повышения качества функционирования сетей формулируется как обеспечение условий оптимального функционирования электрических сетей напряжением 0,4кВ.

1.4 Выводы по главе 1

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие положения.

1. Анализ содержания основных нормативно-технических документов электроэнергетики в части проблемы ЭМС технических средств, обусловленной некачественной электроэнергией в электрических сетях систем электроснабжения, позволяет утверждать, что отсутствуют методические указания по расчету кондуктивных электромагнитных помех, распространяющихся по сетям.

2. Параметрами ЭМС технических средств при некачественной электроэнергии в электрических сетях являются кондуктивные ЭМП, распространяющиеся по проводам.

ГЛАВА 2 КОНДУКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

2.1 Организационное обеспечение ЭМС

Организационное обеспечение ЭМС осуществляется путем применения нормативно-технической документации: действующих характеристик периодических несинусоидальных величин [64]; аналитического метода анализа питающего вентильный преобразователь тока [41], аналитического метода исследований (гармонический анализ) [67]; ГОСТ 13109-97 «Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [1]; РД 34.15.501-88 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения»; теории электрических цепей и т.д.

ГОСТ 13109-97 устанавливает показатели качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках, к которым присоединяются электрические сети, находящиеся в собственности различных потребителей электрической энергии (точки общего присоединения).

Нормы КЭ, устанавливаемые настоящим стандартом, являются уровнями электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения общего назначения. При соблюдении указанных норм обеспечивается электромагнитная совместимость электрических сетей систем электроснабжения общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии (приемников электрической энергии).

Нормы, установленные настоящим стандартом, применяют при проектировании и эксплуатации электрических сетей, а также при установлении уровней помехоустойчивости приемников электрической энергии и уровней кондуктивных электромагнитных помех, вносимых этими приемниками.

В Республике Казахстан приняты свои законы, анализ которых представляет практический интерес. Обусловлено это тем, что электроэнергетические системы Сибири и Урала Российской Федерации «связаны» между собой электрическими сетями Северного региона Республики Казахстан.

Закон Республики Казахстан «Об электроэнергетике» №438-1 от 16.07.99г. (статья 12) требует от участников отношений производства, передачи,

распределения и потребления электрической мощности, электрической и тепловой энергии обеспечивать качество подаваемой энергии потребителю в соответствии с требованиями, установленными государственными стандартами и иными нормативными документами по стандартизации. Статья 13 этого закона гласит «... электрическая мощность, электрическая и тепловая энергия являются товаром на рынке». Статья 16 этого закона даёт право потребителям электрической мощности, электрической и тепловой энергии «требовать от энергопроизводящей, энергопередающей и энергоснабжающей организации возмещения убытков, вызванных недопоставкой или поставкой некачественной электрической или тепловой энергии в соответствии с условиями заключённых договоров».

В случае нарушения требований, предъявляемых к качеству энергии, энергоснабжающая организация обязана возместить реальный ущерб. Если снижение показателей качества энергии произошло по вине потребителя, то ответственность возлагается на него.

Электрическая энергия является товаром и одним из основных энергоносителей, используемых сегодня в мире. Поэтому такой параметр торговой продукции как «качество» стал для электроэнергетики определяющим, так как круг потребителей данного товара очень широк — от жилых домов, школ, больниц до крупнейших предприятий и целых отраслей народного хозяйства.

Свойства электрической энергии, показатели и наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии приведены в таблице 2.1[5].

Правила пользования электрической энергией, утверждённые постановлением Правительства Республики Казахстан №1822 от 7.12.2000г., (статья 64) позволяют энергоснабжающей или энергопередающей организации, предупредив потребителя в сроки установленные договором, прекратить полностью или частично подачу ему электроэнергии, если снижение показателей качества электроэнергии произошло по его вине. Показатели качества электроэнергии на границе балансовой принадлежности электросети должны определяться на основе расчётов, опыта эксплуатации и вноситься в договор на электроснабжение. При этом договорные показатели качества электроэнергии должны соответствовать требованиям ГОСТ 13109-97. Статья 79 этих правил обязывает энергоснабжающую или энергопередающую организацию и потребителя электроэнергии осуществлять периодически контроль качества электрической энергии на границе балансовой принадлежности электрических сетей. Периодичность проверок качества электроэнергии устанавливается договором, а также по мере необходимости, но не реже одного раза в год.

Таблица 2.1 - Свойства электрической энергии, показатели качества и наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии

Свойства электрической энергии	Показатель качества электроэнергии	Наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение напряжения	Энергоснабжающая организация
Колебания напряжения	Размах изменения напряжения. Доза фликера	Потребитель с переменной нагрузкой
Несинусоидальность напряжения	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения. Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения	Потребитель с нелинейной нагрузкой
Несимметрия трёхфазной системы напряжений	Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности	Потребитель с несимметричной нагрузкой
Отклонение частоты	Отклонение частоты	Энергоснабжающая организация
Провал напряжения	Длительность провала напряжения	Энергоснабжающая организация
Импульс напряжения	Импульсное напряжение	Энергоснабжающая организация
Временное перенапряжение	Коэффициент временного перенапряжения	Энергоснабжающая организация

Задачами контроля качества электроэнергии являются [1]:

- проверка соответствия показателей качества электрической энергии требованиям ГОСТ 13109-97;
- выяснение причин несоответствия показателей качества электроэнергии указанному ГОСТу;
- определение ущерба от несоблюдения требований к качеству электроэнергии;

– выявление виновных в нарушении требований к отдельным показателям качества электроэнергии и предъявление к ним экономических штрафных санкций.

Приведённый обзор основных нормативно-законодательных актов Республики Казахстан показывает, что в Казахстане имеется нормативно-законодательная основа для деятельности в области электроэнергетики, позволяющая повысить надёжность, безопасность и экономичность электроэнергетических систем за счёт снижения кондуктивных электромагнитных помех и обеспечения электромагнитной совместимости технических средств в электрических сетях.

2.2 Методология исследования кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения

Алгоритм определения кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения излагается в соответствии с теорией повышения качества функционирования технических средств. Рассмотрение алгоритма начинается с обобщения двух известных положений [47, 50].

Во первых, отметим, что ГОСТом 13109-97 установлены уровни ЭМС технических средств в электрических сетях по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения. В таблице 2.2 приведены нормально допустимые и предельно допустимые значения этого коэффициента в точке общего присоединения к электрическим сетям с разным номинальным напряжением.

Во-вторых, величина K_U в электрических сетях является непрерывно распределённой случайной величиной, зависящей от многих случайных событий [8, 30, 31]. Коэффициент K_U связан с полем событий, характеризуется таблицей вероятностей [8, 43, 46]

$$\left(\begin{array}{c} K_{U1}, K_{U2}, K_{U3}, \dots, K_{Ui}, \dots, K_{Un} \\ p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n \end{array} \right) \quad (2.1)$$

где $K_{U1}, K_{U2}, K_{U3}, \dots, K_{Ui}, \dots, K_{Un}$ — различные значения в течение суток коэффициента $K_U, \%$;

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$ — вероятности появления значений этого коэффициента.

При превышении величинами $K_{U,i}$ нормально допустимого значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_{U,n}$ часть поля событий (2.1) обуславливает кондуктивную ЭМП, вызванную особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Достоверное значение этой кондуктивной ЭМП может быть определено только статистическими методами [8, 10, 28].

Таблица 2.2 - Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

Нормально допустимое значение, (%) при U_H , кВ				Предельно допустимое значение, (%) при U_H , кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12	8,0	6,0	3,0

Процесс возникновения кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения представляется математической моделью [52]

$$K_U [P(K_{U,n} \leq K_U \leq K_{U,\Pi}) > 0,05; P(K_{U,\Pi} < K_U < \infty) \neq 0] \subset \delta K_U, \quad (2.2)$$

где δK_U – кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения, %.

Таким образом, кондуктивная ЭМП δK_U появляется в сети тогда, когда вероятность нахождения величины K_U в течение суток в пределах $(K_{U,n}; K_{U,\Pi})$ превышает 0,05, а в пределах

$(K_{U,\Pi}, \infty)$ – не равна нулю. Эта

кондуктивная ЭМП появляются также при выполнении только одного условия [32].

Интегральная функция распределения случайной величины K_U в интервале $(K_{U,n}; K_{U,\Pi})$ определяется по формуле [32],

$$P(K_{U,n} \leq K_U \leq K_{U,\Pi}) = \int_{K_{U,n}}^{K_{U,\Pi}} \Psi(K_U) d(K_U), \quad (2.3)$$

где $\Psi(K_U)$ – плотность вероятности распределения величины K_U , 1/%.

Такая же функция распределения в интервале $(K_{U,\Pi}, \infty)$ рассчитывается по формуле [116]

$$P(K_{U,\Pi} < K_U < \infty) = \int_{K_{U,\Pi}}^{\infty} \Psi(K_U) d(K_U). \quad (2.4)$$

На основании теоремы о равенстве начальных моментов, следствия о равенстве центральных моментов распределения непрерывной случайной величины и её производящей функции имеем равенства

$$M[K_U] = M[\delta K_U]; \quad (2.5)$$

$$\sigma[K_U] = \sigma[\delta K_U], \quad (2.6)$$

где $M[K_U]$, $M[\delta K_U]$ – математическое ожидание, соответственно, величин K_U и δK_U , %.

$\sigma[K_U]$, $\sigma[\delta K_U]$ – средние квадратические отклонения этих же величин, %.

Следствия из теоремы единственности и теоремы непрерывности теории производящих функций позволяет записать

$$\Psi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\} = \Psi\{\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}, \quad (2.7)$$

где $\Psi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\}$ – плотность вероятности распределения случайной величины K_U , 1/%;

$\Psi\{\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}$ – тоже величины δK_U , 1/%.

Вероятность появления кондуктивной ЭМП составляет [28]

$$P(\delta K_U) = P(K_{U,n} \leq K_U \leq K_{U,\Pi}) + P(K_{U,\Pi} < K_U < \infty) - 0,05. \quad (2.8)$$

Приведённый алгоритм расчёта δK_U используется в исследовании для определения параметра качества функционирования сети 0,4 кВ.

2.3 Экспериментальные исследования кондуктивных ЭМП в сетях 0,4 кВ

2.3.1 Использование программы MicroCAP для определения ЭМП

MicroCAP — это универсальный пакет программ схемотехнического анализа, предназначенный для решения широкого круга задач. С его помощью можно создавать собственные макромодели, облегчающие имитационное моделирование без потери существенной информации о поведении системы.

MicroCAP является специализированным программным продуктом, позволяющей выполнять моделирование объектов и проводить их исследование и анализ [71].

Пакеты программ схемотехнического моделирования и проектирования семейства MicroCAP (Microcomputer Circuit Analysis Program – «Программа анализа схем на микрокомпьютерах») фирмы Spectrum Software относятся к наиболее популярным системам автоматизированного проектирования электронных устройств. Последние версии MicroCAP (далее MC), обладая большими сервисными возможностями, позволяют выполнять графический ввод и редактирование проектируемой схемы, проводить анализ характеристик устройств [6]. С помощью MC можно:

- осуществить анализ электрических схем по постоянному току;
- рассчитать переходные процессы;
- рассчитать частотные характеристики проектируемых схем;
- провести оптимизацию параметров схемы.

Программа MC содержит следующие режимы:

1. Анализ переходных процессов (Transient Analysis)
2. Расчет частотных характеристик (AC Analysis)
3. Расчет передаточных функций по постоянному току (DC Analysis)
4. Многовариантный анализ (Stepping)
5. Расчет режима по постоянному току (Dynamic DC)
6. Расчет режима по переменному току (Dynamic AC)
7. Расчет малосигнальных передаточных функций (Transfer Function)
8. Расчет чувствительности по постоянному току (Sensitivity)
9. Расчет нелинейных искажений (Distortion)
10. Вывод графиков характеристик в режиме Probe
11. Просмотр и обработка результатов моделирования

Для определения ЭМП пользуемся режимом расчета нелинейных искажений (Distortion) осуществляем вывод графиков, характеристик в режиме Probe, просмотр и обработку результатов моделирования.

2.3.2 ЭМП в электрических сетях от приемников электрической энергии

Любой прибор или устройство, потребляющее электроэнергию от сети и преобразующее ее в другие виды энергии, называют электроприёмником (ЭП). Каждый электроприёмник рассчитан на конкретное номинальное напряжение $U_{ном}$. Только при этом напряжении в сети изготовителями гарантируются нормальная работоспособность электроприборов, их потребительские качества, срок службы, надежность и безопасность работы [70].

Кроме номинального напряжения, каждый электроприёмник характеризуется потребляемой мощностью, измеряемой в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт). При известных номинальном напряжении и потребляемой мощности, можно рассчитать, какой ток потребляет электроприёмник из сети при работе.

В электротехнике существует такое понятие, как нагрузка. Нагрузкой для электросети является каждый подключенный к ней электроприёмник, а все электроприёмники вместе, подключенные к сети, создают общую нагрузку на сеть. Исходя из общей расчетной нагрузки определяются характеристики элементов системы электроснабжения дома, квартиры, коттеджа - сечение электропроводов, токи отключения устройств защиты, типы автоматических выключателей, мощность трансформаторов и другого оборудования.

Исследуемая сеть состоит из автономного источника электрической энергии, линии электропередачи, электроприёмников. На рисунке 2.1 приведена схема замещения такой сети, где электроприёмником является выпрямитель.

