

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой энергетики
_____ Н.В.Савина
« ____ » _____ 2007 г.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

для специальности:

140204 – «Электрические станции»

140205 – «Электроэнергетические системы и сети»

140211 – «Электроснабжение»

140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Составитель: Н.В. Савина

Благовещенск

2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного университета

Н.В. Савина

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Качество электроэнергии» для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140204 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140211 – «Электроснабжение»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007, 129 с.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения по специальности 140204 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140211 – «Электроснабжение»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» в освоении дисциплины «Качество электроэнергии», формировании специальных знаний в области эксплуатационного контроля качества электроэнергии, расчета показателей качества электроэнергии, выборе схемных и технических решений улучшения качества электроэнергии.

© Амурский государственный университет, 2007
© Н.В. Савина

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа дисциплины.....	4
1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе	4
1.2. Содержание дисциплины.....	5
1.2.1. Федеральный компонент	5
1.2.2. Наименование тем, их содержание, объем в лекционных часах	5
1.2.3. Практические занятия, их содержание и объем в часах.....	7
1.2.4. Самостоятельная работа студентов	7
1.2.5. Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний	8
1.2.6. Вопросы к экзамену.....	8
1.3. Учебно-методические материалы по дисциплине	9
1.3.1. Перечень обязательной (основной) литературы	9
1.3.2. Перечень дополнительной литературы.....	10
1.3.3. Перечень методических и наглядных материалов, используемых в учебном процессе	10
1.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины	11
2. Краткий конспект лекций	12
3. Практические занятия, их содержание и объем в часах	74
3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий.....	74
3.2. Методические указания по проведению практических занятий.....	75
4. Самостоятельная работа студентов	96
4.1. График самостоятельной работы студентов.....	96
4.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ.	99
4.3. Комплекты домашних заданий, контрольных работ.	106
5. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины.....	121
6. Методические указания по применению современных информационных технологий.....	121
7. Контроль качества образования.....	122
7.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов.	122
7.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине.....	124
7.3. Экзаменационный контроль.....	125
8. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава	127
9. Список использованных источников.....	128

1. Рабочая программа дисциплины

«Качество электроэнергии»

для специальности:

140204 – «Электрические станции»

140205 – «Электроэнергетические системы и сети»

140211 – «Электроснабжение»

140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Курс 5	Очное обучение	Заочное обучение	Сокращенное обучение
Семестр	9	11	7
Лекции (час)	42	16	14
Практические занятия	14	8	6
Самостоятельная работа	42	74	78
Экзамен	*	*	*
Контрольная работа		*	*
ВСЕГО часов	98	98	98

Рабочая программа составлена на основании *Государственного образовательного стандарта ВПО по направлению подготовки дипломированного специалиста 650900 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА и типовых программ по специальностям 140204, 140205, 140211, 140203.*

1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Дисциплина «Качество электроэнергии» является завершающей в цикле подготовки инженеров по специальностям 140204, 140205, 140211, 140203.

Цель преподавания дисциплины

Предметом изучения курса «Качество электроэнергии» являются современные методы теоретических и экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии и их влияние на системы электроснабжения, а также технические средства и схемные решения для их нормализации.

Данная дисциплина является основой для дипломного проектирования и специализацией для студентов электроэнергетиков.

Цель изучения дисциплины – научиться методам анализа и улучшения качества электроэнергии в сетях энергосистем и системах электроснабжения.

Задачи изучения дисциплины.

Задачей изучения дисциплины является овладение методами, применяемыми для расчета показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, их нормализации, контроля и управления.

В результате изучения дисциплины в соответствии с квалификационной характеристикой выпускников, студенты должны

знать: влияние качества электроэнергии (КЭ) на электроприемники и электроустановки, системы электроснабжения и технологические процессы, электрические сети, оборудование РЗА; нормирование показателей качества электроэнергии (ПКЭ); методы и приборы для экспериментальных исследований ПКЭ; методы расчета ПКЭ; современные схемные решения и технические средства улучшения ПКЭ, а также их проектирование; принципы эксплуатационного контроля КЭ и управления КЭ; вопросы оптимизации КЭ;

уметь: определять источники искажения КЭ и пользоваться ГОСТ 13109-97, нормирующим ПКЭ; рассчитывать основные показатели качества электроэнергии в электрических схемах различной сложности и пользоваться приборами контроля ПКЭ; выбрать схему или техническое устройство для нормализации ПКЭ; осуществить эксплуатационный контроль КЭ и управления КЭ; выбрать оптимальный вариант схемы электроснабжения или электрической сети при наличии источников искажения КЭ; провести комплексные исследования КЭ и решить вопросы его нормализации для реального объекта энергетики или народного хозяйства.

Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых студентами необходимо при изучении данной дисциплины.

Математика: алгебра, решение систем алгебраических уравнений, дифференциальные и интегральные исчисления, графы, теория функций комплексного переменного, вероятность и статистика.

Физика: электричество и магнетизм, явления сверхпроводимости, полупроводники, принципы неопределенности.

Теоретические основы электротехники: уравнения электромагнитного поля, законы электрических цепей; трехфазные цепи; теория электромагнитного поля, поверхностный эффект и эффект близости; электромагнитное экранирование.

Электромеханика: типы электрических машин, трансформаторы, автотрансформаторы, их режимы работы, конструкции.

Электроэнергетика: основные сведения об электрических сетях, схемах подстанций.

Электроэнергетические системы и сети: весь курс.

Электрическая часть станций и подстанций: основные сведения об электрических станциях, их собственных нуждах, условиях функционирования.

В свою очередь дисциплина является базовой для дипломного проектирования.

1.2. Содержание дисциплины

1.2.1. Федеральный компонент

Дисциплина «Качество электроэнергии» относится к циклу «Дисциплины специализации». Согласно ГОС ВПО по направлению «Электроэнергетика» в требованиях к профессиональной подготовленности выпускника (п.7.1) указано: «... инженер должен уметь применять ... средства контроля качества электроэнергии».

1.2.2. Наименование тем, их содержание, объем в лекционных часах

Цель проведения лекций – создать теоретическую основу у студента для самостоятельного теоретического или экспериментального исследования качества электроэнергии в промышленных и городских сетях.

Задача проведения лекций. В результате проведения лекций студенты должны знать: влияние КЭ на системы электроснабжения и технологические процессы; нормирование и эксплуатационный контроль КЭ; методы расчета ПКЭ и методы выбора параметров технических средств или схемные решения для их нормализации; уметь: составить программу экспериментальных исследований ПКЭ, выбрать соответствующие приборы; рассчитать основные ПКЭ в реальной системе электроснабжения; выбрать способ нормализации ПКЭ и рассчитать параметры устройства или схемы, т.о., чтобы был достигнут оптимальный вариант.

Тема 1. Влияние качества электроэнергии на электроприемники и технологические установки (4 ч.).

Понятие КЭ. Актуальность проблемы КЭ. Характеристика КЭ на предприятиях различных отраслей народного хозяйства. Влияние отклонений напряжения на работу асинхронных и синхронных двигателей, вентильных преобразователей, электротермических установок, осветительных электроприемников. Влияние колебаний напряжения на здоровье человека, потребителя электроэнергии, производительность, технологические установки. Влияние несимметрии напряжения на электрические машины, сети, работу рудно-термических печей. Влияние несинусоидальности напряжения на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики, элементы эл. сетей. Сущность электромагнитных помех и их влияние на системы электроснабжения, электронную и микропроцессорную технику, работу ЭВМ. Оценка ущерба от некачественной электроэнергии.

Тема 2. Нормирование качества электроэнергии (4 ч.)

Принципы нормирования КЭ. Номенклатура ПКЭ. Основные и дополнительные ПКЭ, их определение. Требования к ПКЭ, нормативные значения основных ПКЭ. Контроль КЭ.

Тема 3. Экспериментальные исследования КЭ (4 ч.)

Метод экспериментальных исследований КЭ. Измерение отклонений напряжения. Приборы и устройства для измерения несимметрии напряжения. Приборы для измерения высших гармонических составляющих и коэффициента несинусоидальности напряжения. Измерение размахов напряжений и дозы колебаний. Обработка экспериментальных исследований.

Тема 4. Методы расчета ПКЭ (10 ч.)

Погрешности оценки значений ПКЭ. Расчет отклонений напряжения. Расчет коэффициентов обратной и нулевой последовательности. Расчет значений токов высших гармоник, обусловленных различными источниками искажения. Составление схем замещения сети и их преобразования. Определение напряжений гармоник и коэффициента несинусоидальности напряжения. Определение размахов изменения напряжения от различных источников, вызывающих колебание напряжения в сети. Примеры расчета ПКЭ для различных электрических сетей.

Тема 5. Методы и средства нормализации ПКЭ (14 ч.)

Регулирование напряжения. Способы и средства регулирования напряжения. Методы регулирования. Анализ режима напряжения в распределительной сети. Схемные решения по ограничению колебаний напряжения. Технические средства, ограничивающие уровень колебаний: специальные синхронные компенсаторы, ТКРМ, СКУ, ИРМ, СТК. Снижение несимметрии напряжения. Способы симметрирования, схемные решения по снижению несимметрии напряжения. Симметрирующие устройства: трансформаторного типа, схема Штейнметца, емкостные, емкостно-индуктивные и способы их выбора. Снижение несинусоидальности напряжения. Схемные решения. Силовые резонансные фильтры и алгоритм их выбора или проектирования. Расчет параметров силовых резонансных фильтров. Ненастроенные фильтры. Фальтросимметрирующие и фальтрокомпенсирующие устройства. Комбинированные фильтры высших гармоник.

Тема 6. Эксплуатационный контроль ПКЭ (4 ч.)

Периодичность контроля ПКЭ, пункты контроля. Приборы для контроля ПКЭ. Обработка результатов контроля. Скидки с тарифа за снижение КЭ по вине электроснабжающей организации и надбавки к тарифу за снижение КЭ по вине потребителей. Организационные мероприятия.

Тема 7. Оптимизация КЭ (2 ч.)

Постановка задачи оптимизации КЭ. Выбор категории оптимальности и целевой функции и системы ограничений. Решение математической задачи оптимизации КЭ и помощью методов нелинейного программирования.

1.2.3. Практические занятия, их содержание и объем в часах

Практические занятия (всего 14 часов)

Цель практических занятий – научить студентов оценивать качество электроэнергии на объектах электроэнергетики или в точках общего присоединения, определять количественные показатели качества электроэнергии.

В практических занятиях примеры подбираются в соответствии со спецификой специальности, при этом используются реальные схемы объектов и систем.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1	Эксплуатационный контроль ПКЭ. определение соответствия показателям качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.	2
2	Расчет отклонений напряжений в распределительных сетях предприятий и энергосистем. Расчет колебаний напряжения.	2
3	Расчет несинусоидальных и несимметричных режимов.	2
4	Регулирование напряжения в электрических сетях. Выбор добавок напряжения при различных средствах регулирования напряжения.	2
5	Выбор параметров технических средств по снижению несинусоидальности в электрических сетях.	2
6	Выбор параметров технических средств по снижению несимметрии в электрических сетях.	2
7	Снижение колебаний напряжения в электрических сетях.	2

По практическим занятиям используются специализированные задачи отдельно для каждой специальности на индивидуальных карточках.

1.2.4. Самостоятельная работа студентов

Включает изучение лекционного материала и соответствующей литературы при подготовке к практическим занятиям, выполнение домашних заданий, самостоятельное изучение разделов курса по рекомендованной литературе:

1. Контрольные работы на практических занятиях по индивидуальным заданиям.
2. Комплект индивидуальных карточек по основным темам дисциплины.

При изучении дисциплины реализуются следующие формы организации самостоятельной работы студентов:

- аудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя с применением методов активного обучения: на лекциях, практических занятиях, контрольные работы и рефераты;

- внеаудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя: консультации по разделам дисциплины: защита индивидуальных домашних заданий; деловые игры, оценка качества освоения разделов дисциплины, внесенных внеаудиторную СРС без преподавателя;
- подготовка к аудиторным занятиям;
- проработка устного материала, выполнение индивидуальных заданий, написание рефератов, подготовка к деловой игре.

Объем и формы контроля самостоятельной работы отличаются для студентов очной и заочной (включая сокращенную) форм обучения и приведены в учебно-методической карте дисциплины.

Студент допускается к экзамену при условии выполнения всех видов самостоятельной работы, предусмотренных на практических занятиях.

1.2.5. Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний

Входит контроль – опрос, тестирование, промежуточный контроль

Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний.

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- контрольные работы;
- выполнение индивидуальных домашних заданий с последующей их защитой;
- опрос во время практических занятий, сдача задач;
- тестирование.

Итоговый контроль – экзамен.

1.2.6. Вопросы к экзамену

1. Понятие качества электроэнергии. Сущность проблемы качества электроснабжения.
2. Номенклатура ПКЭ.
3. Нормирование отклонений и колебаний напряжения.
4. Нормирование несинусоидальности и несимметрии напряжения.
5. Основные определения качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
6. Правовое и методическое обеспечение проблемы качества электроэнергии.
7. Нормирование электромагнитных помех.
8. Вспомогательные показатели качества электроэнергии.
9. Влияние отклонений напряжения на работу эл. сетей и электроприемников, технологических процессов.
10. Влияние колебаний напряжения на работу силовых элементов и автоматических устройств, технологических установок.
11. Влияние несинусоидальности напряжения на работу эл. сетей, электроприемников, технологических устройств.
12. Влияние несимметрии напряжения на работу эл. сетей, электроприемников, технологических устройств.
13. Влияние электромагнитных помех на эл. сети и электроприемники.
14. Источники искажения качества электроэнергии.
15. Характеристика качества эл. энергии в энергосистемах и на предприятиях.
16. Определение ущербов от некачественной электроэнергии.

17. Измерение отклонений напряжения.
18. Измерение колебаний напряжения.
19. Измерение несинусоидальности напряжения.
20. Измерение несимметрии напряжения.
21. Обработка результатов измерения ПКЭ. погрешности оценки значений ПКЭ.
22. Эксплуатационный контроль качества электроэнергии.
23. Оценка соответствия качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
24. Методы расчета отклонений напряжения.
25. Средства улучшения отклонений напряжения. Построение закона регулирования напряжения.
26. Централизованное регулирование напряжения.
27. Местные средства регулирования напряжения и алгоритм определения добавок напряжения от сети.
28. Методы определения несинусоидальности напряжения.
29. Высшие гармоники, генерируемые различными источниками искажения качества электроэнергии. Эквивалентирование токов высших гармоник.
30. Оценка сопротивлений элементов току высших гармоник.
31. Определение коэффициента искажения синусоидальности напряжения в различных токах сети. Резонансные явления.
32. Методы определения колебаний напряжения.
33. Расчет колебаний напряжения в сетях с ДСП.
34. Расчет колебаний напряжения в сетях со сварочной нагрузкой.
35. Расчет колебаний напряжения в сетях с прокатными станами.
36. Расчет колебаний напряжения в сетях с тягой переменного тока.
37. Методы определения несимметрии напряжения.
38. Расчет тока обратной последовательности при однофазной и двухфазной несимметрии.
39. Определение сопротивлений обратной последовательности элементов сети.
40. Определение коэффициентов обратной и нулевой последовательности в различных точках сети.
41. Схемные решения по снижению несинусоидальности напряжения.
42. Технические средства для снижения несинусоидальности напряжения. Их схемы.
43. Выбор силовых резонансных фильтров.
44. Выбор фильтросимметрирующих устройств.
45. Схемные решения по снижению несимметрии в сети.
46. Выбор параметров симметрирующих устройств.
47. Схемные решения по снижению колебаний напряжения.
48. Технические средства по снижению колебаний напряжения и их выбор.

1.3. Учебно-методические материалы по дисциплине

1.3.1. Перечень обязательной (основной) литературы

1. Савина Н.В. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – 120 с.
2. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 120 с.
3. Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.– 320 с.

1.3.2. Перечень дополнительной литературы.

1. Суднова В.В. Качество электроэнергии. – М.: Энергосервис, 2000. – 86 с.
2. Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. – Братск: БрГТУ, 1999. – 220 с.
3. Курбацкий В.Г., Саламатов Г.П. Измерение и контроль качества электроэнергии в электрических сетях: Лабораторный практикум – Братск: БрГТУ, 1999. – 48 с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 2000. – 331 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат. 2000. – 252 с.
6. Висящев А.Н. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах: в 2-х частях. – Иркутск, 1997. – ч.1 – 91 с., ч.2 – 92 с.
7. ГОСТ 13109–97. Требования к качеству эл. энергии в эл. сетях общего назначения. М.: Изд. стандартов. 1998.
8. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат. 1986. – 168 с.
9. Жежеленко И.В., Божко В.М., Рабинович М.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К.: Техника. 1981. – 160 с.
10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 1994. – 272 с.
11. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987. – 336 с.
12. Борисов В.П., Вагин Г.Я., Электроснабжение электротехнологических установок. К.: Наукова думка, 1985. – 184 с.
13. Повышение эффективности ДСП /под ред. Минеева Р.В. М.: Энергоатомиздат. 1990.-112 с.
14. Смелянский М.Я. Влияние ДСП на системы электроснабжения. М.: Энергия. 1975.–193 с.

Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАЦ
10. Энергетика

1.3.3. Перечень методических и наглядных материалов, используемых в учебном процессе

Информационное обеспечение дисциплины

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>
1. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
2. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО" <http://www.dalenergo.org/>
3. ОАО "ЗЕЙСКАЯ ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
4. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>

Перечень наглядных и других пособий

1. Слайды к медиапроектору по темам лекций.
2. Электрическая схема Амурской энергосистемы, ОЭС Востока, схемы систем электроснабжения предприятий и городов.
3. Данные по замерам качества электроэнергии из ИВК «Омск», ИВК «Ресурс».

Программы для ПЭВМ

1. MathCad
2. Промышленные программно-вычислительные комплексы: “SDO-6”, “RASTR”.
3. ПВК «VISIO».
4. Лабораторный комплекс «Электроэнергетика».

1.4. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Номер лекции	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия практич.	Используемые нагляд. и метод. пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
					содерж.	часы	
1,2	1	1		Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции	4	Блиц-опрос на лекции
3,4	2	2	1	Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции, по теме практики	4	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
5,6	3	3		Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции	4	Блиц-опрос на лекции
7-11	4	4	2,3	Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции, по теме практики	10	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
12-18	5	5	4-7	Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции, по теме практики	14	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
19,20	6	6		Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции	4	Блиц-опрос на лекции
21	7	7		Слайды к медиапроектору по теме лекции	Изучение материалов по теме лекции	2	Блиц-опрос на лекции

2. Краткий конспект лекций

Методические указания по проведению лекций.

Лекционный курс по дисциплине «Качество электроэнергии» направлен на формирование у студентов теоретических основ для самостоятельного исследования качества электроэнергии в электрических сетях различного назначения, принятия инженерных решений по его контролю, анализу и улучшению. Базовым учебником при изучении данной дисциплины является авторский курс лекций, изложенный в [1]. Целью данного раздела является оказание методической помощи в оптимальном распределении теоретического материала между аудиторными занятиями и самостоятельным изучением студентами по лекциям, а также его систематизация.

Лекцию целесообразно строить таким образом, чтобы развивать креативные способности студентов, активизировать их работу в аудитории, поддерживать интерес к излагаемому материалу. Методически построение лекции должно быть направлено на помощь студенту в максимальном усвоении излагаемого материала с присутствием эмоциональной окраски. При чтении лекции нужно задействовать все виды памяти студентов: зрительную, слуховую, моторную. Материал лекции нужно излагать в доступной форме, с приведением примеров из эксплуатационной или проектной практики, выделяя при этом наиболее насущные проблемы региона в области качества электроэнергии и подчеркивая их общность с общероссийскими и мировыми проблемами в данной области. Поставив задачу, решаемую на каждой конкретной лекции, преподаватель должен методически последовательно подвести аудиторию к ее решению таким образом, чтобы студенты активно участвовали в этом процессе, психологически сознавая свой вклад в полученный результат.

В ходе лекции необходимо, опираясь на физическую сущность рассматриваемой задачи по изучению качества электроэнергии, показать основные теоретические выкладки и затем на их основе алгоритмы инженерных решений и их техническую реализацию. Такой подход позволит, с одной стороны не усложнять изложение теоретического материала выводом громоздких формул, а с другой – избежать недопустимого упрощения материала и его сведения до уровня техникума. Оптимальным является подход к чтению лекций, сочетающий классический метод преподавания с новыми педагогическими технологиями, например, такими как методы активизации обучения, информационные технологии и др.

Структура построения следующая:

- тема лекции; цели и задачи, решаемые на лекции;
- план лекции;
- фронтальный блиц-опрос по пройденному материалу, в т.ч. и выносимому на самостоятельную проработку, с увязкой его с тематикой лекции (3-5 минут);
- вступление;
- изложение основного теоретического материала;
- разделы, выносимые на самостоятельную проработку;
- закрепление нового материала;
- выводы.

Фронтальный блиц-опрос может быть заменен небольшой самостоятельной работой (не более 15 минут). Тогда ее целесообразно проводить в конце лекции.

На каждой лекции используется медиапроектор.

При озвучивании разделов, выносимых на самостоятельную проработку, целесообразно указать базовую литературу, где лучше изложен данный материал и предложить поиск дополнительных в Интернете, библиотеке, а также дать краткие методические указания по изучению данных разделов.

Лекция 1.

Введение. Влияние отклонений и несимметрии напряжений на работу электроприемников и электрических сетей.

Цель лекции: показать актуальность проблемы качества электроэнергии, раскрыть зависимость технико-экономических параметров элементов систем электроснабжения от показателей качества электроэнергии, характеризующих отклонение и несимметрию напряжения.

Задачи:

- раскрыть сущность проблемы качества электроэнергии;
- ввести основные понятия и определения в области качества электроэнергии;
- показать влияние отклонений напряжения на технико-экономические характеристики наиболее распространенных элементов систем электроснабжения;
- показать влияние несимметрии напряжения на технико-экономические характеристики основных элементов систем электроснабжения.

План лекции.

1. Актуальность проблемы качества электроэнергии.
2. Основные понятия и определения.
3. Влияние отклонений напряжения на работу систем электроснабжения.
4. Влияние несимметрии напряжения на работу электрической сети.

Краткое содержание лекции.

Проблема качества электроэнергии относится к наиболее значимым в электроэнергетике. Это обусловлено отрицательными последствиями низкого качества электроэнергии (КЭ), такими как:

- увеличение потерь электроэнергии;
- сокращение срока службы изоляции электроустановок, технологического оборудования;
- сбои, ошибки и отказы в работе релейной защиты и автоматики, телемеханики и связи, микропроцессорной техники;
- увеличение капитальных вложений в электрические сети и системы электроснабжения;
- рост эксплуатационных издержек в сетях энергосистем и их потребителей;
- снижение надежности и устойчивости систем;
- нарушение нормального функционирования электроприемников и потребителей электроэнергии;
- возрастание рисков для здоровья и жизни людей, окружающей среды.

В связи с этим необходимо уметь оценивать качество электроэнергии и обеспечивать его количественное значение в пределах, исключающих негативные последствия.

Качество электроэнергии – это совокупность ее свойств, определяющих воздействия на электрооборудование, аппараты и приборы и оцениваемых параметрами качества электроэнергии, описывающими особенности процесса передачи электроэнергии для ее использования в нормальных условиях эксплуатации. Нормальные условия эксплуатации предусматривают непрерывность электроснабжения при обеспечении промышленной частоты напряжения питания требуемой величины, формы волны, его одинаковости по фазам (симметрии).

К параметрам качества электроэнергии относят следующие: отклонение напряжения, колебание напряжения, несинусоидальность кривой напряжения, несимметрию напряжения, отклонение частоты, электромагнитные помехи.

Отклонение напряжения – это медленное изменение его значений относительно номинального.

Колебание напряжения – это быстрые изменения его текущих значений относительно друг друга.

Несинусоидальность кривой напряжения – это искажение формы волны, т.е. отличие формы кривой напряжения от синусоиды.

Несимметрия напряжения – это неравенство фазных и линейных напряжений как по амплитуде, так и аргументу (углу).

Отклонение частоты – это изменение текущих значений частоты относительно номинального.

Электромагнитные помехи – это выбросы (импульсы) и провалы напряжения длительностью не более 30 с, кратковременные перенапряжения.

Под управлением КЭ понимают проведение методических, организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение КЭ в системах электроснабжений в пределах установленных норм и правил.

Методические мероприятия направлены на: ограничение уровней ПКЭ, источником искажения качества электроэнергии при этом является как электрооборудование и отдельные ЭП потребителя, так и технологическое оборудование энергосистемы; управление нормальными, аварийными и послеаварийными режимами путем регулирования напряжения и частоты; контроль и анализ ПКЭ; обеспечение надежности функционирования систем электроснабжения в условиях нормального качества электроэнергии.

К организационным мероприятиям относится правовое и нормативное обеспечение КЭ, включающее юридическую, экономическую и финансовую базу и направленное на укрепление на оптовых и розничных рынках энергии и мощности договорной основы в части требований к КЭ.

Технические мероприятия включают в себя: применение схемных и технических решений, технических средств, направленных на обеспечение КЭ в нормируемых пределах; мониторинг КЭ; производство средств измерения для учета и контроля КЭ, систем управления КЭ, в т.ч. и автоматизированных.

Далее дается характеристика качества электроэнергии в мире, России и на Дальнем Востоке.

Прежде чем изучать проблему качества электроэнергии необходимо оценить влияние его параметров на систему электроснабжения.

Отклонение напряжения.

Влияние отклонения напряжения можно рассмотреть на примере характерных электроприемников.

Асинхронные двигатели: при отклонении напряжения изменяются частота вращения ротора, значения потерь активной мощности, потребляемой реактивной мощности, срок службы изоляции, экономические показатели, характеризующие работу двигателя. В ходе лекции ставится задача раскрыть данные зависимости и совместно со студентами анна решается путем применения методов активизации обучения.

Синхронные двигатели: при отклонении напряжения изменяется генерируемая реактивная мощность, потери мощности, запас статической устойчивости. В ходе лекции на основе физических закономерностей раскрываются данные зависимости, при этом используются методы активизации обучения.

Вентильные и тиристорные преобразователи: при соблюдении постоянства выпрямленного тока отклонение напряжения приводит к изменению коэффициента мощности преобразователя и потребляемой реактивной мощности. Если преобразователи неуправляемые, то отклонение напряжения влияет на производительность механизмов и расход электроэнергии. Данные зависимости нужно раскрыть на лекции.

Электротермические установки: отрицательные отклонения напряжения приводят к снижению производительности и повышенному расходу электроэнергии.

Осветительные установки: положительные отклонения напряжения увеличивают производительность и сокращают срок службы ламп.

Студентам предлагается раскрыть эти закономерности самостоятельно.

Несимметрия напряжения.

Источники несимметрии – мощные однофазные и двухфазные электроприемники, трехфазные электроприемники, работающие в несимметричном режиме, неполнофазные режимы сети.

При несимметрии напряжения в сети появляются дополнительные потери в ее элементах, сокращается срок службы изоляции, ламп, оборудования, снижается генерируемая реактивная мощность синхронных машин, экономические показатели оборудования.

В ходе лекции показывается за счет чего растут потери в элементах сети при несимметрии, дается основа для самостоятельного вывода зависимости срока службы изоляции от несимметрии на базе знаний, полученных при изучении дисциплины.

Изоляция и перенапряжения. Предлагается самостоятельно проработать вопрос о влиянии несимметрии на экономические показатели работы оборудования.

Выводы.

1. Раскрыта сущность проблемы качества электроэнергии с выделением ее технических, методических и экономических аспектов.
2. Дана характеристика качества электроэнергии в разных странах и его специфические особенности в России.
3. Введены основные понятия и определения.
4. Показано как влияет отклонение напряжения на работу элементов системы электроснабжения.
5. Раскрыто негативное воздействие несимметрии напряжения на элементы систем электроснабжения.

Лекция 2.

Влияние колебаний и несинусоидальности напряжения, электромагнитные помех на электроприемники и технологические установки.

Цель лекции: раскрыть зависимость технико-экономических параметров элементов систем электроснабжения и технологических установок от показателей качества электроэнергии, характеризующих колебания, несинусоидальность напряжения, электромагнитные помехи (ЭМП).

Задачи:

- показать влияние колебания напряжения на систему электроснабжения, человека, технологические установки;
- раскрыть влияние несинусоидальности напряжения на электроэнергетическую систему и ее подсистемы;
- ввести понятие электромагнитные помех и выявить их воздействие на элементы электроэнергетической системы;
- показать каким образом формируется ущерб от низкого качества электроэнергии.

План лекции.

1. Колебания напряжения и их воздействия на систему электроснабжения, технологию.
2. Несинусоидальность напряжения и ее влияние на электроэнергетическую систему.
3. Электромагнитные помехи и их негативные последствия.
4. Ущерб от низкого качества электроэнергии.

Краткое содержание лекции.

Колебания напряжения возникают главным образом при работе резкопеременных нагрузок: управляемых вентильных или тиристорных преобразователей с широким диапазоном и большой скоростью регулирования, дуговых сталеплавильных печей (ДСП), сварки.

Колебания напряжения отрицательно складываются на зрении и на производительности технологических процессов. При размахах изменений напряжения более 10% наблюдается погасание газоразрядных ламп; при размахах более 15% отпадают контакты магнитных пускателей, выходят из строя батареи конденсаторов (БК) и вентили преобразовательных агрегатов.

Колебания напряжения отрицательно сказываются на работе большого числа потребителей: на работе индукционных печей; синхронных двигателей высокочастотных преобразовательных агрегатов; сварки; систем автоматического регулирования, в большинстве случаев выводя их из строя.

При колебаниях напряжения снижается производительность электролизных установок, сокращается их срок службы, на заводах химического волокна рвутся нити или становятся разнотолщинными, а это брак. Колебания амплитуды и фазы напряжения, вызываемые работой прокатных станов, приводят к колебаниям электромагнитного момента, активной и реактивной мощности синхронных генераторов ТЭЦ предприятий, что отрицательно сказывается на экономичности всей работы станции в целом, может вызвать неустойчивую работу систем автоматического регулирования возбуждения и реактивной мощности синхронных генераторов, а также ложную работу устройств форсировки тока возбуждения.

В процессе лекции на основе физических закономерностей раскрывается зависимость устойчивости системы от колебаний напряжения с применением новых педагогических технологий. Компьютерное моделирование таких процессов поможет лучше усвоить материал.

Поставив задачу, студентам предлагается самостоятельно проработать вопрос влияния колебаний напряжения на отказы электроустановок.

Несинусоидальные режимы возникают в сетях с нелинейными нагрузками: вентильными преобразователями, ДСП, мощными магнитными усилителями, люминесцентными и ртутными лампами и т.д.

Высшие гармоники напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах; силовых трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов, так как они вспучиваются и взрываются из-за перегрева токами высших гармоник; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возникает аварийность в кабельных сетях; появляются сбои в работе релейной защиты и автоматики, телемеханики и связи.