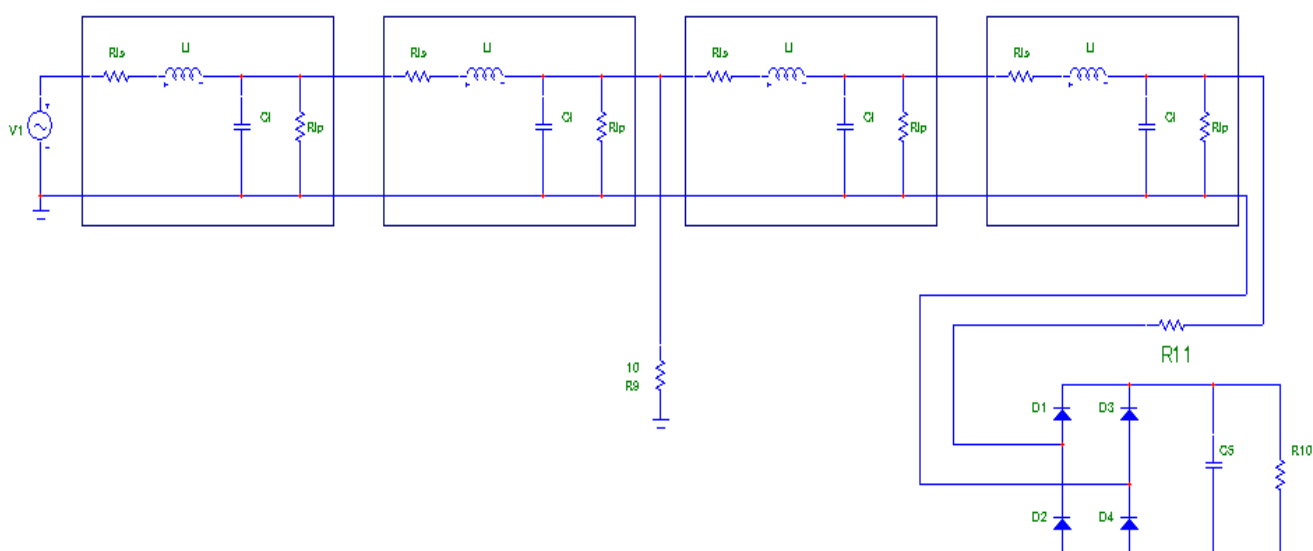
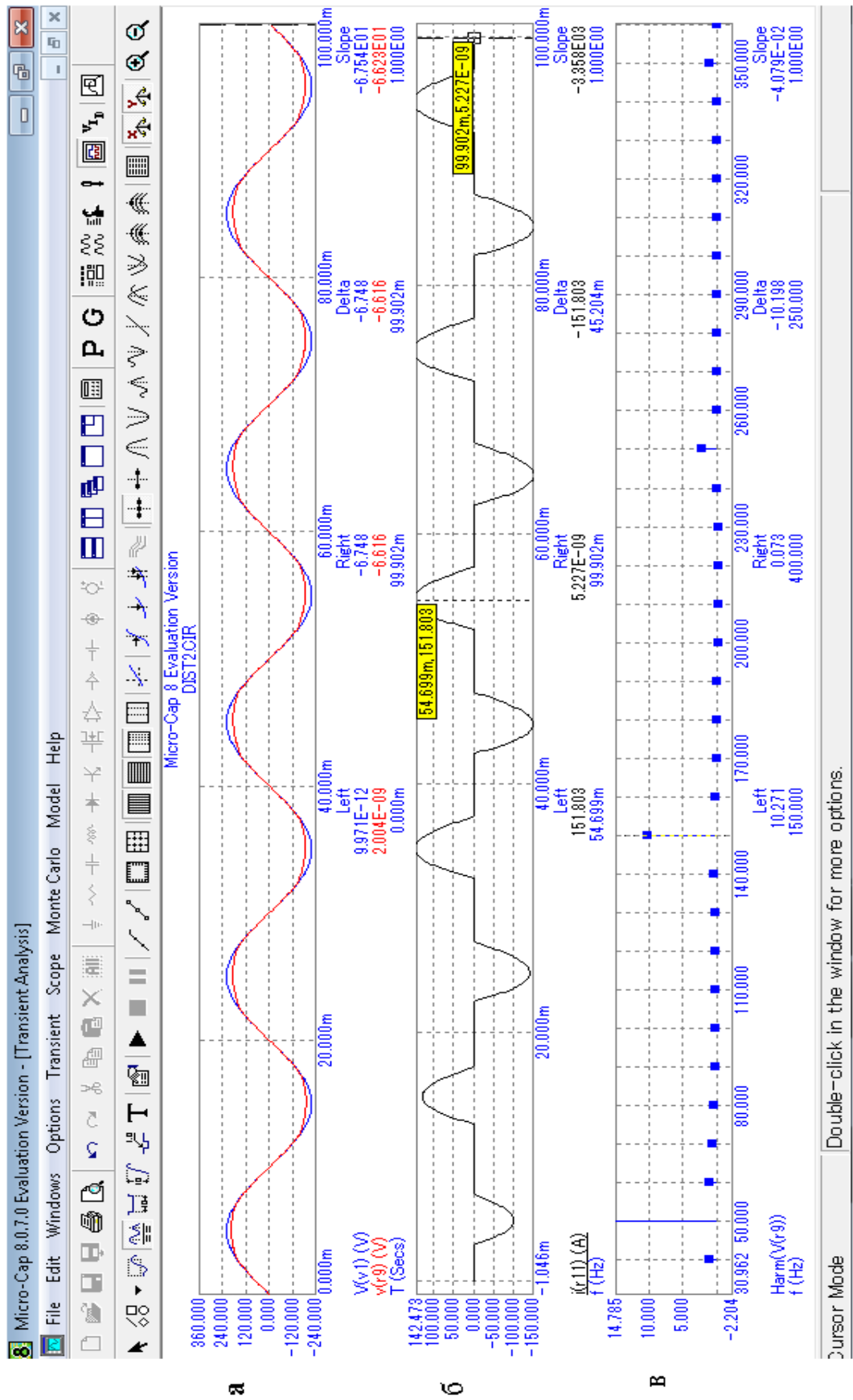


Рисунок 2.1 – Схема замещения электрической сети с нелинейной нагрузкой

Полученные осциллограммы при работе такой сети представлены на рисунке 2.2., а - кривая напряжения, изображенная синим цветом, показывает напряжение источника энергии; кривая напряжения, изображенная красным цветом, показывает напряжение у электроприёмника, которым является преобразователь. На рис. 2.2, б - отражена кривая тока преобразователя. На рис. 2.2, в – показан гармонический состав кривой напряжения.



исуюно к 2.2 - Оси Ллор аммы при работ е сети с нейной нагрю зкой

При подключении к сети более мощной нагрузки схема замещения представлена на рисунке 2.3.

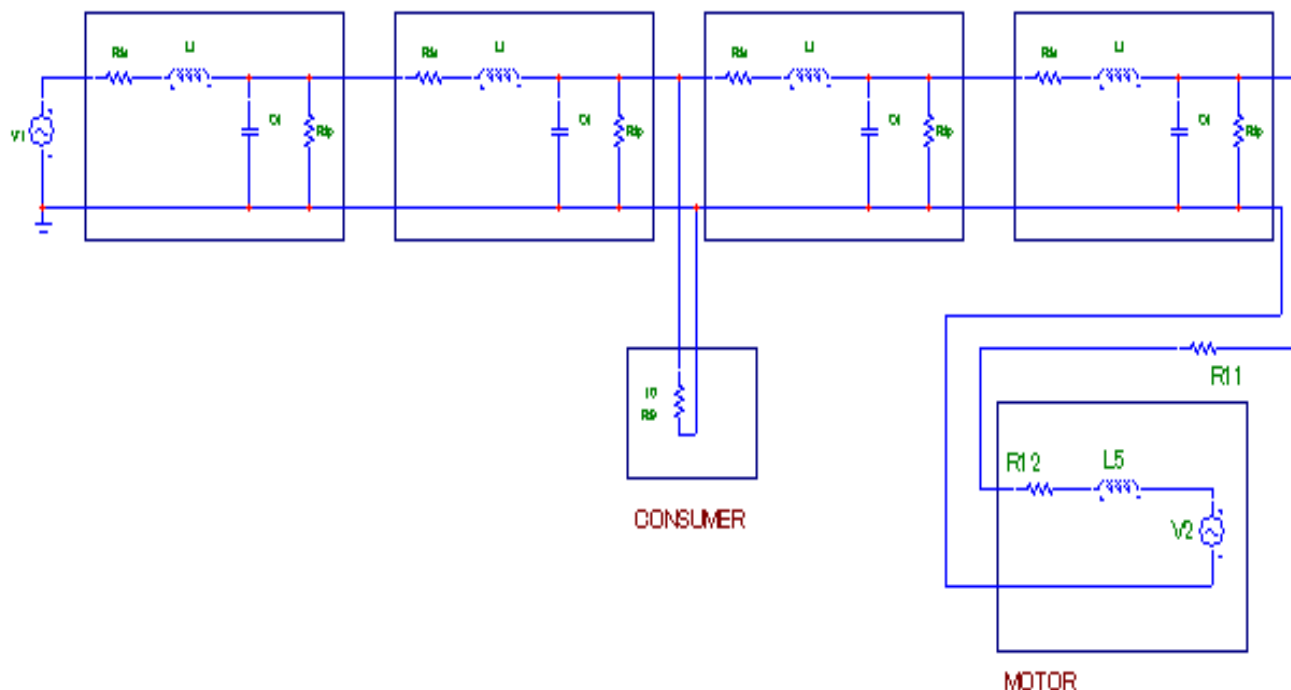


Рисунок 2.3 – Схема замещения электрической сети с силовой нагрузкой

Подключение такой нагрузки вызывает колебания напряжения и тока в электрической сети, которые отражают осциллограммы, рисунок 2.4.

Отклонения параметров электросети от нормативных показателей приводят к нарушениям работы бытовых электроприборов, компьютеров и оргтехники и как следствие - к потере информации, выходу электротехники из строя. Более чем в 65% случаев электронная информация теряется в результате сбоев электропитания. Анализ причин отказов бытовой электротехники показывает, что во многих случаях источником неприятностей является вовсе не дефекты конструкции, а неудовлетворительное качество напряжения в электросети питания - более 35% всех выходов электроприборов из строя (перегорания) [5].

Помехи в электросетях в большинстве своем непредсказуемы и трудно устранимы. Причины их возникновения могут быть различными: от серьезных повреждений электросети под воздействием природных факторов до электромагнитных помех. Таким образом, существует понятие качества электроэнергии, качественного электропитания и, соответственно, существуют

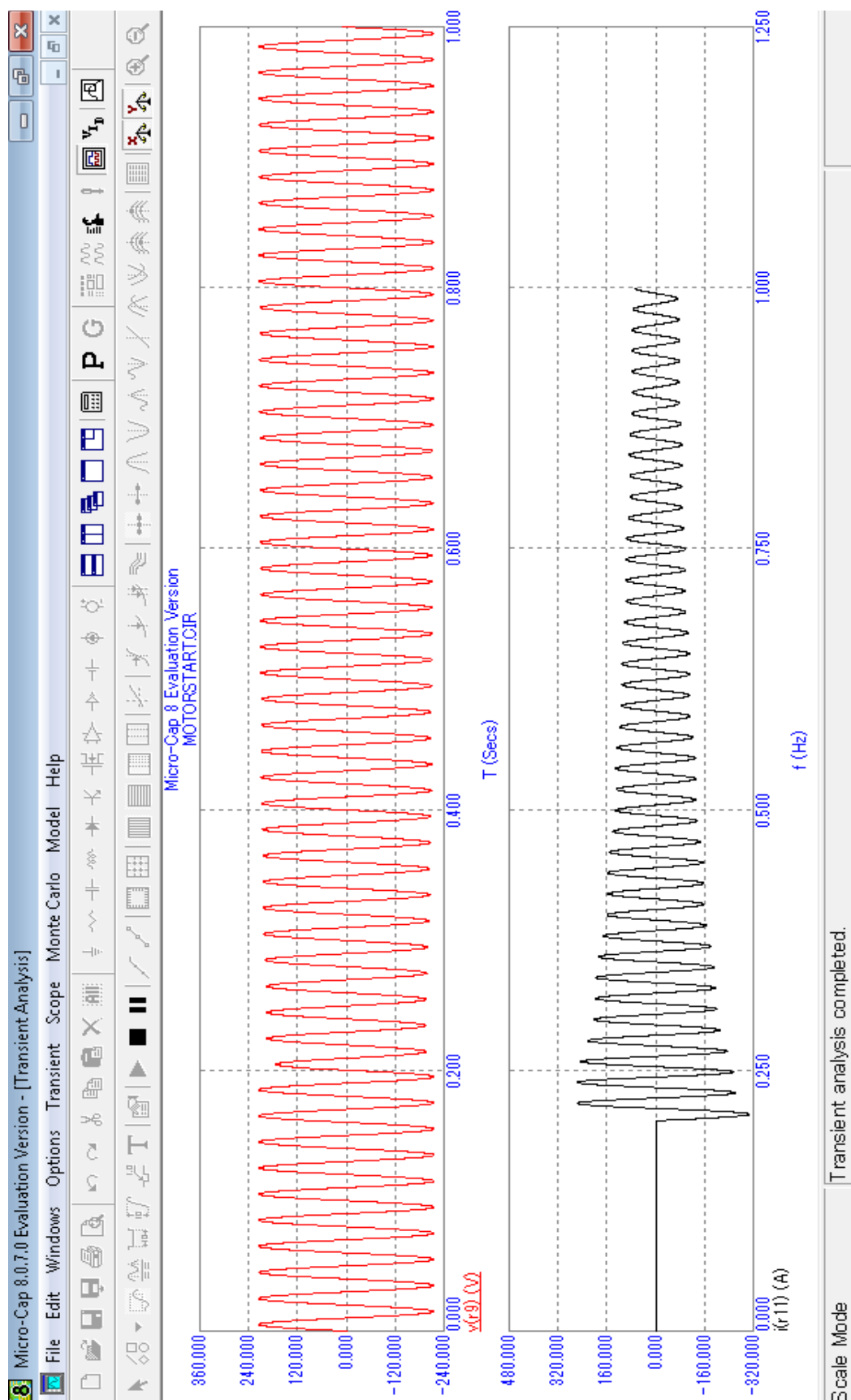
основные виды показателей качества - импульсные помехи и отклонения номинального рабочего напряжения.

Импульс напряжения (импульсная помеха) - это кратковременное резкое искажение формы кривой питающего напряжения, опасное и трудно фиксируемое нарушение качества электроэнергии. Если не предпринимать специальных мер для защиты от импульсных перенапряжений, в сеть 220 В проникают импульсы напряжения амплитудой до 6000 В. Длительность таких импульсов очень мала (десятки-сотни микросекунд), но последствия от их воздействия бывают разрушительными. Это превышает допустимую величину перегрузки для бытовой электротехники как минимум в 10 раз. Другой разновидностью импульсных помех являются коммутационные импульсы. Возникают такие помехи при включении и отключении отдельных участков электросети, мощных потребителей электропитания, а также, при нештатном отключении электроприборов, имеющих электродвигатели или входные трансформаторы. Подобное нештатное отключение происходит, например, в случае пропадания напряжения в доме при работающем электродвигателе холодильника или стиральной машины.

Не менее опасным, чем воздействие импульсных помех, для электроприборов и электронной техники является повышение или понижение напряжения в электросети, относительно его нормальной величины. В правильно рассчитанной и построенной системе электроснабжения в нормальном режиме работы уровень напряжения во всех точках общего присоединения находится в пределах допустимого (рис.2.1.). Основной причиной недопустимого отклонения напряжения является беспорядочное развитие электрических сетей без учета пропускной способности линий электропередач, мощности трансформаторных подстанций. Причиной может быть также неисправность устройства регулирования напряжения на подстанции, недобросовестность персонала электросетей, несанкционированное подключение мощных потребителей.

2.3.2 Моделирование процессов в схеме с нелинейной нагрузкой

На рисунке 2.5 представлена схема с последовательным соединением - R, L, C элементов. Индуктивность и емкость являются сосредоточенными параметрами электрической сети и электроприемника, имеющего нелинейную вольт-амперную характеристику. На вход схемы поступает амплитудно-модулированный сигнал. Параметры сигнала приняты такими: амплитуда $E_m=220$ В, частота модулирующего сигнала $5E4$ Гц, частота несущего колебания $3E5$ Гц.



Моделирование выполняется в режиме Transient Analysis. Диалоговое окно с заданием на моделирование показано на рисунке 2.5. При моделировании время моделирования принято 100 мкс, что соответствует пяти периодам модулирующего колебания.

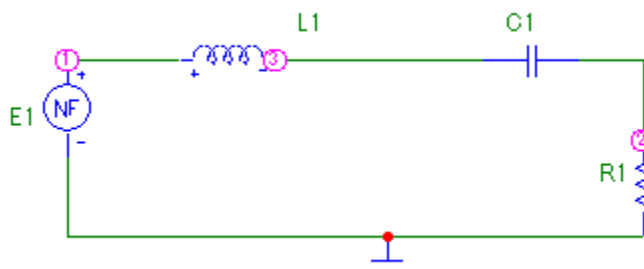


Рисунок 2.5 – Схема замещения с последовательным соединением – R, L, C элементов

Осциллограмма напряжения в узле 2 при подключении нелинейной нагрузки представлена на рис.2.6. Напряжение на резистивном элементе (в узле с номером 2) отображено на первом графике рис.2.6. Для выполнения спектрального анализа этого напряжения задана команда HARM(V(2)) [5]. По горизонтальной оси графика на рис.2.6 в этом случае откладывается частота f . Гармонический состав напряжения в узле 2 схемы рис.2.5 показан на втором графике рис.2.6. Из рисунка видно, что на частоте несущих колебаний 300 кГц амплитуда колебаний максимальна и равна 219.28 В.

Анализ осциллограммы позволяет сделать вывод, что получена периодическая несинусоидальная кривая напряжения. Гармонический анализ этой кривой и ее преобразование в ряд Фурье выполнено с помощью программы MicroCAP. С помощью программы вычисляем коэффициент нелинейных искажений.

Спектр высших гармонических составляющих напряжения приведен в таблице 2.3.

При дальнейшем исследовании изменяем параметры сети, величину нелинейной нагрузки и анализируем полученные результаты экспериментов.

2.3.4 Математическая обработка результатов измерений

Результаты математической обработки показали, что эмпирическое распределение значений коэффициента K_U соответствует нормальному закону распределения случайной величины.

Параметры распределения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения 0,4 кВ составляют:

1. математическое ожидание $M[K_U] = 5,17\%$;
2. среднее квадратическое отклонение $\sigma[K_U] = 2,59\%$;
3. относительное значение времени превышения предельно допустимого значения коэффициента $K_{U,п} T_2 = 0,0\%$.

Нормальная плотность вероятности распределения K_U (1/%) определяется $\varphi(K_U; 5,17; 2,59)$.

Гармонические составляющие напряжения, определённые в результате эксперимента, приведены в таблице 2. Анализ таблицы показывает, что требования ГОСТ 13109-97 к коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения не выполняются.

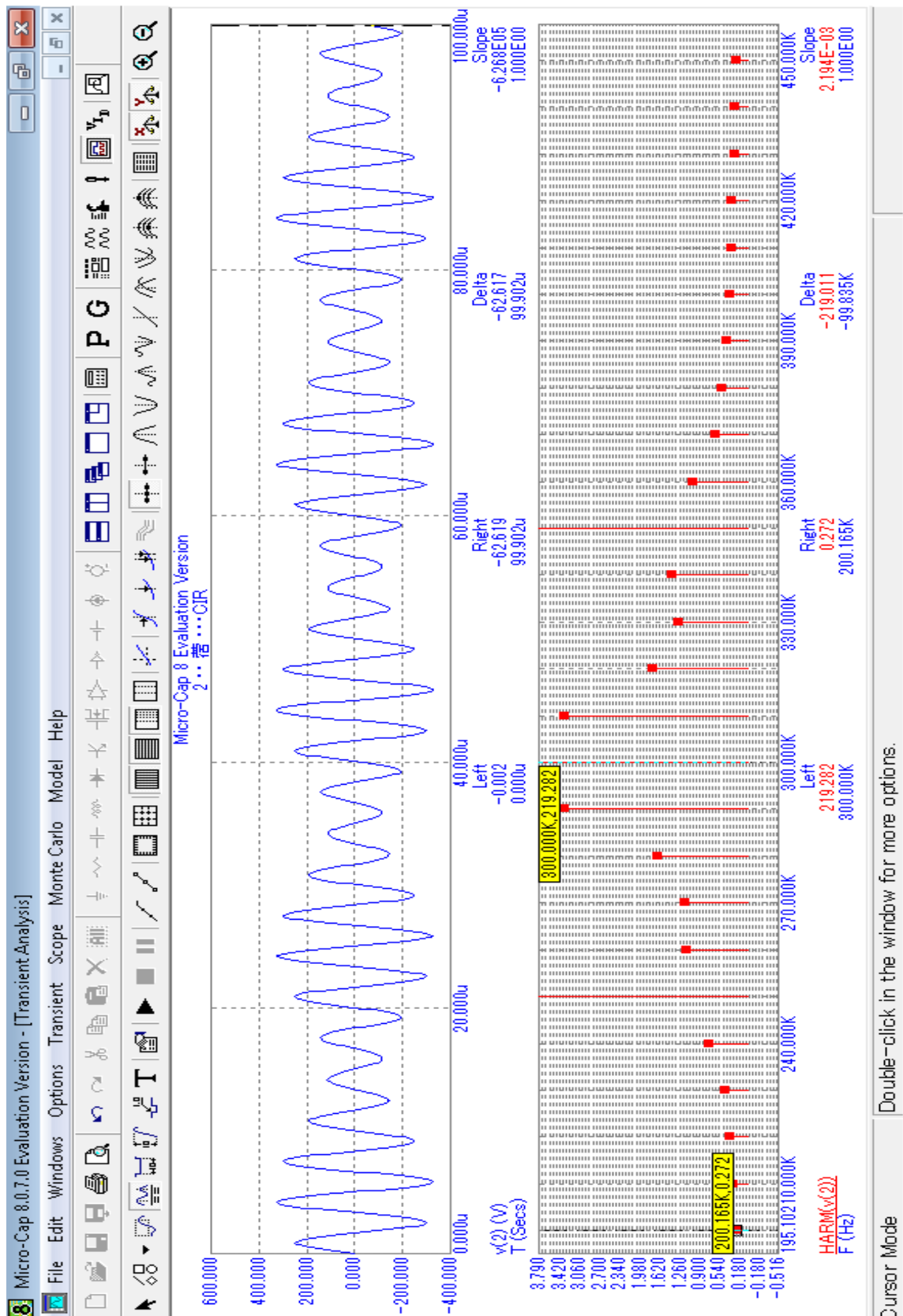
Следовательно, в сети 0,4 кВ действует кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения.

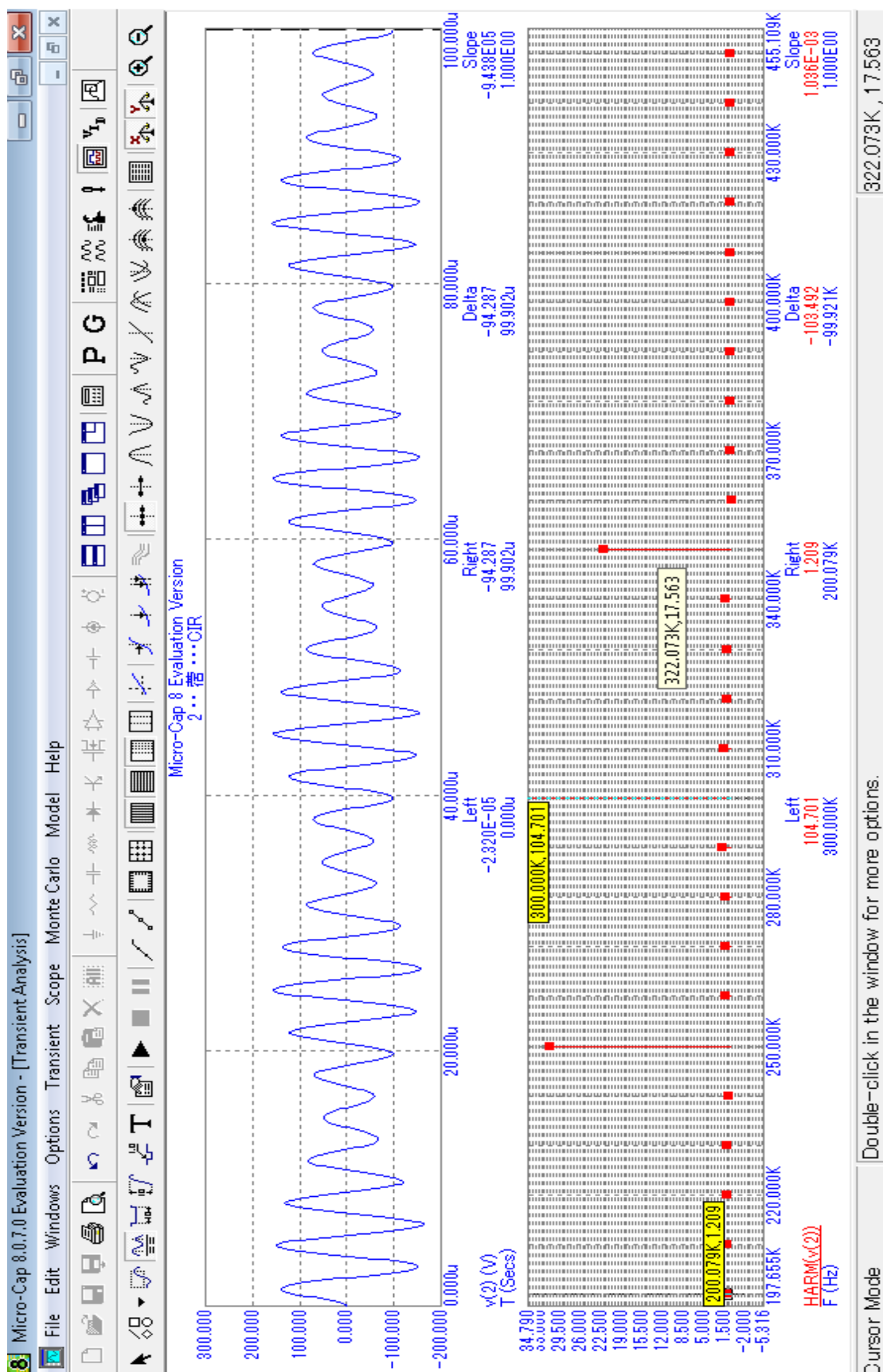
Для расчёта кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой на рисунке 2.11 представлен график нормальной плотности вероятности $\varphi(K_U; 5,17; 2,59)$, совмещенный с нормируемыми значениями уровней ЭМС.