Высшие гармоники напряжения и тока также сказываются на значениях коэффициентов мощности и вращающего момента электродвигателей. Однако, снижение этих величин оказывается небольшим. Уровень дополнительных активных потерь от высших гармоник в сетях энергосистем и в сетях предприятий, электрифицированного железнодорожного транспорта варьируется в зависимости от структуры электропотребления и может достигать 30-40% от потерь при синусоидальных токах и напряжениях.

Наибольшему воздействию высших гармоник подвергаются батареи конденсаторов.

По ходу лекции показывается каким образом высшие гармонические составляющие вызывают дополнительные потери мощности в электроустановках. Ставится задача рассмотреть вопрос выхода из строя конденсаторных установок при несинусоидальности напряжения.

На конкретных примерах показывается значимость этой проблемы.

В системах электроснабжения нашли широкое применение электронные и микроэлектронные системы управления, микропроцессоры и ЭВМ. Это привело к снижению уровней помехоустойчивости систем управления электроприемников и резкому возрастанию количества их отказов.

Основной причиной отказов является воздействие электромагнитных помех (ЭМП), возникающих при электромагнитных переходных процессах как в сетях энергосистем, так и в сетях предприятий. Длительность протекания переходных процессов составляет от нескольких периодов промышленной частоты до нескольких секунд, а эффективная полоса частот простирается до десятков мегагерц. ЭМП в момент возникновения проявляются, как правило, в виде провалов напряжения.

Причины возникновения ЭМП: однофазные короткие замыкания на ЛЭП, которые либо самоликвидируются, либо устраняются при кратковременном отключении с последующим АПВ; междуфазные замыкания в результате атмосферных явлений; отключение компенсирующих устройств; перенапряжения при оперативных и аварийных коммутациях, при коммутациях батарей конденсаторов и резонансных фильтров, отключении ненагруженных линий и силовых трансформаторов, неодновременной коммутации контактов коммутационной аппаратуры, феррорезонансные явления.

Количество посадок напряжения с глубиной до 20 % достигает в распределительных сетях 60 %. Свыше 2/3 остановов механизмов приходится на посадки с глубиной более 20 %.

Увеличение мощности энергосистем и количества ВЛ, применяемых для надежности электроснабжения, приводит к снижению надежности функционирования электронных систем управления и возрастанию числа отказов помехочувствительных электроприемников.

Восприимчивость электронного оборудования и вычислительной техники к ЭМП зависит от амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) электроприемников и от АЧХ помех. Крутизна фронта посадки напряжения оказывает существенное влияние на вероятность отказов помехочувствительных электроприемников.

Несинусоидальность, колебания и отклонения напряжения усиливают восприимчивость электронных систем к ЭМП. Анализ сбоев персональных компьютеров показал, что основной причиной их возникновения являются электромагнитные помехи при наличии колебания и несимметрии питающего напряжения. При этом чувствительность их отдельных блоков к помехам различна.

Качество электроэнергии существенным образом влияет и на надежность электроснабжения: возрастает число отказов элементов, число ложных срабатываний релейной защиты (в том числе и микропроцессорной), наблюдается аварийный выход из строя некоторых видов оборудования.

Сбои в каналах передачи информации по силовым цепям при наличии высших гармоник приводят к подаче неправильных команд на управление коммутационной аппаратурой.

Таким образом, даже поверхностный анализ влияния качества энергии на системы электроснабжения показал важность его нормирования и поддержания в пределах, требуемых ГОСТ.

Студентам предлагается самостоятельно на базе знаний, полученных при изучении дисциплины Электромагнитная совместимость осуществить классификацию электромагнитных помех и их ранжирование по степени влияния на электроустановки и систему.

Низкое качество электроэнергии в условиях эксплуатации приводит к ущербам. Различают две составляющие экономического ущерба: электромагнитную и технологическую.

Электромагнитная составляющая определяется в основном изменением срока службы изоляции электрооборудования и изменением потерь активной мощности. Технологическая составляющая ущерба вызывается влиянием качества электроэнергии на производительность технологических установок и себестоимость выпускаемой продукции.

В общем виде ущерб, обусловленный каждым из показателей качества электроэнергии представляется (ПКЭ) степенным номиналом [2, 3].

Функциональные зависимости от каждого из ПКЭ выносятся на самостоятельную проработку, и приведены в [2, 3].

Выводы.

1. Показано как влияют колебания напряжения на элементы электроэнергетической системы, технологические процессы, здоровье человека.
2. Дана характеристика влияния несинусоидальности напряжения на электроэнергетическую систему и ее элементы.
3. Выявлено негативное воздействие электромагнитных помех на элементы электроэнергетических систем.
4. Дана оценка экономическим ущербам от низкого качества электроэнергии.

Лекция 3.

Нормирование качества электроэнергии.

Цель лекции: раскрыть сущность нормирования качества электроэнергии и охарактеризовать нормативную базу.

Задачи:

- определить основную терминологию ГОСТ 13109-97;
- дать характеристику ПКЭ;
- показать, как определяется ПКЭ.

План лекции.

1. Принципы нормирования ПКЭ.
2. Терминология ГОСТ 13109-97.
3. Основные ПКЭ и их определение.
4. Вспомогательные параметры электрической энергии и их определение.

Краткое содержание лекции.

Главной организацией, занимающейся координацией работ в области стандартизации в электронике и смежных областях знаний в Европе, является МЭК. Следует назвать также такие международные организации, как СИГРЭ – международный комитет по большим электрическим системам и ЮНИПЕД – союз производителей и дистрибьютеров ЭЭ.

Крупнейшей региональной организацией является CENELEC, которая занимается нормализацией в области КЭ для стран ЕС. Есть также ряд международных профессиональных организаций и национальных комитетов, которые разрабатывают национальные стандарты на КЭ, как правило, на основе норм МЭК.

Принятие таких норм производится, главным образом, методом экспертных оценок, путем голосования.

В большинстве стран СНГ принят стандарт ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В этом стандарте в качестве допустимых значений ПКЭ приняты, в основном, уровни ЭМС в СЭС, приведенные в публикации МЭК в качестве рекомендаций для составления национальных стандартов.

В странах ЕС приняты без изменений – либо с несущественными изменениями – нормы EN50160; этот стандарт разработан Европейским Комитетом нормализации в области электротехники (CENELEC) и принят в 1994г.

В странах Северной и Южной Америки, а также в некоторых африканских странах принят американский стандарт IEEE Std519, в котором приводятся ограничения, относящиеся к ВГ. Он отличается от европейских стандартов тем, что ограничивается значения ВГ тока нагрузки, создаваемые ее нелинейной частью, в точке общего подключения. Стандарты МЭК ограничивают уровни ВГ напряжения в распределительных сетях и, таким образом, возникает проблема разделения ответственности за ухудшение КЭ

между поставщиком и потребителем ЭЭ, для чего необходима оценка «долевого вклада» ЭС и нагрузки потребителя в значение ПКЭ на шинах раздела балансовой принадлежности.

В настоящее время нормативным документом в области качества электроэнергии в России является ГОСТ 13109-97 – «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», утвержденный Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации и введенный в качестве Госстандарта РФ с 1.01.99 г.

Стандарт соответствует международным стандартам МЭК 868, МЭК 1000-3-2, МЭК 1000-3-3, МЭК 1000-4-1 и публикациям МЭК 1000-2-1, МЭК 1000-2-2 в части уровней электромагнитной совместимости в системах электроснабжения и методов измерения электромагнитных помех.

Студентам самостоятельно предлагается произвести сопоставление стандартов разных стран [3, табл.1.3].

Принципы нормирования ПКЭ по напряжению основываются на технико-экономических предпосылках и состоят в следующем:

а) ПКЭ по напряжению имеют энергетический смысл, т.е. характеризуют мощность (энергию) искажения кривой напряжения; степень отрицательного воздействия энергии искажения на электрооборудование и технологические процессы соизмеряется со значением ПКЭ;

б) предельно допустимые значения ПКЭ выбираются из технико-экономических соображений;

в) ПКЭ нормируются в течение определенного интервала времени с заданной вероятностью для получения достоверных и сопоставимых значений;

г) допустимые значения ПКЭ указываются на зажимах ЭП и в узлах электрических сетей.

Система ПКЭ, основанная на этих предпосылках, может использоваться также в проектной практике; она позволяет осуществить массовое метрологическое обеспечение контроля КЭ с помощью относительно простых и недорогих приборов, а также реализовать мероприятия и технические средства нормализации КЭ.

Терминология, внесенная в ГОСТ 13109-97 следующая:

– система электроснабжения общего назначения - совокупность электроустановок и электрических устройств энергоснабжающей организации, предназначенных для обеспечения электрической энергией различных потребителей (приемников электрической энергии);

– электрическая сеть общего назначения - электрическая сеть энергоснабжающей организации, предназначенная для передачи электрической энергии различным потребителям (приемникам электрической энергии);

– центр питания - распределительное устройство генераторного напряжения электростанции или распределительное устройство вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы, к которым присоединены распределительные сети данного района;

– точка общего присоединения - точка электрической сети общего назначения, электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии (входным устройствам рассматриваемого приемника электрической энергии), к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей (входные устройства других приемников);

– потребитель электрической энергии - юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью);

– кондуктивная электромагнитная помеха в системе энергоснабжения - электромагнитная помеха, распространяющаяся по элементам электрической сети;

– уровень электромагнитной совместимости в системе энергоснабжения – регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемый в качестве эталонного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами энергоснабжающей организации и потребителей электрической энергии, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами без нарушения их нормального функционирования;

– огибающая среднеквадратичных значений напряжения - ступенчатая временная функция, образованная среднеквадратичными значениями напряжения, дискретно определенными на каждом полупериоде напряжения основной частоты;

– фликер - субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники;

– доза фликера - мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени;

– время восприятия фликера - минимальное время для субъективного восприятия человеком фликера, вызванного колебаниями напряжения определенной формы;

– частота повторения изменений напряжения - число одиночных изменений напряжения в единицу времени;

– длительность изменения напряжения - интервал времени от начала одиночного изменения напряжения до его конечного значения;

– провал напряжения - внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9 U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд;

– длительность провала напряжения - интервал времени между начальным моментом провала напряжения и моментом восстановления напряжения до первоначального или близкого к нему уровня;

– частота появления провалов напряжения - число провалов напряжения определенной глубины и длительности за определенный промежуток времени по отношению к общему числу провалов за этот же промежуток времени;

– импульс напряжения - резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд;

– амплитуда импульса - максимальное мгновенное значение импульса напряжения;

– длительность импульса - интервал времени между начальным моментом импульса напряжения и моментом восстановления мгновенного значения напряжения до первоначального или близкого к нему уровня;

– временное перенапряжение - повышение напряжения в точке электрической сети выше $1,1 U_{ном}$ продолжительностью более 10 мс, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях;

– коэффициент временного перенапряжения - величина, равная отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети;

– длительность временного перенапряжения - интервал времени между начальным моментом возникновения временного перенапряжения и моментом его исчезновения.

В стандарт введены следующие *показатели качества электроэнергии* (ПКЭ).

– установившееся отклонение напряжения δU_y ;

– размах изменения напряжения δU_i ;

– доза фликера P_f : P_{St} - кратковременная доза фликера;

P_{Lt} - длительная доза фликера;

– коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;

- коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ;
- отклонение частоты Δf ;
- длительность провала напряжения Δt_n ;
- импульсное напряжение $U_{имп}$;
- коэффициент временного перенапряжения $K_{пер U}$.

Определения основных ПКЭ согласно ГОСТ 13109-97 приведены в [1].

Вспомогательные параметры электроэнергии

Для расчета ПКЭ необходимо знать следующие параметры.

- 1) Частота повторений изменения напряжения $F_{\delta U_i}$ - для размаха изменения напряжения.
- 2) Интервал между изменениями напряжения $\Delta t_{i,i+1}$ - для определения размаха изменения напряжения.
- 3) Глубина провала напряжения δU_n , %, определяемая как (см. рис.1)

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{min}}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

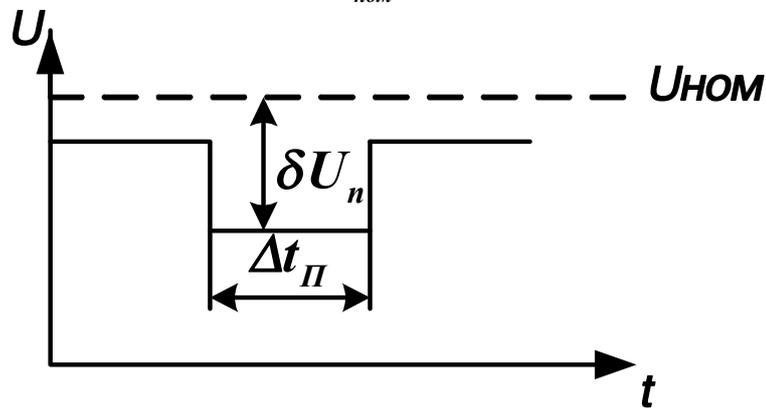


Рис.1. Глубина провала напряжения

- 4) Частость появления провалов напряжения, F_n , %

$$F_n = \frac{m \cdot (\delta U_n, \Delta t_n)}{M}$$

где $m \cdot (\delta U_n, \Delta t_n)$ - число провалов напряжения частотой δU_n и длительностью Δt_n за период времени наблюдения T ;

M – суммарное числа провалов напряжения за период времени наблюдений T .

- 5) Длительность импульса, определяемая по уровню половины его амплитуды, $\Delta t_{имп 0,5}$.

- 6) Длительность временного перенапряжения, $\Delta t_{пер U}$.

На самостоятельное изучение выносятся подробное ознакомление с ГОСТ 13109-97 на основе тех знаний, которые студенты получили на лекции.

Выводы.

1. Дан сравнительный анализ нормативных документов по качеству электроэнергии разных стран мира.
2. Показаны принципы нормирования ПКЭ.
3. Дана характеристика терминологии, принятой в ГОСТ 13109-97.
4. Показано как определять и нормировать основные ПКЭ.
5. Раскрыта необходимость введения вспомогательных параметров электроэнергетической энергии и дано их определение.

Лекция 4.

Правовая основа взаимоотношений потребителей и электроснабжающих организаций в области качества электроэнергии.

Цель лекции: дать оценку правового аспекта качества электроэнергии.

Задачи:

- раскрыть вопросы правового регулирования взаимодействия субъектов Российского рынка электроэнергии в области качества электроэнергии;
- показать, как выявить виновника искажения качества электроэнергии и как определяются штрафные санкции за искажение качества электроэнергии.

План лекции.

1. Перечень документов, регламентирующих взаимоотношения в области качества электроэнергии.
2. Гражданский кодекс РФ.
3. Закон об электроэнергетике и закон об электромагнитной совместимости.
4. Правила энергоснабжения в РФ и Правила присоединения потребителя к сети общего назначения.
5. Инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию.
6. Договор энергоснабжения.
7. Методические указания по контролю и анализу качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения.

Краткое содержание лекции.

За последние годы в связи с формированием рыночной экономики и необходимостью правового регулирования взаимодействия субъектов Российского рынка разработаны соответствующие нормативно-технические и методические документы, которые вместе с ГОСТ 13109-97 отражают правовую основу взаимоотношений энергоснабжающих организаций и потребителей (абонентов) в области качества электроэнергии. Ниже приведены наиболее значимые из них.

1. Гражданский кодекс РФ, статья 542 часть 2, статья 543.

Статья 542. Качество электроэнергии, подаваемой энергоснабжающей организацией, должно соответствовать требованиям, установленным государственными стандартами и иными обязательными правилами или предусмотренным договором энергоснабжения.

Статья 543. Абонент обязан обеспечивать надлежащее техническое состояние эксплуатируемых электрических сетей, приборов и оборудования. Под надлежащим техническим состоянием понимается, кроме всего прочего, наличие устройств, улучшающих качество электроэнергии.