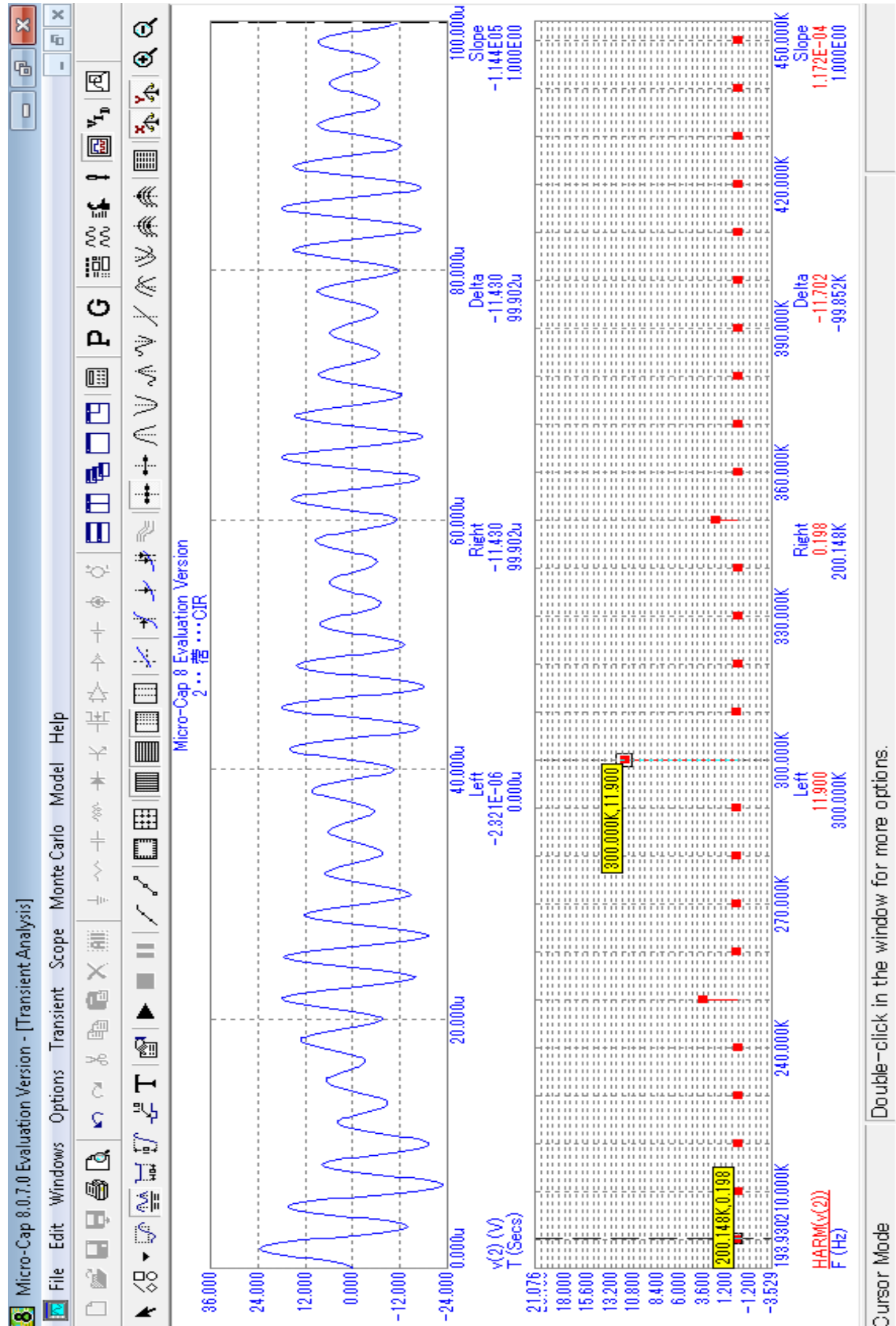
Вероятность попадания K_U в интервал $(K_{U,н}; K_{U,п})$ определяется по формуле (2.8).

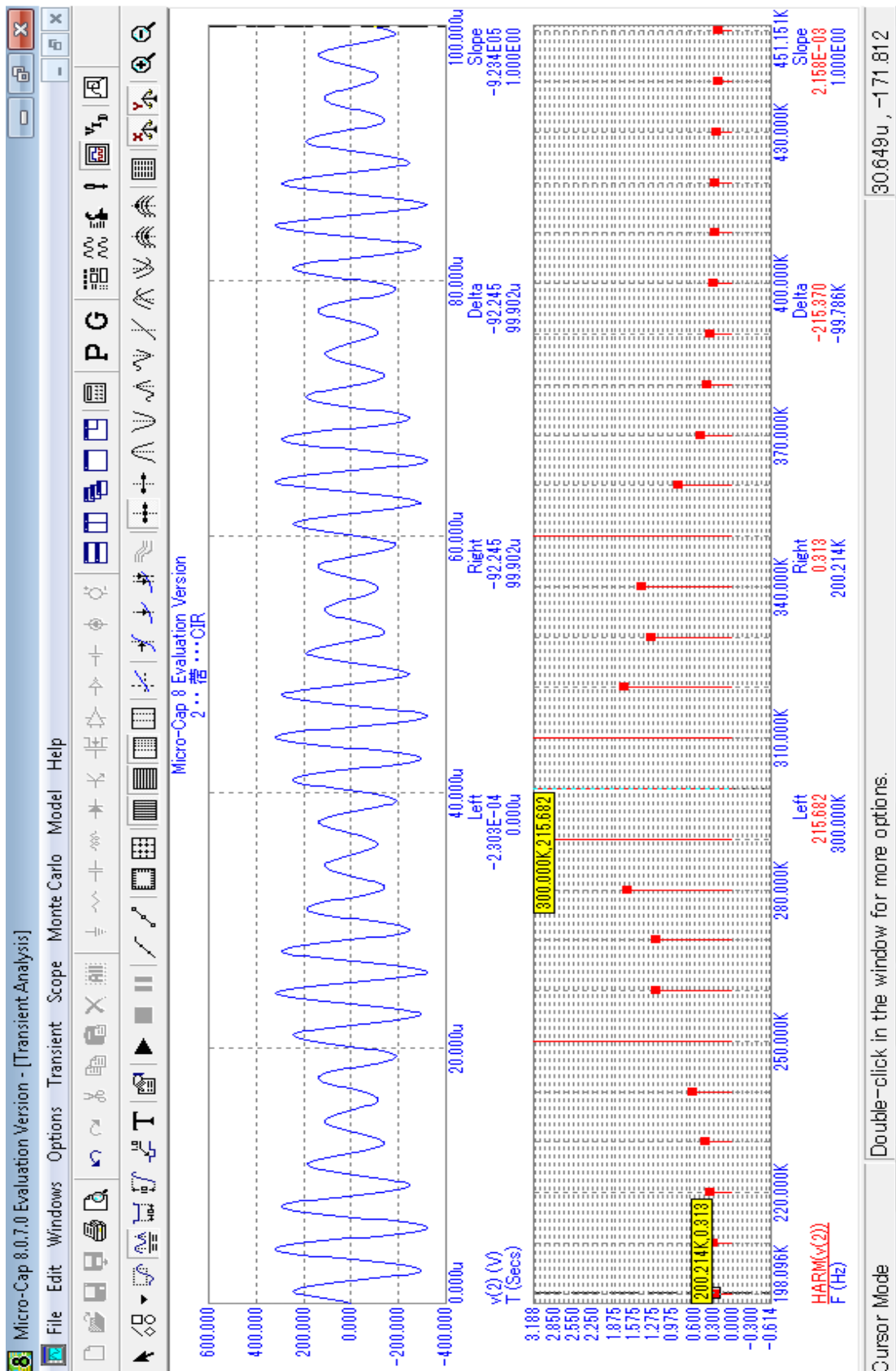
Вычисление определенного интеграла (2.3) производится с помощью функции Лапласа [20]. Для этого выражение (2.3) приведено к виду

$$P(8 < K_U < 12) = \Phi_0 \left[\frac{12 - M[K_U]}{\sigma[K_U]} \right] - \Phi_0 \left[\frac{8 - M[K_U]}{\sigma[K_U]} \right]. \quad (2.10)$$









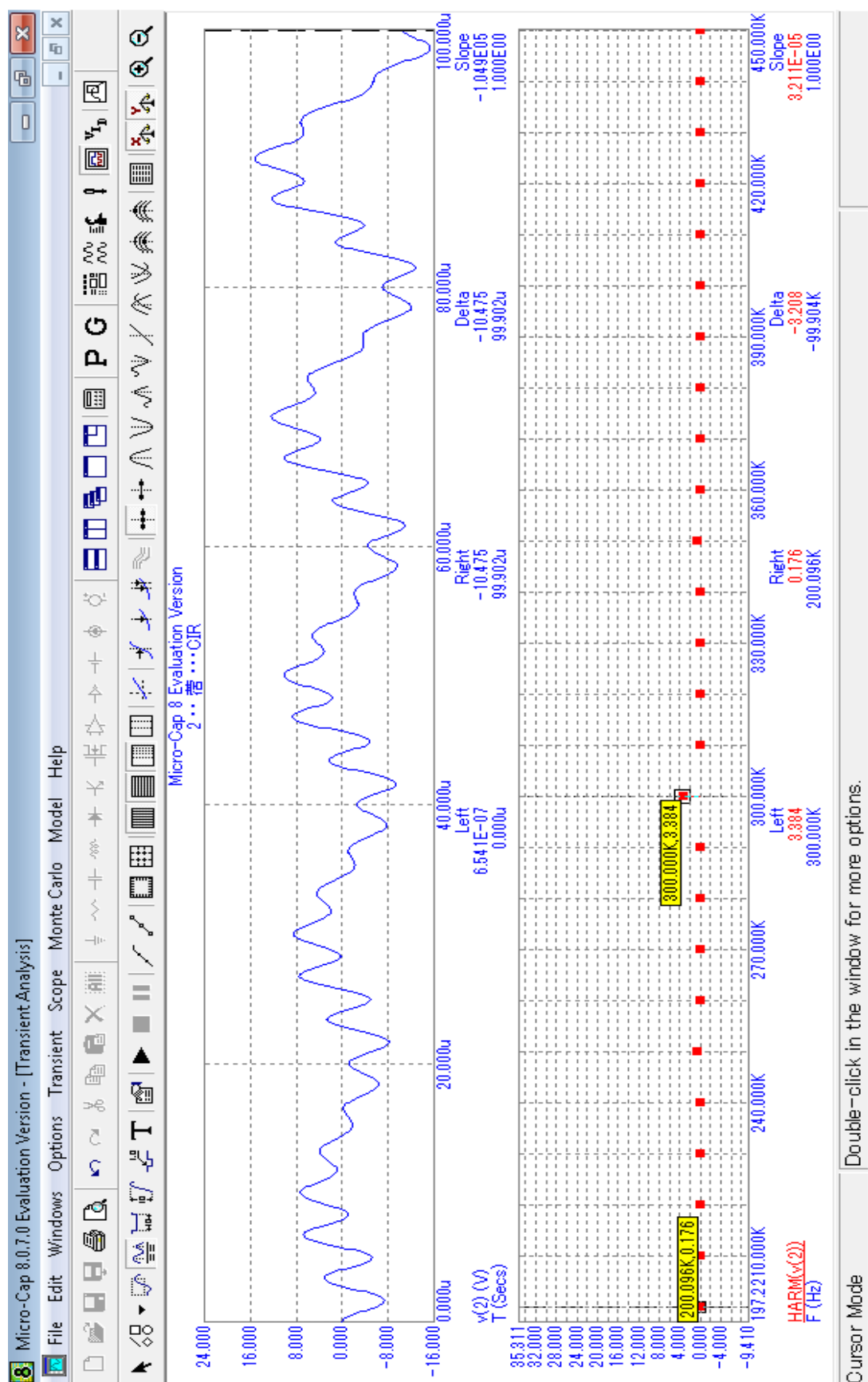
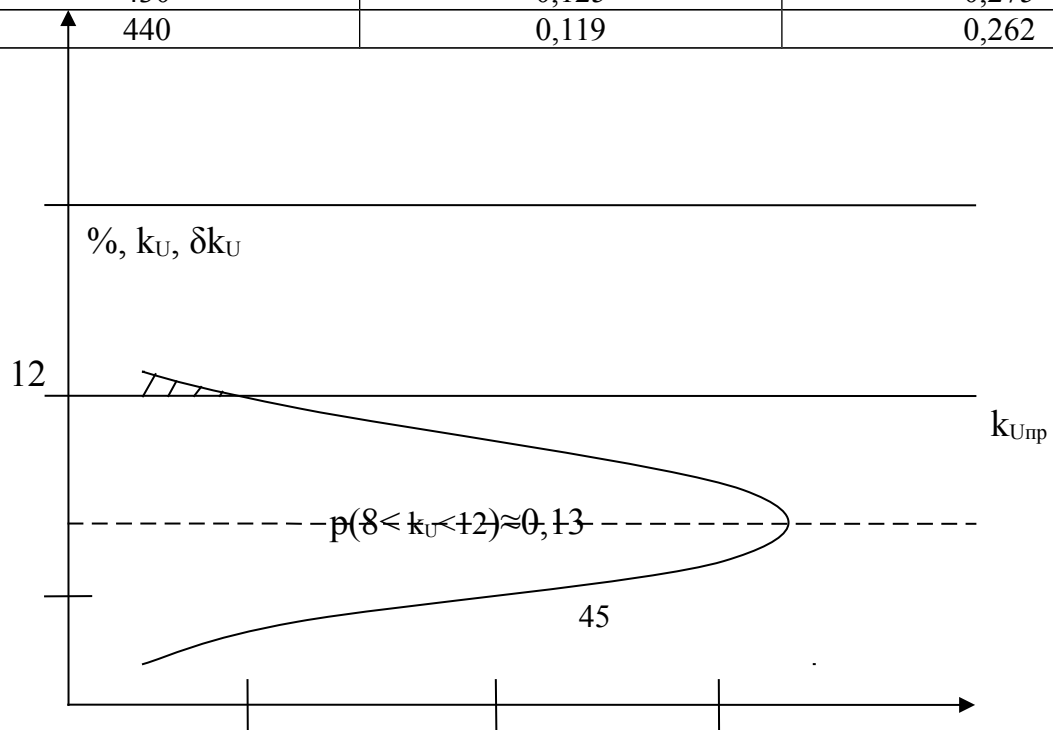


Таблица 2.3 - Спектр высших гармонических составляющих напряжения

Частота гармонических составляющих напряжения, рад/сек	Доля гармонических составляющих от напряжения основной гармоники, %	Амплитуда напряжения высших гармоник, В
1	2	3
Опыт 1		
300	99,67	219,28
310	1,53	3,36
320	0,8	1,769
330	0,6	1,312
340	0,64	1,416
350	24,83	54,628
360	0,47	1,038
370	0,29	0,639
380	0,23	0,513
390	0,2	0,44
400	0,18	0,39
410	0,16	0,354
420	0,156	0,344
430	0,136	0,3
440	0,127	0,28
Опыт 2		
300	47,59	104,7
310	0,799	1,758
320	0,555	1,222
330	0,52	1,145
340	0,585	1,288
350	10,074	22,163
360	0,189	0,417
370	0,267	0,587
380	0,285	0,627
390	0,291	0,641
400	0,291	0,642
410	0,29	0,639
420	0,285	0,627
430	0,284	0,624
440	0,279	0,615
Опыт 3		
300	5,41	11,9
310	0,0968	0,213
320	0,0714	0,157
330	0,0677	0,149
1	2	3
340	0,279	0,165
350	1,098	2,4171
360	0,03	0,066
370	0,0386	0,085
380	0,04	0,088

390	0,04	0,089
400	0,04	0,089
410	0,0395	0,087
420	0,0391	0,086
430	0,0386	0,085
440	0,0386	0,085
Опыт 4		
300	1,538	3,384
310	0,056	0,123
320	0,049	0,107
330	0,045	0,099
340	0,040	0,088
350	0,367	0,807
360	0,048	0,106
370	0,044	0,097
380	0,042	0,093
390	0,040	0,089
400	0,039	0,086
410	0,038	0,084
420	0,037	0,082
430	0,036	0,079
440	0,035	0,077
Опыт 5		
300	98,036	215,68
310	1,498	3,296
320	0,797	1,754
330	0,607	1,336
340	0,675	1,484
350	24,211	53,265
360	0,402	0,885
370	0,243	0,534
380	0,194	0,427
390	0,170	0,373
400	0,154	0,338
410	0,142	0,312
420	0,138	0,303
430	0,125	0,275
440	0,119	0,262



$$M[\delta k_U] = 5,17$$

$$\varphi(\delta k_U = k_U)$$

0,05

0,1

0,15

Рисунок 2.11 - График нормальной плотности вероятности распределения совмещённый с нормируемыми значениями уровней ЭМП в сети 0,4 кВ

Используя таблицу функции Лапласа [20], получаем

$$P(8 < K_U < 12) = \Phi_0(2,63) - \Phi_0(1,09) = 0,9953 - 0,8643 \approx 0,13. \quad (2.11)$$

Вероятность появления кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения согласно формулы (2.8) составляет

$$P(\delta K_U) = P(K_{Ун} < K_U = \delta K_U < K_{Ун}) - 0,05 = 0,13 - 0,05 = 0,08. \quad (2.12)$$

Таким образом, качество функционирования исследуемой сети 0,4 кВ по искажению напряжения характеризуется кондуктивной ЭМП, которая представляется с вероятностью 0,95 математическим ожиданием

$M[\delta K_U] = 5,17\%$ и средним квадратическим отклонением $\sigma[\delta K_U] = 2,59\%$. Вероятность появления этой помехи (0,13) превышает допустимую вероятность превышения коэффициентом K_U нормально допустимого значения (0,05) в 2,6 раза.

Следовательно, показатель качества функционирования сети 0,4 кВ по искажению является параметром, имеющим показатели характеризующие недопустимое стандартом [6] «технологическое нарушение» работы системы электроснабжения [56, 57, 68].

2.4 Выводы по главе 2

Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

12. Рассмотрены вопросы организационного обеспечения показателей качества функционирования сетей напряжением 0,4 кВ при нарушениях показателей КЭ. В свете этого изложены: принципы моделирования процессов в сетях с нелинейными нагрузками, требования к измерению показателя искажений напряжения.

13. Представлена электрическая схема измерения искажений и осциллографирования фазных напряжений и тока в сетях 0,4 кВ с нелинейной нагрузкой.

14. Приведён алгоритм определения кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения.

15. Определен критерий качества функционирования действительной сети 0,4 кВ по искажению напряжения – кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения с вероятностью 0,95 характеризуется математическим ожиданием $M[\delta K_U] = 5,17\%$ и средним квадратическим отклонением $\sigma[\delta K_U] = 2,59\%$. Вероятность появления δK_U (0,13) превышает допустимую вероятность превышения коэффициентом K_U нормального значения (0,05) в 2,6 раза.

Таким образом, показатель качества функционирования сети 0,4 кВ по искажению напряжения является параметром, имеющим показатели, характеризующие недопустимое стандартом [6] «технологическое нарушение» режима работы системы электроснабжения.

ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10 кВ И АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 0,4 кВ

3.1 Анализ спектра высших гармонических составляющих напряжения в электрической сети 10 кВ

В задачу анализа спектра высших гармонических составляющих напряжения в электрической сети 10 кВ входит нахождение внутренних и выходных переменных системы распространения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в региональной ЭЭС, воздействуя на которые можно ослабить или устранить гармоническое воздействие. Эта задача по внешним признакам относится к задачам параметрической оптимизации и ее разрешимость определяется размерностью задачи.

Известно, что основным источником искажения синусоидальности кривой напряжения в распределительных сетях являются вентильные преобразователи различного назначения.

Для исследования влияния эквивалентного вентильного преобразователя на кондуктивную ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения 10 кВ полигона исследования примем следующие допущения, которые широко используются при анализе влияния нелинейной нагрузки на питающую сеть [13, 25, 26]:

- сопротивления вентиля в проводящем состоянии равны нулю;
- сопротивление закрытых вентиля равно бесконечности;
- активные сопротивления источника питания сети и понижающего трансформатора равны нулю;
- напряжение сети симметрично;
- нагрузка неизменна;
- при отключенном преобразовательном агрегате напряжение системы синусоидально;
- емкостные проводимости элементов системы электроснабжения отсутствуют.

С учетом этих допущений на рис. 3.1,а представлена схема связи эквивалентного вентильного преобразователя с сетью 10 кВ полигона исследования.

Воспользуемся теоретическими разработками [25,26], в которых показано, что в зависимости от последовательности чередования фаз, угла управления, потребляемой преобразователем мощности и параметров

системы электроснабжения коммутационные искажения имеют определенный вид и расположение на кривой. Примем к сведению доказательство того, что амплитуда максимального искажения линейного напряжения при соединении вентильных обмоток преобразовательного трансформатора по схеме «треугольник-звезда» в $2/\sqrt{3}$ раз меньше, чем по схеме «звезда-звезда» [26].

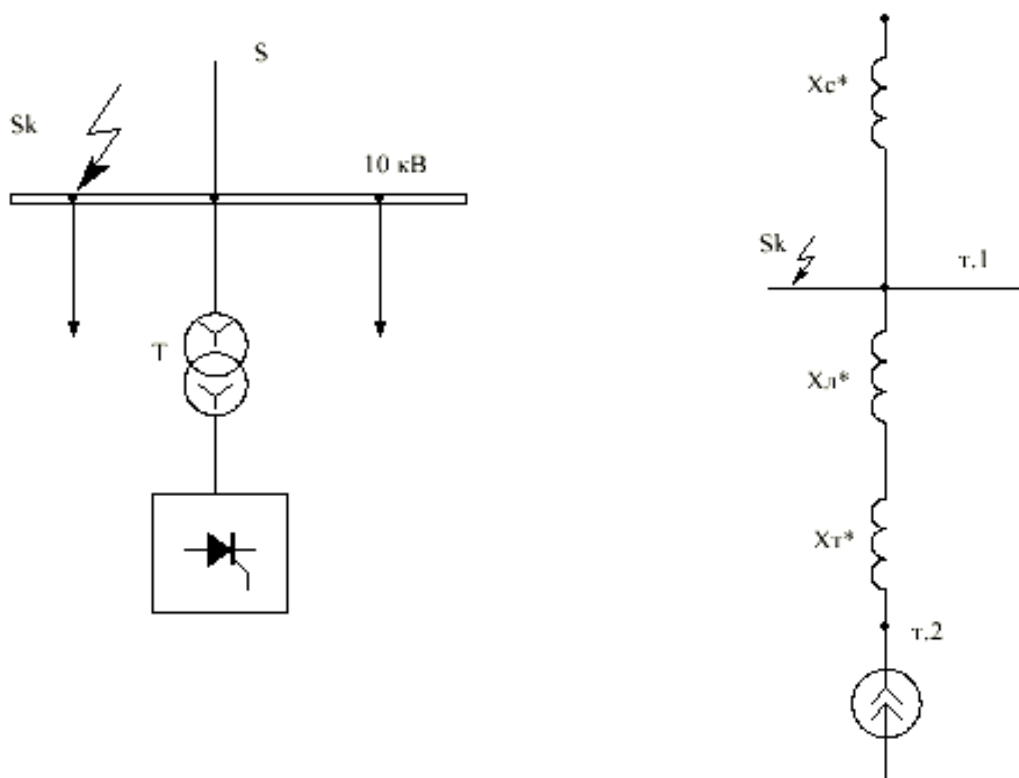


Рисунок 3.1 - Электрическая схема воздействия эквивалентного вентильного преобразователя на сеть 10 кВ (а) и её схема замещения для высших гармоник тока (б)

Формы кривых фазного и линейного напряжений при соединении преобразовательного трансформатора (рисунок 3.1, а) по схеме «звезда-звезда» представлены на рисунке 3.2, а, в. На рисунке 3.2, б представлена форма напряжения выпрямленного тока. Коммутационные искажения линейного напряжения U_{AC} приведены на рисунке 3.2, г.

Таким образом, несинусоидальную форму кривой линейного напряжения можно представить в виде суммы неискаженной синусоиды и коммутационных провалов [2, 25].

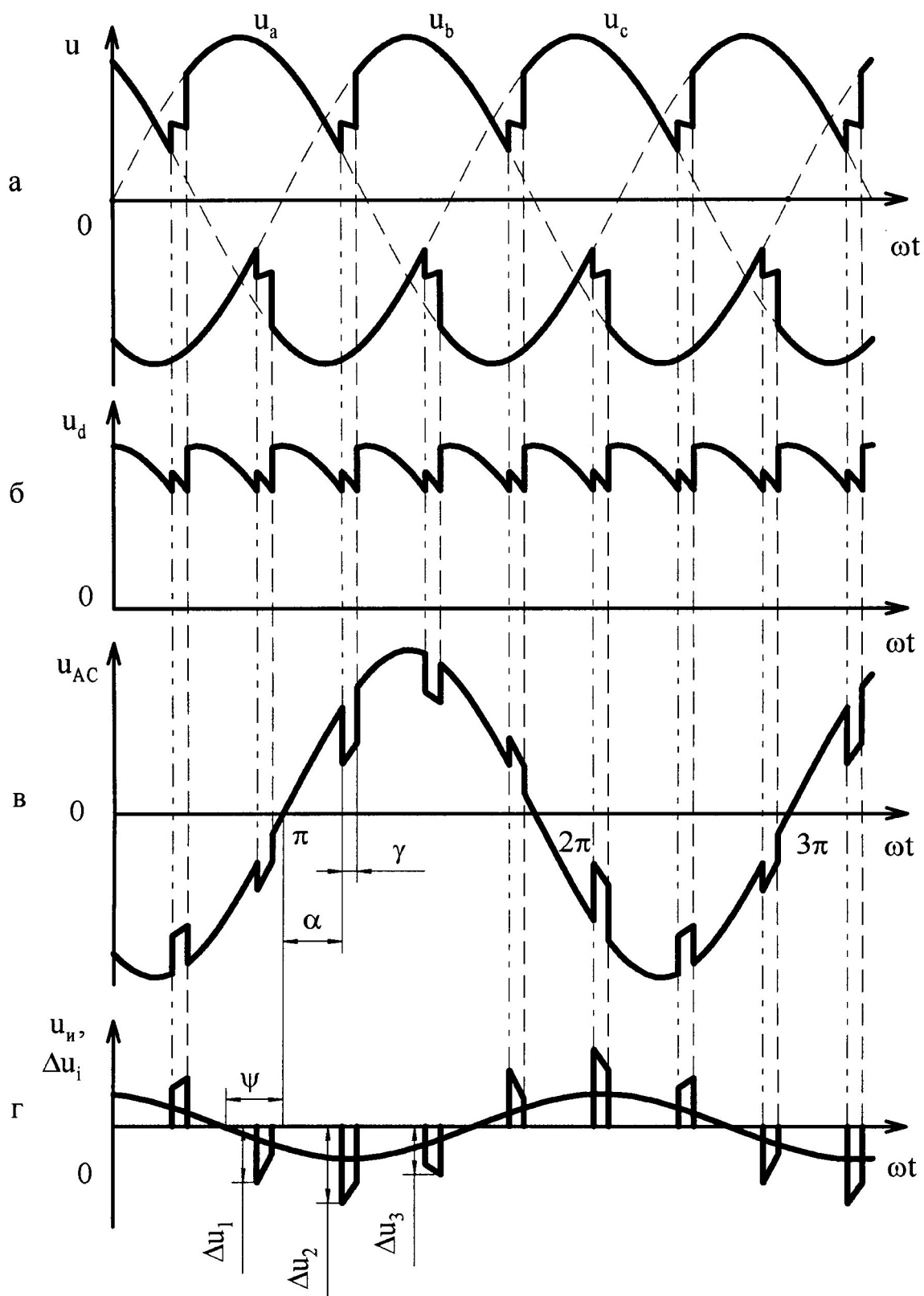


Рисунок 3.2 - Коммутационные искажения линейного напряжения при работе преобразователя с эквивалентной 6-ти фазной схемой выпрямления

Основная гармоника кривой коммутационных искажений u_{AC} на угол, который зависит от углов управления и коммутации [26, 32].

$$\psi < \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right), \quad (3.1)$$

где φ – угол регулирования;

γ – угол коммутации, характеризующий переход тока с одной фазы на другую при включении очередного вентиля (рисунок 3.2, а).