2. Федеральный закон об электромагнитной совместимости.

В целях исключения бесконтрольного применения технических средств, являющихся источником недопустимых ЭМП или обладающих пониженной помехоустойчивостью, федеральные органы исполнительной власти наделяются правом осуществлять в пределах своей компетенции государственный надзор и контроль за соблюдением юридическими и физическими лицами положений, относящихся к обеспечению ЭМС.

Практическое проведение этого надзора должно осуществляться органами государственного надзора.

Закон устанавливает требования к разработке, введению в эксплуатацию и непосредственно к эксплуатации технических средств. ЭМП не должны нарушать нормального функционирования других технических средств или представлять опасность для жизни, здоровья населения и обслуживающего персонала, а с другой – технические средства должны иметь уровень помехозащищенности, обеспечивающий их нормальное функционирование в среде с допустимым уровнем помех. Качество электроэнергии в электрических сетях должно быть таким, чтобы обеспечить нормальное функционирование технических средств.

Закон запрещает реализацию (поставку, продажу) и применение технических средств без сертификата, подтверждающего их соответствие требованиям ЭМС, а также поставку потребителям электрической энергии из сетей общего назначения при отсутствии сертификата у энергоснабжающей организации.

3. Правила энергоснабжения в РФ

Эти правила являются основополагающими документами, определяющими права и обязанности энергоснабжающих организаций и потребителей во всех аспектах использования электроэнергии, в том числе и в области ее качества. К ним относятся заявка на присоединение, технические условия на присоединение к энергоснабжающей организации, договор на энергоснабжение. В заявке установлен порядок решения вопросов, связанных с качеством электроэнергии, как на стадии присоединения электроустановок потребителя к сети общего назначения, так и при их эксплуатации.

В заявке на присоединение, подаваемой потребителем в энергоснабжающую организацию, в части качества электроэнергии должны содержаться:

- ориентировочный состав электрооборудования, влияющего на качество электроэнергии (преобразователи, сварочные установки, электродуговые печи, одно - и двухфазные печи и т.п.);

- требования к отклонениям напряжения в точке присоединения в режимах максимальных и минимальных нагрузок потребителя;

- длительность кратковременных перерывов питания, длительность и глубина провалов напряжения, допустимых по условиям технологии производства.

В технических условиях (ТУ) на присоединение энергоснабжающая организация указывает:

- обеспечиваемые ею в точке присоединения потребителя к сети отклонения напряжения в режиме максимальных и минимальных нагрузок потребителя;

- допустимое влияние потребителя на качество энергии по каждому ее показателю, определяемому в соответствии с «правилами присоединения потребителя к сети общего назначения по условиям контроля качества электроэнергии»;

- требования к контролю качества электроэнергии;

- сопротивление сети энергоснабжающей организации по прямой, обратной и нулевой последовательностям, на частотах высших гармоник, приведенные к точке присоединения (по требованию потребителя).

Контроль качества электроэнергии (КЭ) в условиях эксплуатации должен проводиться в точке учета электроэнергии, за исключением тяговых подстанций. Для них контроль КЭ должен осуществляться на шинах высокого напряжения, а также в точках учета электроэнергии потребителей, ближайших к точкам присоединения тяговых подстанций.

В договоре на энергоснабжение необходимо указывать:

- диапазоны отклонений напряжения в точках присоединения сети (отдельно для часов максимальных и минимальных нагрузок), требуемые для нормальной работы электроустановок;

- допустимые вклады потребителя в значения показателей качества электроэнергии.

Требуемый диапазон отклонения напряжения в каждом режиме не должен превышать 3 % и в часы минимума нагрузок потребителя должен быть ниже, чем в часы максимума.

Например, в часы минимума нагрузки отклонения напряжения могут составлять от 1 до 2 %, а в часы максимума – от 4 до 7 %. Распространенная практика указания в договоре одного диапазона ($\pm 5\%$) безотносительно к режиму является неправильной, так как не позволяет обеспечить нормируемое значение отклонения напряжения в сетях 0,4 кВ.

Периодичность контроля ПКЭ устанавливается при определении:

- а) фактического вклада потребителя и ПКЭ для выявления стороны, виновной в нарушении норм КЭ.

б) времени превышения норм КЭ в течении периода измерений, необходимого для определения размеров скидок и надбавок к тарифу. Относительное значение скидок и надбавок, полученное за время измерений распространяется на весь квартал (например 7 дней – на 3 месяца).

4. Правила присоединения потребителя к сети общего назначения по условиям влияния на КЭ устанавливают способы расчета допустимых вкладов потребителей в значение каждого из ПКЭ, нормируемых стандартом. Эти значения при эксплуатации включаются в договор на энергоснабжение.

5. Инструкция о порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию.

Раздел 4 – устанавливает штрафные санкции к виновнику ухудшения качества электроэнергии в виде скидки (надбавки) в размере до 10% тарифа на электроэнергию.

Конкретное значение скидки (надбавки) зависит от степени и общей продолжительности нарушения норм ГОСТ 13109-97 в точке учета электроэнергии в течение расчетного периода (месяц).

Отсутствие в стандарте норм на некоторые ПКЭ не исключает установления в договоре на энергоснабжение тех или иных условий в части этих ПКЭ и обязательств о возмещении реального ущерба от низкого качества электроэнергии. Аналогично - для ПКЭ, по которым установлены нормы. Так как ущерб реально установить очень трудно, в инструкции установлена формализованная система возмещения ущерба, выраженная в виде скидок и надбавок к тарифу.

Механизм штрафных санкций распространяется на все ПКЭ, численные значения норм которых есть в ГОСТе, но с формализованным подходом, в результате которого механизм традиционных санкций распространяется на следующие шесть показателей качества электроэнергии из одиннадцати:

- отклонение частоты;
- установившееся отклонение напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент несимметрии по обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии по нулевой последовательности.

Ответственность за недопустимые отклонения частоты полностью лежит на энергоснабжающей организации. А по отклонениям напряжения энергоснабжающая организация несет ответственность в случае, если потребитель не нарушает технических условий потребления и генерации реактивной мощности.

Ответственность за нарушение норм по четырем остальным из шести выделенных ПКЭ (ПКЭ с определяемой ответственностью) возлагается на виновника ухудшения КЭ.

Виновник определяется на основе сопоставления включенного в договор допустимого вклада в значение рассматриваемого ПКЭ в точке учета электроэнергии с фактическим вкладом, вычисляемым на основе измерений в случае нарушения норм ГОСТ 13109-97.

Если допустимые вклады в договоре не указаны, энергоснабжающая организация несет ответственность за низкое качество электроэнергии, независимо от виновника его ухудшения.

Несмотря на отсутствие в настоящее время промышленного выпуска специальных приборов для измерения и регистрации ПКЭ, практически все они могут быть определены средствами измерения общего использования (частотомеры, вольтметры, самописцы и т. д.). Исключение составляет доза фликера, измеряемая фликерметрами, не выпускаемыми в России.

Энергоснабжающие организации фактически в каждом конкретном случае должны решать вопрос о целесообразности включения в договор по своей инициативе двух показателей – коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Потребителю не выгодно это, если только его электрические устройства не являются источниками помех.

6. Правила применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии (утверждены Главгосэнергонадзором 14 мая 1991 года – сейчас новая редакция разрабатывается и утверждается) устанавливают способы определения фактических вкладов потребителя в уровни ПКЭ в точке учета электроэнергии с помощью измерений или расчетов.

7. Методические указания по контролю и анализу качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения (РД 34. 15. 501-88) – устанавливают основные положения по контролю и анализу качества электроэнергии (выбор пунктов измерения ПКЭ, схемы присоединения приборов, методы обработки результатов измерения и т. п.).

8. Правила учета электроэнергии (в 1996 г. утверждены Минюстом) – в качестве одной из основных целей учета устанавливают получение достоверной информации для финансовых расчетов за электроэнергию с учетом ее качества. Средства учета электроэнергии и контроля ее качества должны быть защищены от несанкционированного доступа для исключения возможности искажения результатов измерения.

Выводы.

1. Приведен перечень основных правовых документов в области качества электроэнергии.
2. Раскрыты вопросы правового регулирования по качеству электроэнергии между субъектами РФ.
3. Показано как определяются штрафные санкции за ухудшение качества электроэнергии.

Лекция 5.

Экспериментальные исследования КЭ.

Цель лекции: ознакомиться с методом проведения экспериментальных исследований ПКЭ и обработки результатов измерений.

Задачи:

- дать характеристику методики проведения измерений ПКЭ;
- привести сравнительный анализ приборов для измерения ПКЭ;
- показать порядок обработки результатов измерения ПКЭ.

План лекции.

1. Погрешности измерения ПКЭ.
2. Средства ПКЭ.
3. Обработка результатов измерения ПКЭ.

Краткое содержание лекции.

Для реализации аппаратного контроля КЭ одним из основных является вопрос о требованиях к измерительным приборам и, в первую очередь, о допустимых погрешностях измерения ПКЭ, поскольку массогабаритные, стоимостные и другие характеристики приборов в большой мере зависят от их точности. Вопрос о допустимых погрешностях измерения ПКЭ тесно связан с техническими и экономическими аспектами проблемы КЭ. При отклонениях, несимметрии и несинусоидальности напряжения экономический ущерб определяется в основном квадратом отклонения соответствующего ПКЭ от оптимального или нулевого значения. Функция экономического ущерба малочувствительна, т.е. изменяется в весьма небольших пределах при изменении ПКЭ в диапазоне значений, допустимых стандартами, но весьма чувствительная в области значений ПКЭ больших допустимых.

Можно сделать вывод о том, что высокая – лабораторного класса – точность измерений ПКЭ для обеспечения нормальной работы СЭС не требуется.

Требования к погрешности измерения ПКЭ

Значения погрешности измерений показателей КЭ должны находиться в интервале, ограниченном предельно допускаемыми значениями, указанными в таблице 1.

Таблица 1. Погрешность измерения показателей качества электроэнергии

Показатель КЭ, единица измерения	Нормы КЭ (пункты стандарта)		Пределы допустимых погрешностей измерений показателей КЭ	
	Нормально допустимые	Предельно допустимые	абсолютной	относительной, %
Установившееся отклонение напряжения, $\delta U_y, \%$	± 5 (5.2.1)	± 10 (5.2.1)	$\pm 0,5$	-
Размах изменения напряжения, δU_t	-	Кривые 1,2 на рисунке 1 (5.3.1, 5.3.2)	-	± 8
Доза фликера, отн. ед.: кратковременная P_{St} длительная P_{Lt}	- -	1,38; 1,0 1,0; 0,74 (5.3.3, 5.3.4)	- -	$\pm 0,5$ $\pm 0,5$
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U, \%$	По табл. 1 (5.4.1)	По табл. 1 (5.4.1)	-	± 10
Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, $K_{U(n)}, \%$	По табл. 2 (5.4.2)	По табл. 2 (5.4.2)	$\pm 0,05$ при $K_{U(n)} < 1,0$	± 5 при $K_{U(n)} \geq 1,0$
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}, \%$	2 (5.5.1)	4 (5.5.1)	$\pm 0,3$	-
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U}, \%$	2 (5.5.2)	4 (5.5.2)	$\pm 0,5$	-
Отклонение частоты Δf , Гц	± 2 (5.6.1)	$\pm 0,4$ (5.6.1)	$\pm 0,03$	-
Длительность провала напряжения Δt_n , с	-	30 (5.7.1)	$\pm 0,01$	-
Импульсное напряжение $U_{имп}$, кВ	-	-	-	± 10
Коэффициент временного перенапряжения $K_{пер U}$, отн. ед.	-	-	-	± 10

До оснащения электрических сетей трансформаторами и делителями напряжения, входящими в состав оборудования электрических сетей, обеспечивающими совместно со средствами измерений показателей КЭ установленную погрешность измерений, допускается проводить измерение показателей КЭ (за исключением показателя Δf) с погрешностью, превышающей установленную не более чем в 1,5 раза.

Интервалы усреднения результатов измерений показателей КЭ установлены в таблице 2.

Таблица 2. Интервалы усреднения результатов измерений показателей КЭ

Показатель КЭ	Интервал усреднения, с
Установившееся отклонение напряжения	60
Размах изменения напряжения	-
Доза фликера	-
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения	3
Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения	3
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности	3
Отклонение частоты	20
Длительность провала напряжения	-
Импульсное напряжение	-
Коэффициент временного перенапряжения	-

Средства измерения ПКЭ.

Общие требования к средствам измерения:

Конструктивное исполнение должно соответствовать аналогичным требованиям, предъявляемым к счетчикам (масса не более 5 кг).

Климатические факторы (от – 30 °С до 40°С при относительной влажности до 90 %).

Электропитание – подключение к сети 220 В и ко вторичным цепям трансформаторов напряжения.

Функционирование при провалах напряжения и перенапряжениях в диапазоне ± 40 % от номинального напряжения.

Электромагнитная совместимость должна удовлетворять требованиям устойчивости к воздействию внешних помех.

Входные каналы средств измерения должны обеспечивать проведение измерений в трех фазах.

Принцип действия – непрерывное измерение ПКЭ в реальном масштабе времени, программируемость и длительное сохранение результатов измерений, отображение результатов измерений.

Погрешности средств измерений должны соответствовать ГОСТ 13109-97.

Число каналов более 16.

Для контроля качества электроэнергии применяются трансформаторы тока и напряжения, используемые для питания цепей учета электроэнергии и (или) защит.

Средства измерения: ЭРИС –КЭ (г.Москва), РЕСУРС – UF (г.Пенза НПП Энерготехника), Нева – ИПЭ (НПР «Энергосоюз», г. С.Петербург), Энергомонитор («НПП Марсэнерго», г.С.Петербург), Урал – 100 М (г.Екатеринбург УГТУ), ИВК Омск (ОГТУ, г.Омск), ППКЭ (г.Москва), АПКЭ (НПФ Прософт г.Екатеринбург), ПАРМА РК6.05(ООО Парма, г.С.Петербург).

Для оценки ОН в электросетях предприятий со стабильными нагрузками можно использовать обычные щитовые вольтметры электромагнитной системы; наиболее удобно применять для этой цели цифровые вольтметры. Такие приборы имеют погрешность измерения не более 0,25%, позволяют автоматизировать измерения и обеспечивать регистрацию результатов на перфоленте, перфокарте или других устройствах сохранения информации.

Студентам предлагается на самостоятельную проработку изучение устройства и функциональных систем приборов для измерения ПКЭ [3].

Результатами измерения ПКЭ являются их числовые характеристики и вид закона распределения вероятностей, определяемый по гистограмме. Методика обработки результатов измерений показана в [2].

Если измерение ПКЭ осуществляется с помощью самопишущих приборов, работающих в диапазоне частот 45-100 Гц, то необходима обработка регистрограмм, последовательность которой целесообразно показать на примере измерения отклонения напряжения (ОН).

Обработку регистрограмм рекомендуется производить в следующем порядке.

Разбивают регистрограммы на интервалы равной ширины. Число интервалов (на каждый час регистрации) рекомендуется принимать при построении гистограмм в характерных режимах суточной нагрузки равным 24 (при скорости движения ленты 60 мм/ч) и 60 (при скорости 180 мм/ч). Соответственно при построении гистограмм для суток в целом рекомендуемое число интервалов на каждый час регистрации составит 12 и 36.

Определяют напряжение на границах каждого интервала.

Подсчитывают отклонения ΔU_i , %:

$$\Delta U_i = \frac{U_i - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

где U_i - напряжение на границе интервала, В;

$U_{ном}$ - номинальное напряжение, В.

Выбирают число интервалов группирования таким образом, чтобы в большинство интервалов попало более четырех-пяти измерений. Ширина интервала должна быть несколько больше, чем

$$\frac{\Delta U_B - \Delta U_H}{N},$$

где ΔU_B , ΔU_H - соответственно верхний и нижний пределы ОН, измеренные в контрольном пункте, %;

N - число интервалов группирования.