Это несовпадение по фазе объясняется различием в воздействии на форму кривой линейного напряжения коммутационных искажений фазных напряжений.

Относительное значение импульсов коммутационных провалов (рисунок 3.2, в) определяются по выражениям [26, 27, 28].

$$\left. \begin{aligned} Vu_1 &= \frac{x_c}{x_{cp} + x} \sin \varphi \\ Vu_2 &= \frac{1}{2} \frac{x_c}{x_{cp} + x} \sin \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$

где x_c — индуктивное сопротивление системы электроснабжения от источника питания бесконечной мощности до шин 10 кВ (рисунок 3.1, б т.1), на которых исследуются искажения формы кривой напряжения;

x_{cp} — индуктивное сопротивление от источника возникновения коммутационных искажений (рисунок 3.1, б, т.2) до этих же шин 10 кВ;

φ — угол сдвига между первой гармоникой переменного напряжения в системе электроснабжения и первой гармоникой тока, потребляемого преобразователем.

Угол φ определяется углами управления α и коммутации γ [26, 27]

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}, \quad (3.3)$$

Мгновенное значение синусоидальной кривой коммутационных искажений u_n , полученное методом гармонического анализа, определяется по формуле [2]

$$u_n = \sqrt{2} U_n \sin(\omega t + \psi) \quad (3.4)$$

Действующее значение коммутационных искажений за полупериод можно определить по выражению [26]

$$U_{\text{и}} = \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left(\frac{\sqrt{2}U_{\text{л}} c}{x_{\text{с}} + x_{\text{п}}} \right)^2 \sin^2 \omega t dt + 2 \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} U_{\text{л}} c}{x_{\text{с}} + x_{\text{п}}} \right)^2 \sin^2 \omega t dt \right] \right\}^{0,5} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}U_{\text{л}} c}{x_{\text{с}} + x_{\text{п}}} \left[\frac{3}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sin^2 \omega t dt \right]^{0,5} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{л}} c}{x_{\text{с}} + x_{\text{п}}} \left\{ \frac{3}{2\pi} [\gamma - \cos(2\alpha + \gamma) \sin \gamma] \right\}^{0,5},$$

где $U_{\text{л}}$ - действующее значение линейного напряжения.

Допуская, что $\sin \gamma \approx \gamma$, $\varphi \approx \alpha + (\gamma/2)$, после преобразования, получаем [25]

$$U_{\text{и}} = \sqrt{2}U_{\text{л}} \sin \varphi \frac{x_{\text{с}}}{x_{\text{с}} + x_{\text{п}}} \left[\frac{3}{2\pi} \gamma \right]^{0,5}. \quad (3.6)$$

Выразим действующее значение коммутационных искажений за полупериод через параметры системы электроснабжения, технические и эксплуатационные характеристики преобразовательной установки. Для этого, прежде всего, представим угол коммутации через параметры цепи коммутации и ток нагрузки. Воспользуемся соотношением для углов коммутации и управления [2, 25]

$$\cos(\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2I_{\text{д}}x}{U_{2\text{т}}}, \quad (3.7)$$

где $U_{2\text{т}}$ — амплитуда линейного напряжения вторичной обмотки преобразовательного трансформатора;

$I_{\text{д}}$ — выпрямленный ток 6-фазного выпрямителя;

x — индуктивное сопротивление цепи коммутации вентилей.

Выпрямленный ток 6-фазного выпрямителя можно представить выражением [2,25]

$$I_d = \frac{\sqrt{3}I_2}{\sqrt{2}}, \quad (3.8)$$

где I_2 - действующее значение фазного тока вторичной обмотки преобразовательного трансформатора трехфазной мостовой схемы.

Подставляя выражение (3.8) и учитывая ранее принятые допущения, после преобразования, получаем

$$\gamma = \frac{\sqrt{3}I_2 x}{U_2 \sin \varphi}, \quad (3.9)$$

где U_2 - действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки преобразовательного трансформатора.

Представим индуктивное сопротивление цепи коммутации через параметры расчётной схемы замещения системы электроснабжения (рисунок 3.1, б) [15, 63]

$$x = \frac{x_* U_2^2}{S_\delta}, \quad (3.10)$$

где x_* - эквивалентное индуктивное сопротивление цепи коммутации в относительных единицах, приведённое к базисной мощности S_δ .

Принимая за базисную мощность номинальную мощность преобразовательного трансформатора S_T , можем записать

$$\frac{\sqrt{3}I_2 x}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_2 x_*}{S_\delta} = \frac{S}{S_T} x_* = K_3 x_*, \quad (3.11)$$

где S — полная мощность, потребляемая выпрямителем;

K_3 - коэффициент загрузки преобразовательного агрегата по полной мощности.

Подставляя выражение (3.11) в формулу (3.9), получаем [52]

$$\gamma \approx \frac{K_3 x}{\sin \varphi}. \quad (3.12)$$

Представим эквивалентное индуктивное сопротивление цепи коммутации в относительных единицах суммой сопротивлений согласно рисунку 3.1, б

$$X_* = X_{C*} + X_{T*} + X_{л*} \quad (3.13)$$

Принимая за базисное напряжение в исследуемой точке системы электроснабжения $U_{\bar{o}} = U_n$, можем эквивалентное индуктивное сопротивление в относительных единицах системы электроснабжения от условной точки бесконечной мощности до исследуемой точки, приведённое к базисным условиям, определить по формуле

$$X_{C*} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{k\bar{o}}} \left(\frac{U_n}{U} \right)_k = \frac{S_{\tau}}{S}, \quad (3.14)$$

где S_k — мощность 3-фазного КЗ в исследуемой точке системы электроснабжения.

Эквивалентное индуктивное сопротивление в относительных единицах преобразовательного трансформатора, приведенное к базисным условиям

$$X_{T*} = u_k \frac{S_{\bar{o}}}{S_{T\bar{o}}} \left(\frac{U_n}{U} \right)^2, \quad (3.15)$$

где u_k — напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора в относительных единицах.

Эквивалентное индуктивное сопротивление линии от преобразовательного трансформатора до исследуемой точки системы электроснабжения, приведенное к базисным условиям [52]

$$X_{л*} = x_0 l \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2} = x_0 l \frac{S_{\tau}}{U_n^2}, \quad (3.16)$$

где x_0 — удельное индуктивное сопротивление линии, Ом/км;

l — длина линии, км;

U_n — номинальное напряжение, при котором работает линия $U_n = U_{\bar{o}}$.

Таким образом, с учётом формул (3.14)-(3.16) получено выражение для определения эквивалентного индуктивного сопротивления цепи коммутации

$$x_* = \frac{S_T}{S_{kin}} + u_k + x_0 l \frac{S_T}{U^2}. \quad (3.17)$$

Отношение $\frac{x_c}{x_c + x_n}$, которое входит в выражения (3.2), приведённое к принятым базисным условиям, имеет вид

$$\frac{x_c}{x_c + x_n} = \frac{(S_T / S_{k1})}{(S_T / S_{k1}) + u_k l \frac{S_T}{U_n^2}}. \quad (3.18)$$

Деление мощности мостового преобразователя при помощи эквивалентной многофазной схемы выпрямления вызывает уменьшение коммутационных искажений в $\sqrt{m/6}$ поэтому, подставляя выражение (3.12), (3.17) и (3.18) в формулу (3.6) и преобразовывая, получаем следующее выражение для определения действующего значения коммутационных искажений за полупериод при любом числе фаз схемы выпрямления [15]

$$U_{и} = U_{л} \frac{SK}{S_k} \left[\frac{3}{\pi} \frac{6}{m} \frac{\sin \varphi}{(S_T / S_k) + u_k l \frac{S_T}{U_n^2}} \right]^{0,5}. \quad (3.19)$$

Допустимый уровень гармоник в питающей сети преобразовательной установки определён ГОСТ 13109-97, согласно которому коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяется по формуле [8]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{ном}}, \quad (3.20)$$

где $U_{(n)i}^2$ - действующее значение n-ой гармоники, В, кВ;
 $U_{ном}$ - номинальное напряжение сети, В, кВ;
 $n=40$ – номер последней учитываемой гармоники.

Принимая $U_{\text{ном}} = U_{\text{л}}$, заменяя действующие значения высших гармоник напряжения действующим значением коммутационных искажений

$$\left[\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2 \right]^{0,5} \approx U \quad (3.21)$$

и подставляя выражение (3.19) в формулу (3.20), получаем математическую модель влияния вентильного преобразователя на коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в сети 10 кВ (м.1, рисунок 3.1, б)

$$K_U \approx \frac{SK}{S_k} \left[\frac{3}{\pi} \frac{6}{m} \frac{\sin \varphi}{(S_T / S_k) + u_k} + \frac{S_T}{U_n^2} \right]^{0,5}. \quad (3.22)$$

Для эквивалентного вентильного преобразователя в сети 10 кВ допустимы равенства: $k_3=1$, $u_k=0$, $x_0/S_T / U_n^2 = 0$, $m=6$, $\sin \varphi = Q/S_T$, $(3/\pi)^{0,5} \approx 1$, где Q – реактивная мощность эквивалентного вентильного преобразователя; $S_{\text{п}} = S_T$ – полная мощность этого преобразователя. С учётом принятых допущений математическая модель (3.22) принимает вид [15]

$$K_U \approx \sqrt{Q / S_k}. \quad (3.23)$$

Таким образом, доказывается возможность снижения коэффициента K_U в сети 10 кВ за счёт компенсации реактивной мощности. Такое же математическое выражение получено в [2] путём доказательства теоремы о связи между реактивной мощностью вентильного преобразователя и коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения в питающей сети. Это обуславливает достоверность математической модели (3.23).

3.2 Критерий передачи искажений в смежную сеть

Решение представленной задачи осуществляется в пределах системы электроснабжения судна от береговой сети. Экспериментальные данные получены в результате исследований, проведенных в Новосибирской государственной академии водного транспорта. В связи с этим механизм

передачи искажения синусоидальности кривой напряжения береговой электрической сети высокого напряжения в смежную судовую ЭЭС напряжения 0,4 кВ исследуем на модели узла нагрузки полигона исследования.

Введём следующие ограничения:

- береговая электрическая сеть напряжением 10 кВ подвергается гармоническому воздействию;
- судовая ЭЭС напряжением 0,4 кВ имеет электрораспределительный щит питания с берега (РЩПБ), нелинейная нагрузка на судне отсутствует;
- искажения синусоидальности кривой напряжения 0,4 кВ на РЩПБ появляются при питании с берега.

С учётом допущения на рисунке 3.3 приведена принципиальная схема электроснабжения эквивалентных преобразователей В1 и В2, которые, как бы, обуславливают искажения в береговой сети 10 кВ и в судовой ЭЭС 0,4 кВ. Преобразовательные трансформаторы Т1 и Т2 входят в комплект этих преобразователей. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в береговой сети 10 кВ в соответствии с математическим выражением (3.23) определяется по формуле

$$K_U^{(10)} = \sqrt{Q_1 / S_{k1}}, \quad (3.24)$$

где Q_1 – реактивная мощность, потребляемая преобразователем В1;
 S_{k1} – мощность трёхфазного короткого замыкания (КЗ) в сети 10 кВ.

Подобный же коэффициент в судовой ЭЭС 0,4 кВ при работе электропередачи «берег-судно» рассчитывается по формуле

$$K_U^{(0,4)} = \sqrt{Q_2 / S_{k2}}, \quad (3.25)$$

где Q_2 – реактивная мощность, потребляемая преобразователем В2;
 S_{k1} – мощность трёхфазного КЗ в сети 0,4 кВ.

Очевидно, что между коэффициентами $K_U^{(0,4)}$ и $K_U^{(10)}$, характеризующих ЭМО в смежных сетях, существует взаимосвязь

$$\frac{K_U^{(0,4)}}{K_U^{(10)}} = \sqrt{\frac{S_{k1}}{S_{k2}}} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}. \quad (3.26)$$

Следовательно, при проникновении искажений от береговой сети 10 кВ в судовую ЭЭС 0,4 кВ они ослабевают в несколько раз

$$\sqrt{\frac{S_{k1}}{S_{k2}}} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} > 1. \quad (3.27)$$

Функциональная схема передачи искажений от береговой сети 10 кВ в судовую ЭЭС 0,4 кВ приведена на рисунке 3.4. Коэффициент связи между $K_U^{(0,4)}$ и $K_U^{(10)}$ является критерием передачи искажений

$$\lambda = 1 / \sqrt{\frac{S_{k1}}{S_{k2}}} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}. \quad (3.28)$$

Применяя системный подход к оценке критерия λ , отметим следующее положение, вытекающее из практики эксплуатации электропередачи «берег-судно».