При этом должно выполняться условие

$$\Delta U_{ин} < (1/2 \div 1/4)\sigma,$$

где $\Delta U_{ин}$ - ширина интервала;

σ - среднеквадратическое отклонение, %.

В противном случае следует увеличить число интервалов группирования.

5. Определяют границы и середину интервалов группирования, затем подсчитывают суммарное ОН в одном интервале.

6. Определяют вероятность попадания ОН в каждый интервал и строят гистограмму отклонений напряжения.

7. Определяют математическое ожидание и стандарт ОН.

Выводы.

1. Показана допустимая погрешность измерения определения характеристики приборов измерения ПКЭ.
2. Дан сравнительный анализ средств измерения ПКЭ и их функциональных систем.
3. Приведена методика обработки и представления результатов измерения ПКЭ.

Лекция 6.

Контроль качества электроэнергии.

Цель лекции: показать каким образом осуществляется контроль качества электроэнергии в условиях эксплуатации.

Задачи:

- охарактеризовать назначения контроля ПКЭ;
- привести методику эксплуатационного контроля ПКЭ;
- показать результаты работы ПКЭ в энергосистемах и на предприятиях и дать их подробный анализ.

План лекции.

1. Задачи контроля качества электроэнергии (КЭ).
2. Виды контроля.
3. Выбор пунктов контроля.
4. Виды представления результатов контроля ПКЭ и их анализ.

Краткое содержание лекции.

Выделяют основные задачи контроля качества электрической энергии:

- обнаружение помех (искажения напряжения);
- оценка их значения;
- регистрация измеренных частотных характеристик в целях обработки и отображения результатов;
- проведение анализа измеренных значений ПКЭ и оценка их соответствия установленным требованиям;
- определение источника искажения;
- проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии.

Для организации измерений качества электроэнергии необходимо определить цель, точку электрической сети, в которой контролируется КЭ, виды контролируемых ПКЭ.

Виды контроля

Контроль на соответствие требованиям ГОСТ 13109-97 или технических регламентов (длительность замера не менее 24 часов).

Диагностический контроль – необходим для анализа причин ухудшения качества электрической энергии, определения виновника снижения КЭ, при проверке выполнения технических условий на присоединение потребителей к электрической сети и договорных условий на электроснабжение. Необходимо результаты измерений просматривать не только в числовом, но и графическом виде, например, сопоставляя график нагрузки потребителей с графиком изменения контролируемого ПКЭ. Один из видов диагностического контроля – претензионные испытания, которые проводятся при рассмотрении претензий продавца или покупателя электроэнергии к ее качеству.

Коммерческий контроль – средство экономического воздействия на виновника ухудшения КЭ. В результате такого контроля оценивается стоимость электроэнергии с учетом неустойки за ее качество (должно быть включено в договор энергоснабжения). В данном случае помимо ПКЭ необходимо проводить учет отпущенной электроэнергии. В связи с этим коммерческий контроль осуществляется на границе раздела между поставщиком и потребителем электроэнергии или в точках учета потребляемой электроэнергии.

Технологический контроль – это контроль КЭ с длительностью и(или) погрешностью измерений, которые могут быть снижены по сравнению с требованиями ГОСТ 13109-97. Задачей технологического контроля является установление влияния технологического процесса потребителя электроэнергии на качество электроэнергии.

По длительности измерений различают следующие виды контроля.

Периодический контроль – эпизодический, при котором измерение ПКЭ происходят непрерывно каждые 24 часа (или несколько суток).

Интервалы между измерениями устанавливает организация, но не реже, чем указано в ГОСТ (например, ИВК «Омск», «ЭРИС»).

Мониторинг – непрерывный контроль, при котором поступающая информация о контролируемых ПКЭ анализируется непрерывно.

Приборы лучше использовать стационарные (например, «РЕСУРС»).

Выбор пунктов контроля качества электроэнергии

Пункт контроля качества электрической энергии – это пункт электрической сети, в котором производят измерение КЭ при его контроле.

Это точка общего присоединения, граница раздела балансовой принадлежности, выводы электроприемника и другие точки сети, согласованные электроснабжающей организацией (ЭСО) с потребителем или поставщиком электроэнергии.

Выбор пунктов контроля осуществляется:

- аккредитированными испытательными лабораториями;
- совместно ЭСО и потребителем;
- лицами государственных надзорных организаций;
- органами по сертификации;
- ответственными за электрохозяйство потребителя.

Выбор пунктов контроля КЭ производится на основе:

- схемы распределительных сетей;
- данных о составе нагрузки, ее категории по надежности и графиков мощности или результатов измерений токов в периоды максимальных и минимальных сезонных нагрузок;
- данных о точках контроля КЭ, внесенных в договоры энергоснабжения и технические условия на присоединение.

При анализе схемы и состава нагрузки выделяют:

- наиболее удаленных и близлежащих по отношению к центру питания потребителей;
- линии электропередачи с наибольшими потерями напряжения;
- нагрузки, электроприемники которых могут быть источниками искажения качества электроэнергии или восприимчивы к ухудшению КЭ.

Пунктами обязательного контроля являются:

- вводы питающих фидеров РП;
- выводы электроприемников, потери напряжения до которых наибольшие;
- точки общего присоединения, от которых получают питание потребители, ухудшающие качество электроэнергии;
- выводы электроприемников, восприимчивых к ухудшению качества электроэнергии;
- точки электрической сети, по которым предъявляют претензии по качеству электроэнергии.

Список выбранных пунктов оформляется в виде перечня с указанием измеряемых ПКЭ и обоснованием причин измерения.

Периодичность контроля

Для установившихся отклонений напряжения контроль осуществляется не реже двух раз в год (в периоды зимних и летних максимумов нагрузки, для которых рассчитывается падение напряжения в сети).

Для остальных ПКЭ, кроме отклонения частоты и провалов напряжения – не реже одного раза в год.

Рекомендуемая продолжительность непрерывного контроля составляет 7 суток, минимальный контроль – сутки. При необходимости продолжительность контроля можно указать в договоре на электроснабжение, но не реже указанной выше.

Единственно правильным является определение допустимого диапазона изменения напряжения в точке разграничения балансовой принадлежности с учетом структуры и режимов наибольшей и наименьшей нагрузки сети потребителя. Именно они должны вноситься в договор.

Виды представления результатов контроля качества электроэнергии и их анализ

Протокол контроля качества электроэнергии содержит следующие данные:

- наименование и адрес испытательной лаборатории;
- наименование и адрес организации, являющейся заказчиком измерений качества электроэнергии;
- наименование и адрес пункта контроля качества электроэнергии;
- информация о питающей энергосистеме и центре питания;
- цель испытаний;
- сроки проведения испытаний;
- наименование и пункты нормативной документации, устанавливающей методы испытаний;
- информация о средствах измерений;
- условия выполнения измерений;
- требования к ПКЭ в пункте контроля;
- результаты измерений ПКЭ в пункте контроля за каждые 24 часа;
- заключение по результатам контроля ПКЭ.

Графики изменения ПКЭ – их анализ – эффективный способ оценки ПКЭ. Во-первых, при наличии информации об изменении схемы сетей, режимах работы регулирующих и компенсирующих устройств, изменениях состава нагрузки в привязке ко времени может быть установлена связь с закономерностями измерения КЭ в сети. Во-вторых, сопоставление графиков изменений ПКЭ и графиков мощности нагрузки позволяет оценивать степень влияния нагрузки на КЭ в точке контроля.

Например, такое сопоставление по отклонению напряжения с активной и реактивной мощностями может показать, что закон встречного регулирования в центре питания не выполняется, если нижняя граница отклонения напряжения соответствует наибольшей нагрузке, т.е. когда потери напряжения в сети максимальны.

В такой ситуации добиться выполнения требований ГОСТ на зажимах всех электроприемников ниже точки контроля, получающих питание от рассматриваемого РП, не всегда возможно.

Напряжение в режиме наибольшей нагрузки должно быть не менее $1,05 U_{ном}$, в режиме наименьшей нагрузки не более $U_{ном}$.

Спектры высших гармоник напряжения и тока

Спектр высших гармоник является компактной и очень содержательной формой описания несинусоидального режима, поскольку содержит информацию обо всех гармониках измеряемого сигнала.

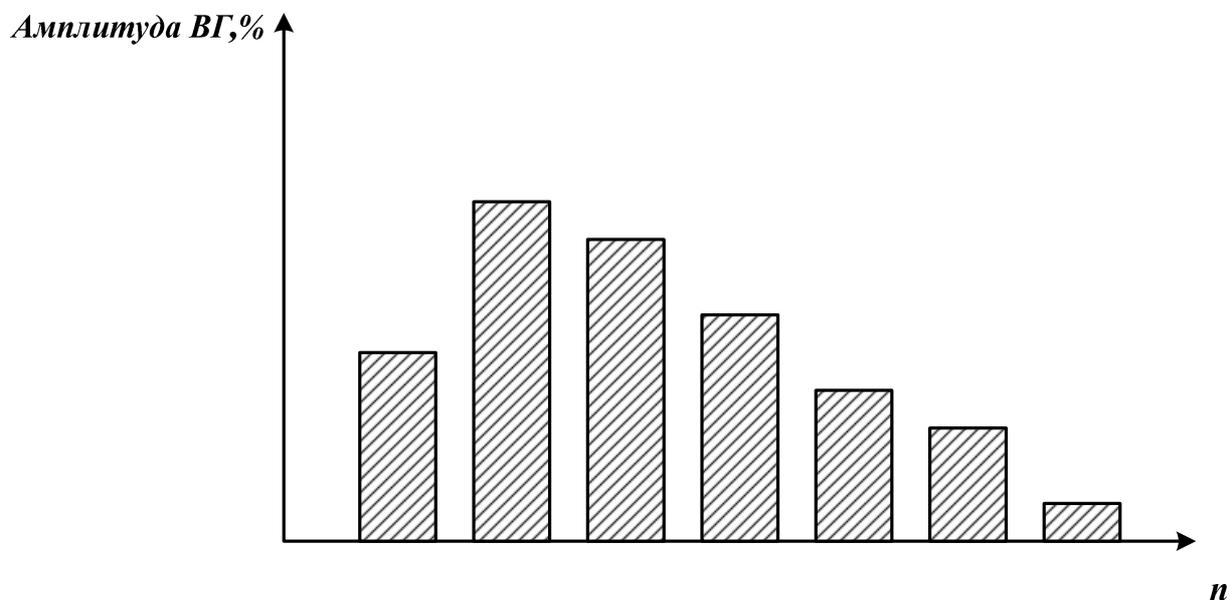


Рис. Спектр высших гармоник

По спектрам напряжения и тока может быть определен источник высших гармоник и режим его работы, а также резонансные частоты.

Если в сети несколько источников искажения различного типа по спектру нельзя сделать однозначный вывод по причинам ухудшения КЭ в сети. Нужно проводить расчет фактических вкладов каждого присоединения.

Гистограмма – основная форма представления результатов измерения для оценки соответствия КЭ предъявляемым требованиям. Она по информативности превосходит протокол измерений и может быть полезна при определении причин ухудшения КЭ и разработке мероприятий по их устранению.

При построении гистограммы число интервалов выбирается по формуле

$$m = \log_2 m \pm 1,$$

где m – число значений ПКЭ, полученных при измерениях.

Интервал усреднения в средствах измерения качества электроэнергии составляет: для отклонения напряжения – 60 секунд, для отклонения частоты – 20 секунд, для несинусоидальности и несимметрии – 3 секунды.

По гистограмме определяются частотные характеристики следующим образом:

$$\bar{X} = \sum X_i^* p_i; D = \sum \left(X_i^* - \bar{X} \right) p_i$$

где X_i^* – значение середины интервала;

p_i – вероятность попадания в i -тый интервал.

Результаты контроля провалов напряжения, перенапряжений, колебаний – оформляются в виде таблицы и содержат информацию о времени события и его характеристиках.

При формировании статистики о провалах напряжения на длительных интервалах времени необходимо определять частоту их появления.

Определение причин появления подобных событий проводится путем сопоставления времени их появления с информацией о коротких замыканиях и коммутациях в сетях, режимах работы мощных нагрузок и грозовых явлениях.

Анализ результатов контроля ПКЭ целесообразно представлять в динамике, кроме того показывать графики изменения напряжений и токов фаз на частотах основной и высших гармоник, а также изменения мощности искажения на частотах высших гармоник и векторные диаграммы.

Выводы.

1. Показаны задачи и виды контроля КЭ.
2. Приведен порядок выбора перетоков контроля КЭ в условиях эксплуатации и определена периодичность контроля.
3. Систематизированы способы представления результатов контроля КЭ.

Лекция 7.

Расчет отклонения напряжения.

Цель лекции: научить студентов выделять характерные точки сети и определять уровни установившегося отклонения напряжения.

Задачи:

- ввести понятие характерный режим, характерные точки сети;
- показать, как определять возможный диапазон изменения напряжения у потребителей;
- дать методику определения отклонений напряжения в расчетной точке сети.

План лекции.

1. Определение характерных режимов и характерных точек сети для анализа отклонений напряжения.
2. Расчет предельно допустимых отклонений напряжения на шинах центра питания (ЦП).
3. Определение отклонений напряжения в характерной точке сети.

Краткое содержание лекции.

Характерные режимы с точки зрения оценки отклонений напряжения – это режимы наибольших и наименьших нагрузок в сети, т.к. они определяют границы диапазона всех остальных режимов. Характерная точка сети – это узел, к которому подключен характерный электроприемник (ЭП).

Характерными ЭП сети являются ближайший и наиболее удаленный от узла сети ЭП, а также ЭП с графиками электрических нагрузок, резко отличающимися от общего графика электрических нагрузок.

Определим возможный диапазон d изменения напряжения у потребителя. Наименьшее напряжение у потребителя будет в том случае, если в центре питания будет наименьшее допустимое напряжение $U_{ЦП}^{НМ}$ при режиме наибольших нагрузок (наибольшие потери напряжения в сети $\Delta U_{ЦП-П}^{НБ}$), а распределительные трансформаторы создают наименьшую добавку $\Delta U_{ДОБ}^{НМ}$:

Диапазон изменения напряжения, d

$$d = U_{\Pi}^{HB} - U_{\Pi}^{HM} = U_{ЦП}^{HB} - U_{ЦП}^{HM} + (\Delta U_{ЦП-\Pi}^{HB} - \Delta U_{ЦП-\Pi}^{HM}) + (U_{ДОБ}^{HB} - U_{ДОБ}^{HM}) .$$

Для обеспечения допустимых отклонений напряжения у потребителя необходимо соблюдение условий

$$d < U_{MAX} - U_{MIN} ;$$

$$U_{\Pi}^{HB} \leq U_{MAX} ; \quad U_{\Pi}^{HM} \geq U_{MIN} ,$$

где U_{MAX} и U_{MIN} – интервал допустимых значений напряжения.

Предельно допустимые отклонения напряжения на шинах ЦП для каждого характерного потребителя определяются следующим образом:

$$\delta U_{B(H)ЦП} = \delta U_{B(H)} + \delta U_C - E_{ДОБ} \pm 0,5 ,$$

где $\delta U_{B(H)ЦП}$ – верхний (нижний) предел отклонения напряжения в ЦП, %;

$\delta U_{B(H)}$ – верхний (нижний) предел отклонения напряжения, затребованный характерным потребителем, %;

δU_C – ожидаемые потери напряжения в сетях энергоснабжающей организации, %;

E_D – добавка напряжения, создаваемая средствами местного регулирования напряжения энергоснабжающей организации.

При проверке условий совместимости необходимо определять верхний и нижний пределы диапазона регулирования напряжения в центре питания в характерных режимах его нагрузки рассматриваемого сезонного периода:

$$\delta U_{B(H)ЦП} = 0,5 \cdot (\delta U_{BЦПMAX(MIN)} - \delta U_{HЦПMAX(MIN)}) ,$$

где *max* и *min* относятся к наибольшему и наименьшему режимам нагрузки.

Расчет установившегося отклонения напряжения δU_y производится без учета зоны нечувствительности регулирующего устройства в ЦП для двух предельных режимов: наибольших и наименьших нагрузок и для двух электроприемников: ближайшего и наиболее удаленного в электрическом отношении, причем потери напряжения учитываются во всех элементах сети.

Определение отклонений напряжения в расчетной точке сети

Цель расчета: Определение уровней δU для последующего выбора технических средств и мероприятий по их нормализации.

Для сети одной ступени напряжения отклонение напряжения в расчетной точке сети равно:

$$\delta U_C = \delta U_{ЦП} + \sum_{i=1}^n \delta U_{\delta i} - \sum_{k=1}^m \Delta U_k ,$$

где $\delta U_{ЦП}$ – отклонение напряжения в центре питания;

$\delta U_{\delta i}$ – «добавка» напряжения, создаваемая i -м средством регулирования;

n – количество средств регулирования между центром питания и приемником (расчетной точкой);

m – количество узлов;

ΔU_k – падение напряжения между центром питания и расчетной точкой на k -м участке.

Добавка напряжения $\delta U_{\delta i}$ может быть и положительной, и отрицательной.

В сети с одной или несколькими ступенями напряжения, напряжение на вторичной стороне силового трансформатора может быть определено по выражению:

$$U_2 = (U_{2XX} - \frac{\Delta U_T}{100} \cdot U_{2XX}) \cdot \frac{U_1}{U_{омн}} ,$$

где U_{2XX} – напряжение холостого хода на вторичной обмотке силового трансформатора, равное $1,1 U_{НОМ}$, кВ;

ΔU_T – падение напряжения в силовом трансформаторе (СТ), %;

$U_1, U_{отп}$ – напряжение на стороне ВН трансформатора, напряжение отпайки.

Добавка напряжения, создаваемая силовым трансформатором:

$$\delta U_{дт} = \frac{U_{2XX} \cdot U_1}{U_{2НОМ} \cdot U_{отп}} \cdot 100 - 100 [\%].$$

В процессе лекции студентам предлагается на конкретных примерах выбрать характерные электроприемники и расчетные точки сети.

Выводы.

- a. Показано каким образом из множества режимов выбирать характерные.
 - b. Дана методика определения допустимого диапазона отключений напряжения и проверки требуемых отклонений напряжения на совместимость в характерных режимах.
3. Показано как определять отклонения напряжения в характерной точке сети с учетом добавок напряжения, создаваемых силовым трансформатором.

Лекция 8.

Методы расчета колебаний напряжения.

Цель лекции: показать как можно вычислить ПКЭ, описывающие колебания напряжения.

Задачи:

- привести допущения, позволяющие произвести быструю оценку колебаний напряжения;
- ввести понятие эквивалентного периодического и непериодического процесса;
- показать методы расчета ПКЭ, характеризующих колебания напряжения при различных источниках искажения.

План лекции.

1. Определение эквивалентного размаха изменения напряжения.
2. Расчет размахов изменения напряжения при работе ДСП.
3. Порядок расчета размахов изменения напряжения при работе прокатных станов и электрифицированного железнодорожного транспорта.
4. Определение размахов изменения отклонений напряжения при работе сварочных установок.

Краткое содержание лекции.

Источниками, вызывающими колебания напряжения, являются ударные или резкопеременные нагрузки: дуговые сталеплавильные печи, прокатные станы, дуговая и контактная сварка, пуск мощных электродвигателей, электрифицированный железнодорожный транспорт и др.

Расчет колебаний напряжения при приложении ударных нагрузок проводится в предположении, что нарастание (спад) тока, активной мощности и реактивной мощности происходит с постоянной скоростью, т.е. по линейному закону. Предполагается, что время протекания переходного процесса не превышает длительность периода напряжения промышленной частоты, т.е. не учитываются апериодические токи и напряжения.

Колебания напряжения обусловлены в основном набросами реактивной мощности, фронт которых в большинстве случаев вертикален или близок к нему. Глаз человека обладает дифференцирующими свойствами по отношению к изменению светового потока, поэтому вертикальные участки набросов реактивной мощности соответствуют восприятию максимально возможной энергии колебаний. Основываясь на энергетической сущности процесса зрительного восприятия, можно найти эквивалентный размах δU_b и частоту периодического процесса $F_{\text{э}}$, мощность которого будет равна средней мощности исходного непериодического процесса за рассматриваемый период времени T .

Мощность эквивалентного периодического процесса:

$$E_n = y_{(U)}^2 \cdot \delta U_{\text{в}}^2 \cdot F_{\text{э}},$$

где $y_{(U)}$ – переходная функция по напряжению электрической цепи, эквивалентная органу зрения.

Мощность эквивалентного непериодического процесса:

$$E_{\text{ин}} = y_{(U)}^2 \cdot \frac{\sum_{p=1}^n \delta U_{\text{тп}}^2}{T},$$

где $\delta U_{\text{тп}}$ – значение p -го размаха при их числе n за время T .

Эквивалентная частота равна средней:

$$F_{\text{э}} = F = \frac{n}{T}.$$

Эквивалентный размах изменения напряжения:

$$\delta U_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n \delta U_{\text{тп}}^2}{n}}.$$

Таким образом, эквивалентный размах изменения напряжения определяется среднеквадратическим размахом изменения напряжения за время T .

Условие допустимости колебаний:

$$\delta U_{\text{в}} \leq \delta U_{\text{доп}}(F = F_{\text{ср}}),$$

где $\delta U_{\text{доп}}$ – определяется по ГОСТ 13109-97.

Эквивалентный размах изменения напряжения можно получить через набросы реактивной мощности и мощности короткого замыкания (КЗ) на шинах резкопеременных нагрузок:

$$\delta U_{\text{в}} = \frac{1}{S_{\text{кз}}} \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n \Delta Q_p^2}{n}}.$$

Расчет размахов изменения напряжения δU_t при работе ДСП

Оценка допустимости δU_t , возникающих при работе ДСП, заменяется проверкой по допустимости подключения одной или группы ДСП по выражению:

$$\lambda = \frac{k_m \cdot S_{\text{ПТmax}}}{S_{\text{кз}}} \leq 0,01,$$

где k_m – коэффициент, учитывающий возрастание размахов δU_t при работе m печей из этой группы, работающих в режиме расплава, по сравнению размахами, вызываемыми работой одной самой мощной печи $S_{\text{ПТmax}}$;

$S_{\text{ПТmax}}$ – наибольшая номинальная мощность печного трансформатора в группе из n печей.

$$k_m = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{\text{ПТ}i}}{S_{\text{ПТmax}}} \right)^2},$$

где $S_{ПТi}$ – мощность i -того печного трансформатора, работающего в режиме расплава.

m – количество печей, работающих в режиме расплава, при общем числе печей n .

Если известен график электрической нагрузки, то эквивалентный размах изменения напряжения для ДСП можно представить в виде случайной функции, т.е. через числовые характеристики случайного процесса:

$$\delta U_{\text{в}} = \sqrt{(M[\delta U_t])^2 + (\sigma[\delta U_t])^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^m \frac{(\delta U_{tk})^2}{T}} = 0,53 \delta U_t^{\text{нб}},$$

где $\delta U_t^{\text{нб}} = \frac{1,25 S_{ПТ}}{S_{КЗ}}$, $S_{ПТ} = \sqrt{\sum_I^n S_{ПТi}^2}$.

Тогда

$$\delta U_{\text{в}} = 0,53 \frac{1,25 S_{ПТ}}{S_{КЗ}} = \frac{0,66 S_{ПТ}}{S_{КЗ}}.$$

Для ДСП в качестве эквивалентной частоты $F_{\text{Э}}$ принимается частота, равная 1 – 2 Гц.

Если неизвестен график электрической нагрузки печи, то:

для групп одинаковых ДСП

$$\delta U_{\text{в}\%} = 100 \sqrt[4]{N} \frac{S_{ПТ}}{S_{КЗ}};$$

для групп печей разной мощности

$$\delta U_{\text{в}\%} = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{S_{ПТi}}{S_{ПТ\text{max}}}} \cdot \frac{S_{ПТ\text{max}}}{S_{КЗ}}.$$

Эквивалентный размах изменения напряжения $\delta U_{\text{в}}$ для практических расчетов считается допустимым, если он не превышает 1 %.

Проведенные исследования на действующих печах показали, что наброс реактивной мощности Q при работе печи от 0 до P_{MAX} зачастую происходит за 0,03 с, т.е. за 1,5 периода питающего напряжения. В общем случае скорость наброса Q можно оценить величиной 500 Мвар/с.

Расчет размахов изменения напряжения δU_i при работе прокатных станков и электрифицированного железнодорожного транспорта.

Алгоритм расчета

1. Определяется эквивалентный размах по известному графику напряжения $U(t)$

$$\delta U_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\sum \delta U_{ti}^2}{n}},$$

где n – общее число размахов напряжения за время цикла T .

Его также можно найти по графику реактивной мощности $Q(t)$

$$\delta U_{\text{в}} = \frac{1}{S_{КЗ}} \sqrt{\frac{\sum \delta Q_i^2}{n}},$$

где δQ_i – i -ый наброс реактивной мощности, определяемый по графику $Q(t)$. График $Q(t)$ повторяет график $U(t)$;
 n – число набросов (сбросов) реактивной мощности, рассчитываемое по графику $Q(t)$.

2. Определяется эквивалентная или средняя частота повторения колебаний напряжения

$$F = \frac{n}{T}.$$

3. Определяется допустимый размах изменения напряжения $\delta U_{\text{доп}}$ по ГОСТ 13109-97 при частоте, найденной в пункте 2.

4. Сравниваются между собой допустимый и эквивалентный размахи изменения напряжения, при этом должно выполняться условие

$$\delta U_{\text{доп}} \geq \delta U_{\text{в}}.$$

5. Определяется скорость наброса и сброса реактивной мощности по графику $U(t)$ или $Q(t)$, т.е. скорость изменения $U(t)$ или $Q(t)$:

$$V = \frac{\Delta U}{t}, \text{ кВ/с}$$

или

$$V = \frac{\Delta Q}{t}, \text{ Мвар/с.}$$

Как правило, скорость наброса или сброса реактивной мощности составляет для:

а) реверсивных станов горячего проката (блужинг, сляминг) – 250 Мвар/с;

б) станов холодного проката – 2000 Мвар/с;

в) непрерывных станов горячего проката – 400 Мвар/с.

Расчет размахов изменения напряжения δU_t при работе сварочных установок.

При проверке допустимости подключения одной сварочной машины или автоматической сварочной машины к подстанции или другому источнику питания, где имеется осветительная нагрузка, значение δU_t определяется как:

$$\delta U_t = \frac{\sqrt{3} S_{\text{нук}}}{U_{\text{ном}}^2} (r \cos \varphi + x \sin \varphi).$$

Если к узлу подключено несколько сварочных машин, то расчет δU_t осуществляется по следующему алгоритму.

1) Сварочные машины распределяют равномерно по парам фаз.

2) Определяют число одновременно работающих машин по кривым /11 / с учетом фактической продолжительности включения, $ПВ_{\phi}$ для каждой пары фаз.

3) Определяется пиковая нагрузка линейного провода

4) Определяется коэффициент мощности при пиковой нагрузке машины контактной сварки.

5) Рассчитывается размах изменения напряжения.

6) Определяется средняя частота включения машин в зависимости от числа включений в час, N .

7) Определяется средняя продолжительность включения.

8) Рассчитывается средняя длительность расчетного пика.

9) Определяется число пиков в час $\gamma=0,36/t_{cp}$ и переводится в число пиков в минуту для сравнения с ГОСТ 13109-97.

На самостоятельную проработку выносятся раздел «Расчет размахов изменения напряжения при пуске электродвигателей» [1].

В процессе лекции рассматриваются небольшие примеры по определению колебаний напряжения с изменением методов активного обучения.

Выводы.

1. Введено понятие эквивалентного размаха изменения напряжения, позволяющего определять колебания напряжения при различных источниках искажения.

2. Даны методики расчета ПКЭ, описывающих колебания напряжения при работе ДСП, прокатных станов, электрифицированного железнодорожного транспорта, сварки.

Лекция 9.

Определение токов высших гармоник и сопротивлений элементов схем замещения сети для высших гармоник.

Цель лекции: получить инженерные выражения для определения токов высших гармоник и сопротивлений элементов сети на частотах высших гармоник (ВГ).

Задачи:

- показать, как определяются токи ВГ от одного и нескольких источников искажения качества электроэнергии;
- привести схемы замещения элементов сети на частотах ВГ и определить их сопротивления на частотах ВГ.

План лекции.

1. Источники высших гармоник.
2. Токи ВГ, генерируемые различными элементами схемы.
3. Токи ВГ, генерируемые несколькими источниками искажения КЭ.
4. Сопротивления элементов схем замещения сети на частотах ВГ.

Краткий конспект лекции.

Источниками ВГ являются нелинейные нагрузки, т.е. такие нагрузки, у которых активное сопротивление нелинейно зависит от напряжения.

Токи высших гармоник, генерируемые различными элементами схемы

1. Газоразрядные лампы генерируют в основном 3 и 5 гармоники, токи которых равны

$$I_{n=3} = 0,1I_1;$$

$$I_{n=5} = 0,03I_1,$$

где I_1 – ток основной гармоники (промышленной частоты).

2. Установки дуговой электросварки генерируют токи гармоник с номером 5,7,11,13 при этом, при этом ток n -ой гармоники равен

3.

$$I_n = \frac{I_1}{n^2}.$$

4. Машины контактной электросварки с тиристорными или игнитронными контакторами генерируют спектр нечетных гармоник. У них ток n -ой гармоники равен

$$I_n = \frac{I_1}{n^2}.$$

5. Силовые трансформаторы. Действующие значения намагничивающих токов фаз $I_{\mu\phi}$ определяются по формуле

$$I_{n\phi} = I_{\mu} K_{n\phi},$$

где I_{μ} – действующее значение намагничивающего тока;
 $K_{n\phi}$ – определяется по таблице 1.

Таблица.1.

$K_{n\phi}$	Крайняя фаза	Средняя фаза
$K_{5\phi}$	0,1	0,2
$K_{7\phi}$	0,29	0,29
$K_{11\phi}$	0,12	0,1

5. Вентильные и тиристорные преобразователи, электронные выпрямительные устройства. Они генерируют высшие гармоники (ВГ), номер которых определяется по формуле

$$n=km\pm 1,$$

где $k=1,2,3,\dots,n$ – натуральный ряд чисел;

m – число фаз преобразователя.

Ток n -ой гармоники находят по формуле

$$I_n = I_1/n.$$

6. Тиристорные регуляторы мощности, используемые для управления режимом нагревательных печей, генерируют токи 5,7,11,13 гармоник, а ток n -ой гармоники равен

$$I_n = \frac{0,7 S_{п.т.}}{\sqrt{3} U_{ном} n}.$$

Кроме того, они генерируют токи 2,3,4 гармоник, при этом ток n -ой гармоники определяется по формуле

$$I_n = \frac{0,1 S_{п.т.}}{\sqrt{3} U_{ном} n},$$

где $S_{п.т.}$ – мощность печного трансформатора.

6. Дуговые сталеплавильные печи генерируют высшие гармоники номеров 2,3,4,5,6,7,9,11,12,13 и т.д.