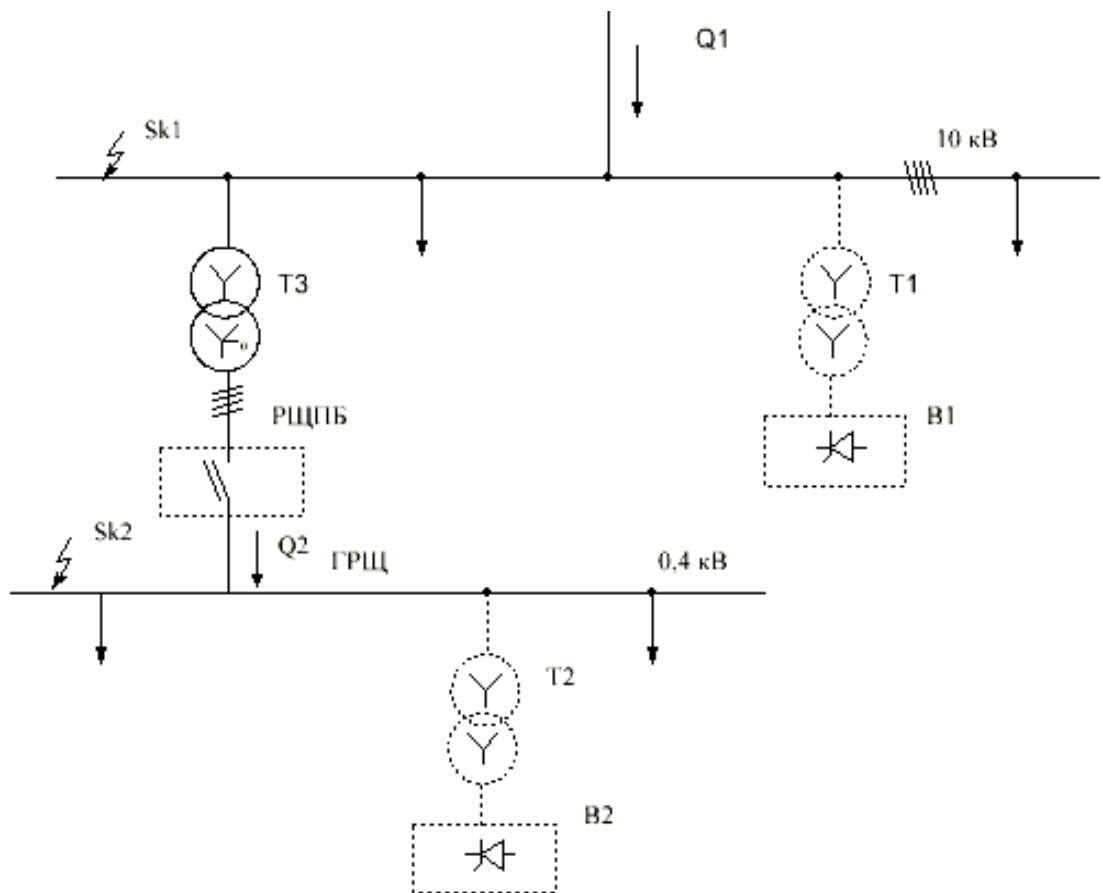


Рисунок 3.3 - Принципиальная схема электроснабжения эквивалентных вентильных преобразователей в смежных сетях 10 кВ (B1) и 0,4 кВ (B2)

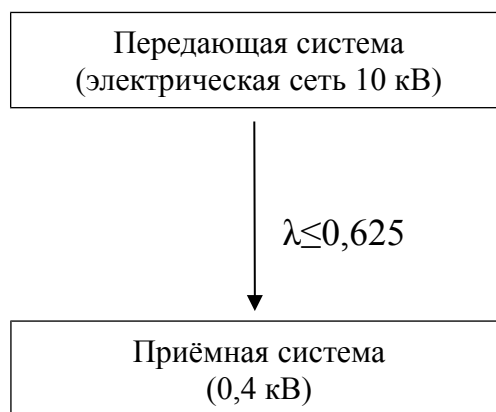


Рисунок 3.4 - Функциональная схема передачи искажений от сети 10 кВ в ЭЭС 0,4 кВ

Судовые ЭЭС плавкранов, земснарядов и т.д. получают питание от отдельных понижающих трансформаторов 10/0,4 кВ мощностью (400-1000) кВ·А. В этом случае, пренебрегая реактивной мощностью, расходуемой понижающим 10/0,4 кВ трансформатором на насыщение стали, можно принять, что

$$Q_1 \approx Q_2. \quad (3.29)$$

Тогда, принимая $K_U^{(10)} = K_{U\delta}$ и $K_U^{(0,4)} = K_{UC}$, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в судовой ЭЭС 0,4 кВ можно определить по формуле

$$K_{UC} = K_{U\delta} \times \lambda \quad (3.30)$$

Эта математическая модель позволяет определить требования к интегральным показателям передающей и приёмной систем, при которых обеспечиваются нормально допустимые значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения. Так, исходя из требований ГОСТ 13109-97 к нормально допустимым значениям коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в береговой сети 10 кВ ($K_{U,H} = 5\%$) и в судовой ЭЭС 0,4 кВ ($K_{U,H} = 8\%$), необходимо соблюдать требования неравенств

$$\left. \begin{array}{l} S_n / S_{np} \geq 2,56 \\ \lambda \leq 0,625 \end{array} \right\}. \quad (3.31)$$

Анализ этого частного решения показывает необходимость в достоверном сведении о мощностях трёхфазного КЗ на шинах 10 кВ понижающего трансформатора ТЗ (рисунок 3.3) и на границе раздела балансовой принадлежности, т.е. на шинах 0,4 кВ. Для получения этих сведений [15] допускается использовать упрощённый метод расчёта. В соответствии с этим методом мощность трёхфазного КЗ за любым понижающим трансформатором 110/35/10 кВ и в сети до 1 кВ при соединении обмоток трансформатора 10/0,4 кВ и в сети 1 кВ по схеме Δ/Y можно определить по формуле

$$S_K^3 = 100S_{T,H}/u_K, \quad (3.32)$$

где u_K - напряжение КЗ трансформатора, %;

S_K^3 - полная номинальная мощность понижающего трансформатора, кВА.

Таким образом, выполнение требований системы неравенств позволяет не допустить проникновение в судовую ЭЭС недопустимых искажений, которые могут быть в сети 10 кВ. В этом случае обеспечивается ЭМС технических средств в сети 0,4 кВ по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения.

3.3 Обеспечение электромагнитной совместимости технических средств в сети 10 кВ

Технические решения по обеспечению ЭМС технических средств в береговой электрической сети 10 кВ по объективным причинам ограничиваются следующими организационно-техническими мероприятиями [50]:

- ограничение внешнего гармонического воздействия;
- изменение системы электроснабжения объектов с целью повышения помехоустойчивости сети;
- резистивное заземление нейтрали сети 10 кВ, снижающее коммутационные импульсные напряжения при однофазном замыкании на землю, с вводом в работу системы автоматического ввода резерва (АВР).

Алгоритм подавления кондуктивной ЭМП δK_U изложим на примере подавления этой помехи в сети 10 кВ полигона исследования.

Первоначально, на графике нормальной плотности распределения кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения $\varphi\{K_U = \delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}$ (рисунок 3.5, кривая 1), совмещенным с нормируемыми значениями уровней ЭМС ($K_{U,H}; K_{U,P}$) размещается на основании свойств дисперсии случайной величины график нормальной плотности вероятности распределения случайной величины K_U $\varphi(K_U = \delta K_U, M[K_U], \sigma[K_U] = \sigma[\delta K_U])$ с таким расчетом, чтобы вероятность появления величины K_U в интервале ($K_{U,H}; K_{U,P}$) не превышала установленного ГОСТом 13109-97 значения 0,05 (рисунок 3.5, кривая 2). Определяется математическое ожидание $M[K_U] \approx 2,5\%$.

Формируется для оценки неравенства $P(5 < K_U < 8) < 0,05$ определенный интеграл, вычисление которого производится с помощью функции Лапласа

$$P(5 < K_U < 8) = \Phi_0 \left[\frac{8 - M[K_U]}{\sigma[K_U]} \right] - \Phi_0 \left[\frac{5 - M[K_U]}{\sigma[K_U]} \right]. \quad (3.33)$$

Подставляем численные значения $M[K_U] \approx 2,5\%$ и $\sigma[K_U] = 1,5\%$, и определяя по таблицам нормированные функции Лапласа, получаем

$$P(5 < K_U < 8) = \Phi_0[3,6666] - \Phi_0[1,6666] = 0,4998 - 0,4516 \approx 0,0482 \quad (3.34)$$

Неравенство $0,05 > 0,0482$ подтверждает достоверность функции.

Определяется величина

$$\Delta M[K_U] = M[\delta K_U] - M[K_U] \approx 3,1\% \quad (3.35)$$

на которую необходимо уменьшить математическое ожидание случайной величины K_U , чтобы подавить кондуктивную ЭМП δK_U . Для этого необходимо выполнить требования

$$S_{K2} \approx \sqrt{a} S_{K1} \quad (3.36)$$

где $a = M[\delta K_U]/M[K_U] \approx 2,1$;

$S_{K1}=30$ МВА – мощность трехфазного КЗ в сети 10 кВ, при которой наблюдается кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения δK_U , МВ·А;

S_{K2} – такая же мощность, при которой исчезает δK_U , МВ·А.

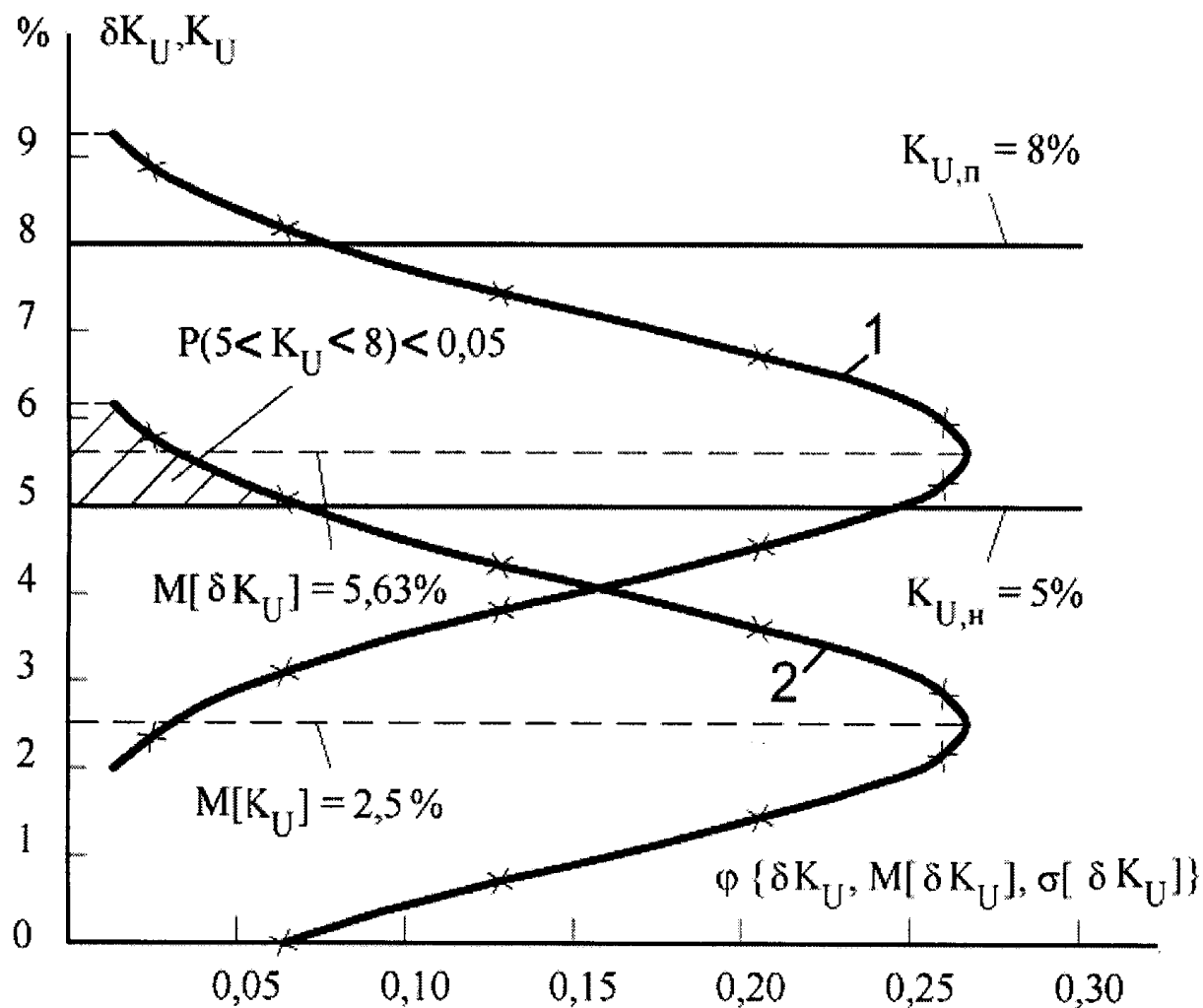


Рисунок 3.5 - График нормальной плотности вероятности распределения кондуктивной ЭМП δK_U по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения (1), совмещённый с графиком нормальной плотности вероятности распределения коэффициента K_U (2), при котором обеспечивается ЭМС в сети 10 кВ полигона исследования

В рассматриваемой сети 10 кВ для обеспечения ЭМС нужно уменьшить гармоническое воздействие на 3,1% путем увеличения в 1,4 раза величины S_{KI} или применения соответствующих фильтрокомпенсирующих установок.

3.4 Выводы по главе 3

1. Для определения подхода к изучению природы появления искажений в электрической сети 10 кВ установлено, что искажение синусоидальности кривой напряжения адекватно гармоническому воздействию на эту сеть эквивалентного вентильного преобразователя с шестифазной схемой выпрямления.

2. Исследовано влияние коммутационных провалов в фазных напряжениях сети 10 кВ, обусловленных гармоническим воздействием эквивалентного преобразователя, на коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения. Показано, что основными факторами, влияющими на коэффициент искажения являются значения мощности трехфазного короткого замыкания на шинах 10 кВ и реактивной мощности этого узла.

3. Разработана математическая модель критерия передачи искажений из сети 10 кВ в смежную сеть – электроэнергетическую систему 0,4 кВ.

4. Определено, исходя из требований ГОСТ 13109-97 к несинусоидальности напряжения, предельное значение критерия передачи ЭМП, при котором обеспечивается ЭМС технических средств электроэнергетической системы по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения 0,4 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Параметрами ЭМС технических средств при некачественной электроэнергии в электрических сетях являются кондуктивные ЭМП, распространяющиеся по проводам. Отсутствие нормативно-технических документов в части проблемы ЭМС технических средств делает затруднительным определение кондуктивных ЭМП.

2 Рассмотрены вопросы организационного обеспечения показателей качества функционирования сетей напряжением 0,4 кВ при нарушениях показателей КЭ. В свете этого изложены: принципы моделирования процессов в сетях с нелинейными нагрузками, требования к измерению показателя искажений напряжения.

3 Приведён алгоритм определения кондуктивной ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения.

4 Определен критерий качества функционирования действительной сети 0,4 кВ по искажению напряжения – кондуктивная ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения с вероятностью 0,95 характеризуется математическим ожиданием $M\delta K_U \approx 5,17$ и средним квадратическим отклонением $\sigma[\delta K_U] = 2,59$. Вероятность появления δK_U (0,13) превышает допустимую вероятность превышения коэффициентом K_U нормального значения (0,05) в 2,6 раза.

5 Разработана математическая модель критерия передачи искажений из сети 10 кВ в смежную сеть – электроэнергетическую систему 0,4 кВ.

6 Определено предельное значение критерия передачи ЭМП, при котором обеспечивается ЭМС технических средств электроэнергетической системы по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения 0,4 кВ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.- Минск: Стандарты, 1998.-31 с.
2. Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах/ Монография.- Новосибирск: НГАВТ, 2006.-432 с. ISBN 5-8119-0201-0.
3. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 14 с.
4. Шваб А. Электромагнитная совместимость [Текст]: под ред. И.П.Кужекина; пер. с нем. В.Д.Мазина и С.А.Спектора. - 2-е изд., перераб. и доп.-М.; Энергоатомиздат, 1998.-460с.
5. Разевиг В.Д. Система моделирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. — 344 с., ил.
6. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. 368 с.
7. Литвак В.В. Электроэнергия: экономия, качество: Учеб. пособие./В.В.Литвак, Г.З.Маркман, Н.Н.Хардов.-Томск: Изд-во «СТТ», 2001.-196с.:ил.
8. Магауина Ж.К., Иванова Е.В. Екібастұз көмір бассейнін электр жабдықтау жүйесінде кернеу қисығының синусоидалдығының бұрмалануы бойынша электромагниттік жағдайы. – Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана: / Материалы X Респ. науч.-тех. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, 22, 23 апреля 2010 г. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2010. – Ч.V.-166с. ISBN 978-601-208-142-8 (Ч.V.)
9. Иванова Е.В., Магауина Ж.К., Аксенов В.И. Повышение качества функционирования технических средств с некачественной электроэнергетикой. – Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве: / под ред. В.А. Глущев, В.В. Михеева, А.А. Сидоренко. – Омск: Омский институт водного транспорта (филиал) ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», 2010. – 272с. (Тр. 1-й региональной науч.-тех. конф., 2-3 декабря 2010)
- 10.Иванова Е.В., Магауина Ж.К., Денчик Ю.М. Алгоритм определения качества функционирования сети 0,4 кВ по искажению напряжения. - Наука и образование в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве: - II Международная научно-практическая конференция
- 11.Иванова Е.В., Денчик Ю.М. Электромагнитная совместимость в электрических системах и сетях общего назначения. - Наука и образование

- в XXI веке: динамика развития в евразийском пространстве: - II Международная научно-практическая конференция
- 12.Электротехника. Терминология: справоч. пособ. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – Вып. 3. – 343 с.
 - 13.Параметры электромагнитной обстановки в сети с искажающей нагрузкой / Ю.М.Иванова [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2008. – №2. – С. 242–247.
 - 14.Карташёв И.И. Качество электроэнергии в системах электро-снабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И.Карташёв; под ред. М.А.Калугиной. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 120 с.
 - 15.Карташёв И.И.[и др.]. Требования к средствам измерения показателей качества электроэнергии / Электричество. – 2000. – № 4. – С. 11–18.
 - 16.Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2-х т. Т2: Электроснабжение / В.Г.Сальников [и др.]; под общ.ред. А.А.Фёдорова. / – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 487 с.
 - 17.Справочник электроэнергетика предприятий цветной металлургии / В.Г.Сальников [и др.]; под ред. М.Я.Басалыгина, В.С.Копырина.– М.: Металлургия, 1991. – 384 с.
 - 18.Иванова Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях транспортных систем (теория, расчёт, подавление) / Е.В.Иванова // Трансп. дело России. – 2006. – № 8. – С. 16–20.
 - 19.Машкин А.Г. Проблемы качества и учёта электроэнергии на границах системы тягового электроснабжения / А.Г.Машкин, В.А.Машкин // Промышленная энергетика. – 2007. – № 11. – С. 29–31.
 - 20.Доказано: в электрических сетях существуют высшие гармоники с частотами выше 2 кГц / Л.А. Кучумов [и др.] / Новости электротехники. – 2005. – N2/ – С/ 5659.
 - 21.Руппель А.А. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях 6–10 кВ/ А.А. Руппель, Е.В.Иванова; под ред. В.П. Горелова. – Омск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – 284 с.
 - 22.Иванова Е.В. Кондуктивные коммутационные помехи в местных электрических сетях промышленных предприятий и электростанций / Е.В.Иванова // Промышленная энергетика. – 2003. – № 7. – С. 36–40.
 - 23.Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н.В.Смирнов, И.В.Дудин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 511 с.
 - 24.Менеджмент в электроэнергетике: учебн. пособие. / А.Ф. Дьяков [и др.]; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: МЭИ, 2000. – 448 с.
 - 25.Румшитский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З.Румшитский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

- 26.Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 721с.
- 27.Область параметрических характеристик электромагнитной обстановки при низком качестве электроэнергии в системе электроснабжения / Ю.М.Иванова [и др.] // Науч. журн. Павл. гос. ун-та «Вестник ПГУ». – 2005. – №3 – С. 106–110.
- 28.Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С.Венцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
- 29.Иванова Ю.М. Определение предельно возможного гармонического воздействия на сети в региональной электроэнергетической системе / Ю.М. Иванова [и др.] // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: мат. Всерос. науч. – техн. конф., Томск, 12–14 мая 2008 г. Томск, 2008. – С. 30–32.
- 30.Сальников В.Г. Руководство по выбору структуры и параметров системы электроснабжения предприятия с мощными сериями электролизёров цветных металлов / В.Г.Сальников. – М.: Металлургия, 1985. – 78 с.
- 31.Сальников В.Г. Экономия электроэнергии в промышленности / В.Г.Сальников. – Алматы: Казахстан, 1984. – 127 с.
- 32.Иванова Е.В. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения общего назначения мощных электротермических нагрузок / Е.В.Иванова // Промышленная энергетика. – 2004. – № 11. – С. 50–54.
- 33.Иванова Ю.М. Управление кондуктивными электромагнитными помехами в сетях электроэнергетической системы / Ю.М.Иванова [и др.] // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: мат. Всерос. науч.-техн. конф., Томск, 12-14 мая 2008 г. – Томск, 2008. – С. 170–172.
- 34.Meyer H. Die Isolierung großer eltkrischer Maschinen. /H. Meyer. – Berlin: Springer, 1972. – 172 s.
- 35.Гунгер Ю.Р. Новый подход к повышению надёжности электрических сетей 6–10 кВ / Ю.Р.Гунгер // Матер. докл. конф. «Новые техника и технологии в энергетике ОАО «Газпром». – М., 2001. – С. 141–148.
- 36.Правила устройства электроустановок. – М.: Изд-во «ДЕАН», 2001. – 928 с.
- 37.Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Екатеринбург: УЮИ, 2003. – 304 с.
- 38.Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях: учеб. пособ. для студ. вузов / В.Г.Курбацкий. – Братск: БрГТУ, 1999. – 220 с.

- 39.Короткевич М.А. Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей / М.А.Короткевич. – Мн.: ЗАО «Техно-перспектива», 2003. – 373 с.
- 40.Иванова Ю.М. Электромагнитная совместимость в электрических сетях Прииртышья / Ю.М.Иванова [и др.] // Энергосистема: исследование свойств, управление, автоматизация: матер. междунар. науч.-техн. конф.; Новосибирск, 26-29 мая 2009 г. – Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. Спецвыпуск. – 2009. – № 1. – С. 223–227.
- 41.Анализ гармонического воздействия (помех) на электрические сети береговых объектов водного транспорта Западной Сибири / Ю.М.Иванова, А.А.Руппель [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2009. – № 1. – С. 331–334.
- 42.Шваб А.А. Электромагнитная совместимость / А.А.Шваб; под ред. И.П.Кужекина; пер. с нем. В.Д.Мазина и С.А.Спектора. – 2-е изд.перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 460 с.
- 43.Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике / Э.Хабигер. – М.: Энергоатомиздат. 1995. – 296 с.
- 44.Публикации Гарвардской группы по энергетической политике США (Harvard Electricity Policy Group Publications). URL = <http://ksgwww.harvard.edu/~herg/index.html>.
- 45.Веников В.А. Системный подход к проблемам электроэнергетических систем / В.А.Веников. // Электричество. – 1985. – № 6. – С. 1–4.
- 46.Методы и средства решения практических проблем электромагнитной совместимости на электростанциях и подстанциях / Р.К.Борисов [и др.] // Электро. – 2002. – № 2. – С. 44–52.
- 47.Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости на электрических станциях и подстанциях / Комитет 36, СИГРЭ. – 1997. – 24с.
- 48.Лазарев Г.Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций / Г.Б.Лазарев // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 33–42.
- 49.Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для вузов / Л.А.Бессонов. – 7-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
- 50.Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / А.Ф.Дьяков [и др.]; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
- 51.Беляев Л.С. Рынок в электроэнергетике: проблемы развития генерирующих мощностей / Л.С.Беляев, С.В. Подковальников. – Новосибирск: Наука, 2004. – 250 с.

52. MacGregor T. Electricity Restructuring in Britain: Not a Model to Follow // IEEE Spectrum. – 2001. – June. – P.15–16, 19.
53. Newbery D.M. Liberalizing Electricity Markets // Presented at 25 th. Annual IAAE International Conference, Aberdeen, USA, July 28, 2002.
54. Основы электромагнитной совместимости: учеб. для вузов / Н.А.Володина [и др.]; под ред. Р.Н.Карякина. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007. – 480 с.
55. Аррилага Дж. Гармоники в электрических системах/ Дж.Аррилага, Д.Брэдли, П.Бодер: пер. с англ. Е.А.Васильченко – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
56. Гайснер А.Д. Современный уровень развития мировой энергетики / А.Д.Гайснер // Энергия: экономика, техника, экология. – 2002. – № 2. – С. 8–9.
57. Добрусин Л.А. Моделирование влияния преобразователей на сеть в среде системы Design – Pspice /Л.А.Добрусин //Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 124–127.
58. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А.Герасименко, В.Т.Федин. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.
59. Кондуктивная электромагнитная помеха по току замыкания на землю в сети от 6 до 35 кВ с нейтралью, заземлённой через резистор / Ю.М.Иванова [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2009. – № 2. – С. 254–257.
60. ГОСТ 22261–94. Средства измерений электрических и магнитных величин.
61. Сазыкин В.Г. Электрогериатрия – новая технология эксплуатации электрооборудования / В.Г.Сазыкин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 11–14.
62. Лисицин Н.В. К обоснованию режима заземления нейтрали / Н.В.Лисицин // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–25.
63. Идельчик В.И. Расчёты установившихся режимов электрических систем / В.И.Идельчик. – М.: Энергия, 1977. – 188 с.
64. Определение коэффициента несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения серий электролизов цветных металлов // В.Г.Сальников [и др.] // Промышленная энергетика. – 1983. – № 4. – С. 35–37.
65. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учеб. для вузов / Ю.С.Забродин. – М.: Высш.шк., 1982. – 496 с.
66. Проектирование промышленных электрических сетей / В.И.Крупович [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 328 с.
67. Влияние параметров системы электроснабжения и режимов работы полупроводникового выпрямительного агрегата серии электролизёров цветных металлов на коэффициент несинусоидальности напряжения /

В.Г.Сальников [и др.] // Изв. Вузов СССР. Энергетика. – 1982. – № 12. – С. 31–36.

68. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison,
www.sel.me.wisc.edu/trnsys

69. www.transsolar.com

70. www.kazenergy.kz

71. www.allbest.ru