Ток n -ой гармоники равен

$$I_n = \frac{I_1}{n^2}.$$

Токи высших гармоник, генерируемые несколькими нелинейными нагрузками

1. Группа реверсивных преобразователей, ДСП в период расплава и подобные им по характеру изменения графика нагрузки источники ВГ:

$$I_{n\Sigma} = \frac{I}{\sqrt{3} U n} \sqrt{\sum_{k=1}^n S_{ck_i}^2},$$

где S_{ck_i} – среднеквадратичное значение полной мощности i -го преобразователя.

2. Установки дуговой и контактной электросварки

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^k I_{n_i}^2},$$

где I_{n_i} – ток n -ой гармоники i -той сварочной установки.

3. Группа дуговых сталеплавильных печей – точное определение эквивалентного тока ВГ:

$$\dot{I}_{n\Sigma} = \sum_{i=1}^k \dot{I}_{n_i}.$$

4. Нелинейные нагрузки, работающие в спокойном режиме, то есть преобразователи электроприводов непрерывных прокатных станов, работающие с практически неизменным выпрямленным током, преобразователи электролизного производства, хлорных станций ЦБК, газоразрядные лампы и др.

$$\dot{I}_{n\Sigma} = \sum_{i=1}^k \dot{I}_{n_i},$$

где I_{ni} – комплексный ток n -й гармоники i -го источника.

Сопротивления элементов схем замещения сети для высших гармоник

Напряжение гармоник рассчитываются на основе линейных схем замещения сети, справедливых для каждой гармоники в отдельности.

Рассмотрим сопротивления элементов этих схем замещения для ВГ.

Электрические машины и силовые трансформаторы

Турбогенератор является источником и приемником высших гармоник.

Его индуктивное сопротивление для n -й ВГ

$$x_{dn} = nx_l + \frac{1}{\frac{1}{n \cdot x_{ad}} + \frac{\sqrt{n \pm 1}}{n \cdot x_f} + \frac{\sqrt{n \pm 1}}{n \cdot x_k}}.$$

Можно принять для турбогенераторов мощностью 3-100 МВт

$$x_{dn} = 0,9x_2 \cdot n,$$

где x_2 – сопротивление обратной последовательности турбогенератора.

Эквивалентные индуктивные сопротивления явнополюсных синхронных двигателей для ВГ по осям d и q определяются аналогично сопротивлениям ВГ турбогенераторов без учета активного сопротивления и соответственно равны

$$x_{dn} = nx_l + \frac{1}{\frac{1}{n \cdot x_{ad}} + \frac{\sqrt{n \pm 1}}{n \cdot x_f} + \frac{\sqrt{n \pm 1}}{n \cdot x_{kd}}};$$

$$x_{qn} = nx_l + \frac{1}{\frac{1}{n \cdot x_{aq}} + \frac{\sqrt{n \pm 1}}{n \cdot x_{kq}}}.$$

Среднее значение этих сопротивлений будет

$$x_n = 0,5(x_{dn} + x_{qn}).$$

$\bar{x} - x_n$ удобно представить в виде:

$$x_n = k_{2n} x_2 n,$$

где $k_{2n}=0,7$ для $n=9,11,13$;

$k_{2n}=0,75$ для $n=5,7$;
 $k_{2n}=0,8$ для прямой последовательности для $n=3$;
 $k_{2n}=0,85$ для обратной последовательности для $n=3$.
 $k_{2n}=0,65$ для $n \geq 15$.

Практически для любого АД

$$x_n = Z_k n = \frac{n U_{\text{фном}}}{k_n I_{\text{фном}}},$$

где k_n – кратность пускового тока;

$U_{\text{фном}}$, $I_{\text{фном}}$ – номинальные напряжения и ток фазы.

Сопротивление двухобмоточных силовых трансформаторов связи с энергосистемой на частотах ВГ определяется по формуле

$$x_{Tn} = \frac{u_{кз}}{100} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} n = x_{T(1)} \cdot n.$$

где $x_{T(1)}$ – сопротивление трансформатора при промышленной частоте.

Для трехобмоточных силовых трансформаторов, индуктивные сопротивления обмоток которых соответственно равны x_1 , x_2 , x_3 , соответствующие сопротивления для ВГ умножаются на номер гармоники.

Сопротивления реакторов x_{pn} на частоте n -й гармоники и батарей конденсаторов соответственно определяются по формулам:

$$x_{pn} = x_p n;$$

$$x_{BKn} = \frac{x_{BK}}{n}.$$

Подводя итоги, можно сказать, что индуктивные сопротивления элементов сети, кроме генераторов и двигателей, умножаются на номер гармоники; емкостные – делятся, а активные – умножаются на \sqrt{n} при резком проявлении поверхностного эффекта.

Студентам предлагается самостоятельно рассмотреть схемы замещения турбогенераторов и вывод формул для сопротивлений на частоте ВГ.

Выводы.

1. Получены инженерные выражения, описывающие токи высших гармоник при разных источниках искажения.
2. Даны выражения для эквивалентных токов ВГ при одновременном воздействии нескольких источников искажения.
3. Приведены выражения для сопротивлений элементов схем замещения на частотах ВГ.

Лекция 10.

Определение ПКЭ, характеризующих несинусоидальность напряжения.

Цель лекции: раскрыть инженерный метод определения ПКЭ по несинусоидальности напряжения.

Задачи:

- показать, как составляется схема замещения электрической сети;
- дать алгоритм определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента n -ной гармонической составляющей;
- привести порядок расчета ВГ в установках поперечной емкости как наиболее чувствительных к воздействию ВГ;
- показать как осуществлять проверку на возможность резонансных режимов в сети.

План лекции.

1. Методика определения ПКЭ, относящихся к несинусоидальности напряжения.
2. Порядок расчета ВГ в компенсирующих устройствах.
3. Обеспечение нормальной работы батарей конденсаторов.
4. Проверка возможности возникновения резонанса токов в сети при несинусоидальности токов и напряжений.

Для расчета напряжений высших гармоник и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения разрабатывается расчетная схема сети с указанием точек общего присоединения, в которых необходимо проводить анализ качества электроэнергии. В качестве примера на рис.6.2 показана такая схема.

По расчетной схеме сети составляется схема замещения для токов высших гармоник. В эту схему все элементы сети, включая систему, вводятся сопротивлениями высших гармоник, т.е. на частоте n .

Определяются сопротивления элементов сети на частотах ВГ и рассчитываются токи высших гармоник.

Схема замещения приводится к виду, показанному на рис.1, путем последовательно-параллельного соединения, преобразования «треугольника» в «звезду» и т.д.

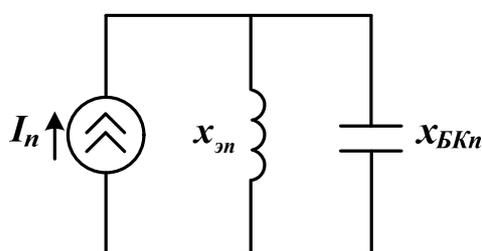


Рис.1. Эквивалентная схема замещения

Определяется суммарное сопротивление сети на частотах ВГ, например

$$x_{\Sigma n} = \frac{X_{BK} \cdot X_{\Sigma} \cdot n}{X_{\Sigma}^2 \cdot n - X_{BK}}$$

Рассчитываются напряжения высших гармоник

$$U_n = x_{\Sigma n} \cdot I_n.$$

Определяется коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^k U_n^2}}{U_1}$$

и коэффициент n -ой гармонической составляющей

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1}.$$

Полученные значения сравниваются с допустимыми, приведенными в ГОСТ 13109-97.

Если необходимо определить напряжение высших гармоник в какой-либо ветви схемы, то пользуются коэффициентами токораспределения.

Определяется доля тока ВГ, протекающая через анализируемую ветвь

$$I_{БКn} = I_n \cdot k_n.$$

Рассчитывается напряжение ВГ

$$U_{БКn} = I_{БКn} \cdot x_{БКn}.$$

В электрических сетях при наличии батарей конденсаторов (БК) возможны резонансы токов и напряжений. Наиболее опасен резонанс токов, так как он возможен на частотах небольших порядков 5; 7; 11; 13.

Резонанс напряжений возможен на частотах 30-40-х порядков и не представляет опасности для силового оборудования, поскольку токи этих гармоник весьма малы и не создают сколько-нибудь заметных падений напряжений на конденсаторах и других элементах сети, но он опасен для микропроцессорной и микроэлектронной техники.

При подключении БК к шинам подстанции с источниками ВГ необходимо проверить расчетом, что при выбранной мощности БК не возникает ее перегрузка за счет токов высших гармоник. Если в каком-либо режиме работы подстанции или системы электроснабжения (СЭС) возможно возникновение резонанса токов или близкого к нему режима на частоте одной из ВГ, БК может быть недопустимо перегружена по току. Режим резонанса при $n \leq 13$ недопустим для БК; при $n > 13$ необходим проверочный расчет.

Точный расчет ВГ в БК с учетом активного сопротивления возможен лишь с определенным приближением, так как в большинстве случаев эти сопротивления неизвестны. Поэтому расчет выполняется только с учетом реактивных сопротивлений; необходимые коррективы вводятся при близких к резонансным режимам номерам ВГ.

Ток n -ой гармоники в цепи БК, подключенной к шинам ВН или НН, равен:

$$I_{ен} = k_{ен} \cdot I_n; I_{нн} = k_{нн} \cdot I_n,$$

где $k_{ен}$ ($k_{нн}$) – коэффициент кратности тока n -ой гармоники, определяющий долю тока n -ой гармоники I_n , генерируемой всеми источниками, который проходит через БК.

В случае, если ток ВГ не перегружает БК, эквивалентное действующее значение напряжения на ее зажимах незначительно отличается от напряжения промышленной частоты. Однако работа БК при повышенном напряжении по сравнению номинальным приводит к быстрому разрушению изоляции БК. Поэтому при установке их в сетях с несинусоидальным напряжением, помимо исключения перегрузок по току, следует исключить режимы, при которых напряжение выше номинального напряжения БК.

Рассматриваются следующие случаи подключения емкостных компенсирующих устройств к подстанциям с источниками ВГ [1]:

БК подключена к шинам ВН;

БК подключена к шинам НН;

БК подключена к шинам ВН и НН.

Обеспечение нормальной работы БК.

БК в сетях 6-10 кВ защищается от перегрузки токами ВГ с помощью последовательно включенного реактора.

При коэффициенте искажения синусоидальности кривой напряжения больше нормально допустимого ГОСТ 13109-97 значения цепь реактор – БК выбирается как фильтр высших гармоник (ФВГ).

При k_U меньше нормально допустимого значения необходимо чтобы цепь реактор – БК носила индуктивный характер на наименьшего порядка номере гармоники n_{min} .

1. Схема замещения приводится к виду, показанному на рис. 6.4.
2. Определяется частота, на которой может возникнуть резонанс.
3. Определяется коэффициент кратности токов ВГ в БК.
4. Определяется ток ВГ, протекающий через БК.

5. Определяется коэффициент перегрузки БК по току.
6. Определяется напряжение n-ной ВГ, протекающей по БК.
7. Определяется коэффициент перегрузки БК по напряжению.

В ходе лекции теоретическая часть интерпретируется небольшими примерами с использованием методов активизации обучения.

Выводы.

1. Дан алгоритм расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента n-ой гармонической составляющей.
2. Показано, как защитить батарею конденсаторов от негативного воздействия высших гармоник.
3. Приведена методика проверки возможности возникновения резонансных режимов при несинусоидальности в сети.

Лекция 11.

Определение коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Цель лекции: показать, как определить ПКЭ, характеризующее несимметрию напряжения.

Задачи:

- определить токи обратной последовательности при разных видах несимметрии;
- определить сопротивления обратной последовательности элементов сети;
- привести порядок расчета коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности;
- дать практические рекомендации по возможности подключения к сети специфичных электроприемников.

План лекции.

1. Виды несимметрии и расчет токов обратной последовательности.
2. Схема замещения сети и расчет сопротивлений обратной последовательности.
3. Алгоритм расчета коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности.
4. Практические рекомендации по оценке возможности подключения к сети специфичной нагрузки, искажающей качество электроэнергии.

Краткое содержание лекции.

Существует однофазная несимметрия токов и напряжений. Она возникает когда нагрузка подключена на одну фазу или однолинейное напряжение. Двухфазная несимметрия наблюдается, когда нагрузка включена на две пары фаз. Трехфазная несимметрия характерна подключению нагрузки по трем парам фаз, но их загрузка неодинакова.

Эквивалентный ток обратной последовательности всей несимметричной нагрузки, подключенной к секции шин и обусловленной наличием нескольких однотипных однофазных приемников, включенных на разные фазные или линейные напряжения сети, или различных разнотипных несимметричных приемников, определяется через эквивалентные токи, потребленные по фазам секции или системы шин: $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{I}_{AB}, \dot{I}_{CA}, \dot{I}_{BC}$.

При двух фазной несимметрии эквивалентный ток обратной последовательности определяется по формуле:

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{3I_{AB}^2 + (I_{AB} - 2I_{BC})^2},$$

где I_{AB}, I_{BC} – токи, потребляемые нагрузками в соответствующих фазах.

$$\psi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3}I_{AB}}{I_{AB} - 2I_{BC}} - \varphi_H,$$

где φ_H – фазный угол несимметричной нагрузки.

$$I_2 = \frac{I}{3U_1} \sqrt{S_{AB}^2 + S_{BC}^2 - S_{AB}S_{BC}};$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3} S_{AB} + S_{BC}}{3 S_{AB} - S_{BC}} - \varphi_H.$$

В частном случае, когда включена только однофазная нагрузка I_{AB}

$$I_{2\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_{AB}.$$

Схема замещения сети для расчета несимметрии напряжений составляется аналогично схеме замещения для определения несинусоидальности напряжений, только в ней используются сопротивления обратной последовательности.

Значения сопротивлений обратной последовательности определяются как при расчете несимметричных КЗ, то есть либо на основании паспортных данных оборудования X_{2*CD} , X_{2*AD} , X_{2*H} , либо определяя их приближенными методами через обобщенную нагрузку.

Ниже приведены некоторые из них, используемые в инженерных расчетах.

Синхронные и асинхронные двигатели

$$X_{2CD}^* = 0.24; X_{2AD}^* = 1/K_{II},$$

где K_{II} – кратность пускового тока.

Для силовых нагруженных трансформаторов, реакторов, системы, БК, сопротивление обратной последовательности равно сопротивлению прямой последовательности (отсутствие вращающихся магнитных полей дает это равенство), т.е. $X_2 = X_1$.

Для вентиляльных преобразователей можно принять $X_{2ВП} = 2,5 X_{1ВП}$,

где $X_{1ВП}$ – сопротивление прямой последовательности – паспортное значение или определяется по мощности вентиляльного преобразователя общеизвестным способом.

Для дуговых сталеплавильных и рудотермических печей

$$Z_{2II} = \frac{U_{ном}^2}{S_{II}},$$

где S_{II} – мощность печного трансформатора.

Алгоритм расчета несимметрии напряжений.

1. Составляем схему замещения сети для токов обратной последовательности. В эту схему все элементы сети, включая систему, вводятся своими сопротивлениями обратной последовательности.

2. Неполнофазная (несимметричная) нагрузка вводится в эту схему в виде тока обратной последовательности I_2 .

3. Определяется эквивалентное значение тока обратной последовательности I_2 при несимметричной нагрузке в зависимости от вида несимметрии напряжений и токов.

4. Определяется значение I_2 в ветвях схемы замещения I_{2S} , где S -ветвь схемы сети.

5. Определяется напряжение обратной последовательности U_{2S} в узлах схемы замещения как падение напряжения в примыкающих ветвях $U_{2S} = I_{2S} x_{2S}$.

6. Определяется коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в ветвях схемы $K_{2U_S} = \frac{U_{2S}}{U_1} 100$, %.

7. Схема замещения эквивалентуется относительно точки общего присоединения (ТОП) и определяется эквивалентное сопротивление обратной последовательности сети $x_{2\Omega}$.
8. Рассчитывается напряжение обратной последовательности в ТОП $U_2 = I_2 x_{2\Omega}$.
9. Определяется коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Далее рассматриваются простейшие примеры по определению K_{2U} .

Т.о., рассмотрен метод определения K_{2U} . В детерминированной постановке студентам предлагается самостоятельно изучить метод расчета K_{2U} в вероятностной постановке [2].

В условиях эксплуатации часто возникают ситуации, когда не требуется подробный расчет ПКЭ, а нужно узнать возможно ли подключение к узлу специфичной нагрузки без нарушений требований ГОСТ 13109-97, поэтому необходимо рассмотреть практические рекомендации по оценке возможности подключения специфичной нагрузки к сети.

В узле сети с нелинейными нагрузками допускается применение БК, если соблюдаются следующие требования ГОСТ 13109-97:

$$\text{для вентильных преобразователей } \frac{S_{КЗ}}{S_{ВП}} \geq 200;$$

$$\text{для других нелинейных нагрузок } \frac{S_{КЗ}}{S_{НЛ}} \geq 100.$$

Для однофазной или несимметричной нагрузки $S_{КЗ} \geq 50 \cdot S_{одн}$.

Оценка допустимости размаха изменения напряжения при работе ДСП:

$$\lambda = \frac{k_m \cdot S_{nmmax}}{S_{КЗ}} \leq 0,01;$$

$$k_m = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{nmi}}{S_{nmmax}}\right)^2}.$$

При одинаковой мощности печи $k_m = \sqrt[4]{m}$

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>m</i>	1	1	2	3	3	4	5	5

Общая оценка возможности подключения специфичной нагрузки к сети:

$$\text{для сетей напряжением выше 1 кВ } \frac{S_{уст спец}}{S_{КЗ min}^{ТОП}} \cdot 100 \leq 0,3\%;$$

$$\text{для сетей напряжением ниже 1 кВ } \frac{S_{уст спец}}{S_{КЗ min}^{ТОП}} \cdot 100 \leq 0,2\%,$$

где $S_{уст спец}$ – суммарная установленная мощность специфичной нагрузки;

$S_{КЗ min}^{ТОП}$ – мощность КЗ в минимальном режиме в точке общего присоединения.

Выводы.

1. Рассмотрены виды несимметрии и токи обратной последовательности для них.
2. Показано как определяются сопротивления обратной последовательности.
3. Приведены алгоритмы расчета несимметрии напряжения.
4. Даны практические рекомендации по оценке возможности подключения к узлу специфичных электроприемников с точки зрения ГОСТ 13109-97.

Лекция 12.

Регулирование напряжения.

Цель лекции: рассмотреть способы и принципы регулирования напряжения в сети.

Задачи:

- показать различие между видами, способами и принципами регулирования напряжения;
- рассмотреть наиболее распространенные способы регулирования напряжения сети и дать их сравнительный анализ.

План лекции.

1. Принципы регулирования напряжения.
2. Регулирование напряжения в центре питания.
3. Регулирование напряжения изменением сопротивлений элементов сети.
4. Регулирование напряжения путем перераспределения потоков реактивной мощности.
5. Регулирование напряжения изменением коэффициентов трансформации.
6. Регулирование напряжения путем изменения потерь напряжения в сети.

Способы и принципы регулирования напряжения

Отклонение напряжения на зажимах ЭП зависит от ряда факторов: уровня напряжения на зажимах ИП, потерь напряжения в элементах сети от источника до ЭП, наличия регулирующих устройств напряжения, состава электрооборудования и режима его работы.

Виды регулирования:

Централизованное регулирование напряжения – это регулирование напряжения в центре питания (или на источниках питания) – приводит к изменению напряжения практически во всей электрической сети.

Местное регулирование – такое регулирование, когда в процессе регулирования изменение режима достигается только в ограниченной части сети. Местное регулирование делится на групповое и индивидуальное. Групповое – для группы потребителей, например с помощью ПБВ трансформаторов ТП. Индивидуальное – для отдельных ЭП, например у печи сопротивления.

Принципы регулирования напряжения

В зависимости от мощности нагрузки и ее характера централизованное и местное регулирование осуществляется по различным принципам:

- стабилизация;
- двухступенчатое регулирование;
- встречное регулирование.

Стабилизация напряжения применяется для потребителей с ровным ГЭН (например, предприятия с непрерывным процессом производства). Для потребителей с двухступенчатым ГЭН (например, с односменным режимом работы) используется двухступенчатое регулирование, при неравномерной нагрузке – встречное. При этом, для каждого значения нагрузки будет иметь место и свое значение потерь напряжения. Чтобы отклонения напряжения не выходили за пределы допустимых, регулирование его проводится в зависимости от тока нагрузки.

Регулирование напряжения в ЦП производится на:

- 1) электростанциях за счет регулирования тока возбуждения генераторов;
- 2) шинах вторичного напряжения ГПП, ПГВ, сетевых подстанций путем изменения коэффициента трансформации силовых трансформаторов (автотрансформаторов), с помощью синхронных компенсаторов или статических тиристорных компенсаторов. Регулирование напряжения при этом может производиться автоматически.

Регулирование напряжения изменением сопротивления элементов сети применяют в 2-х случаях:

1) при выборе сечения проводов и кабелей с учетом допустимых отклонений напряжения на зажимах электроприемника (например, в осветительных сетях, городских сетях).

2) при использовании установок продольной емкостной компенсации.

Регулирование напряжения перераспределением потоков реактивной мощности осуществляется путем установки компенсирующих устройств (КУ) в электрических сетях, мощность и место установки которых определяется специальным расчетом. Распределение реактивной мощности в сети осуществляется из условия баланса реактивной мощности на всех уровнях напряжения. Необходимое значение реактивной мощности может вырабатываться источниками при их различном долевом участии. Изменяя долю выработки реактивной мощности различными источниками, можно изменять потери напряжения на рассматриваемом участке сети. Физический смысл этого процесса поясняется с помощью формулы для определения потери напряжения в линии с сопротивлением $r_l + jx_l$ при мощности нагрузки $P_H + jQ_H$:

$$\Delta U = \frac{P_H \cdot r_l}{U_c} + \frac{(Q_H - Q_{КУ}) \cdot x_l}{U_c},$$

где $Q_{КУ}$ – мощность компенсирующего устройства.

Изменяя мощность компенсирующего устройства, $Q_{КУ}$, можно менять потерю напряжения, т.е. регулируемые КУ используются как местные средства регулирования напряжения. Такое регулирование в сетях напряжением выше 1 кВ осуществляется с помощью батарей конденсаторов (БК), статических компенсирующих устройств (СКУ), синхронных двигателей (СД), а в низковольтных сетях - с помощью батарей конденсаторов.

Для изменения режима напряжения в низковольтных сетях наиболее характерным средством является варьирование коэффициента трансформации трансформаторных подстанций с помощью устройства ПБВ, которое устанавливается на высокой стороне трансформатора.

Положения ПБВ: +5; +2,5; 0; -2,5; -5%. Переключения осуществляются крайне редко, так как силовой трансформатор нужно отключать от сети. Обычно переключения проводят два раза в год. Возможно регулирование напряжения с помощью устройств РПН.

Изменение коэффициента трансформации распределительных СТ

Изменяя регулировочное ответвление СТ, изменяют добавки напряжения, получающиеся во вторичной сети по сравнению с первичной.

Значение добавки определяют как:

$$E = \left(\frac{U_{2ном*}}{U_{1ном*}} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

где $U_{2ном*}$ – относительное номинальное напряжение вторичной обмотки СТ;

$U_{1ном*}$ – относительное номинальное напряжение первичной обмотки с учетом выбранного регулировочного ответвления.

Студентам предлагается вспомнить более подробно как это делается путем наводящих вопросов и активизации мышления. Регулирование напряжения с помощью устройств РПН рассматривались в дисциплине «Электроэнергетические системы и сети».

Задав конкретную сеть на лекции целесообразно проанализировать все рассмотренные выше способы регулирования напряжения для нее и выбрать наиболее целесообразные.

Выводы.

1. Показана связь между видами, принципами и способами регулирования напряжения в сети.
2. Рассмотрены принципы регулирования напряжения.
3. Дана характеристика способам регулирования напряжения в сети.

Лекция 13.

Технические средства регулирования напряжения в сети.

Анализ напряжения в сети.

Цель лекции: привести характеристику и дать целесообразность применения технических средств регулирования напряжения в сети путем анализа режимов.

Задачи:

- рассмотреть возможность применения технических средств для регулирования напряжения и дать их характеристику;
- показать задачи анализа режима напряжения в распределительной сети;
- рассмотреть условия обеспечения требуемого режима напряжения.

План лекции.

1. Технические средства регулирования напряжения и их характеристика.
2. Анализ режима напряжений в распределительных сетях.
3. Условия обеспечения требуемого режима напряжения.

Краткое содержание лекции.

Для регулирования напряжения используют следующие технические средства:

- генераторы электростанций;
- силовые трансформаторы;
- линейные регуляторы, ЛР;
- управляемые БК;
- синхронные двигатели с АРВ;
- синхронные компенсаторы и специальные синхронные компенсаторы;
- быстродействующие статические компенсирующие устройства.

Генераторы электростанций обычно связаны линиями с приемниками электроэнергии и шинами ЦП через повысительные и понизительные подстанции. Отклонение напряжения на выводах генератора более 5% приводит к необходимости снижения его мощности. Поэтому использование генераторов в качестве средств регулирования напряжения ограничено.

Силовые трансформаторы с РПН устанавливаются на понижающих подстанциях с $U_{\text{нн}} = 6-20$ кВ. В настоящее время все массовые серии трансформаторов (автотрансформаторов) выпускаются с РПН. Расширен диапазон их регулирования и одновременно увеличено число и уменьшены отдельные регулировочные ступени. Так, силовые трансформаторы мощностью $6,3-80$ МВА имеют диапазон регулирования $\pm 16\%$, число ступеней ± 9 относительно номинального напряжения, величину ступени (шаг регулирования) $1,78\%$.

По условиям работы переключающих устройств силовые трансформаторы с РПН могут быть разделены на следующие основные группы:

1) силовые трансформаторы с автоматическим регулированием напряжения, АРН, напряжением 35-220 кВ на понижающих подстанциях, питающих промышленные сети, имеющие не менее 20-30 переключений в сутки;

2) индивидуальные стабилизирующие силовые трансформаторы малой мощности для специальных потребителей, требующих особо высокого качества напряжения, характеризующиеся очень частыми переключениями. В этих случаях приходится применять переключающие устройства, работающие с существенной недогрузкой. В наиболее тяжелых случаях целесообразно применять бесконтактные устройства с плавным регулированием, например силовые трансформаторы с подмагничиванием, с подвижными обмотками и так далее;

3) силовые трансформаторы с РПН в промышленных установках для питания электрических печей и электролизных ванн, где частота переключения достигает 200 переключений в сутки.

Линейные регуляторы трехфазные мощностью 0,4÷100 МВА, напряжением 6-35 кВ, РПН ±8% или ± 10%, шаг регулирования 1,2% или 1,5%. Например, регуляторы мощностью 400÷630 кВА имеют регулировочный автотрансформатор, последнюю обмотку которого включают в расщелку линии так, что один её зажим подсоединен к стороне регулируемого напряжения, а другой зажим – к стороне отрегулированного напряжения. Возбуждающая обмотка питается от обмотки низкого напряжения автотрансформатора. Зажим на этой обмотке подключают к линии со стороны отрегулированного напряжения.

Управляемые БК выпускаются в виде комплектных конденсаторных установок напряжением 0,38; 6; 10 кВ. Установки серии ККУ напряжением 0,4 кВ с автоматическим регулированием мощности предназначаются для внутренней установки, если их мощность находится в пределах 80-600 квар. У них одноступенчатое автоматическое регулирование. Оно может осуществляться с помощью АРН, отключающего установку с выдержкой времени 2-3 мин. Широко распространена также серия ККУ-0,38 кВ, мощностью 80-480 квар, предназначенная для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в промышленных сетях. Серия имеет 6 типов установок с многоступенчатым регулированием мощности. Мощность ступени – 80 квар.

Компенсирующие устройства напряжением 6-10 кВ выпускают внутренней и наружной установки. Их мощность находится в пределах 300-1350 квар.

Установки имеют ступенчатое регулирование. Для регулирования мощности КУ применяют различные автоматические устройства.

Синхронные двигатели с АРВ должны быть с уставкой по заданному напряжению. Не все типы двигателей используют в качестве средств регулирования напряжения, например из-за низкого КПД нельзя использовать тихоходные двигатели.

Синхронные компенсаторы (СК) могут работать в перевозбужденном и недовозбужденном режиме. Отстающая мощность СК составляет 0,6-0,65 опережающей, что связано с меньшей устойчивостью при работе с отстающей мощностью. СК имеют схемы АРВ в виде быстродействующего регулятора возбуждения, реагирующего на отклонение напряжения. СК рекомендуют ставить на ГПП, подстанциях связи с энергосистемой, на крупных узловых подстанциях энергосистем.

При анализе режима напряжений в распределительных сетях определяют требуемые законы регулирования управляемых компенсирующих и регулирующих устройств, устанавливаемых в сетях, допустимые значения потерь напряжения в сетях низкого напряжения (НН), целесообразные значения ступеней и диапазонов регулирования.

Анализ режима напряжения ведут одновременно для всех распределительных сетей, присоединенных к ЦП и состоящих из разветвленных сетей среднего напряжения СН (напряжение 6-10 кВ), всех распределительных трансформаторов (РТ) и всех сетей НН, присоединенных к ним. При этом предполагают, что в любом пункте сети СН могут быть включены РТ и что в любой точке сети НН может быть присоединен ЭП.

В качестве критерия правильности решения вопросов регулирования напряжения принимают следующее условие: отклонение напряжения от номинального значения всех ЭП, присоединенных к рассматриваемой сети, не должно выходить за пределы технически допустимых значений (положительного отклонения напряжения δU_+ и отрицательного отклонения напряжения δU_-). Рассматривают два предельных рабочих режима: наибольших и наименьших нагрузок. Отклонение напряжения в каком либо пункте сети в режиме наибольших нагрузок и значение потерь напряжения на участке сети в этом режиме обозначают одним штрихом $\delta U'$, $\Delta U'$, а в режиме наименьших нагрузок двумя штрихами $\delta U''$, $\Delta U''$. Разность между отклонениями $\delta U'$ в режиме наибольшей нагрузки и $\delta U''$ в режиме наименьшей нагрузки для данного пункта сети называют диапазоном отклонений напряжения d .

Условия обеспечения требуемого режима напряжения

Для обеспечения желаемого напряжения у ЭП необходимо выполнить ряд требований:

- со стороны питающей сети и к выходным зажимам понижающих СТ должно быть подведено напряжение, находящееся в допустимых пределах;
- автоматический регулятор напряжения, управляющий устройствами РПН, должен иметь специально выбранные уставки;
- в распределительных сетях СН потеря напряжения не должна быть больше допустимого значения;
- РТ должны быть включены на специально подобранные рабочие регулировочные ответвления;
- в сетях НН наибольшие потери напряжения не должны выходить за допустимые пределы.

Допустимые пределы для подведенного со стороны питающей сети напряжения определяются располагаемым диапазоном регулирования у понижающих СТ.

Требуемое рабочее положение регулировочного ответвления у РТ определяется местом включения данного СТ в сеть СН. Сеть СН разделяют на зоны по 2,5% потерь напряжения в режиме наибольших нагрузок. В каждой зоне присоединенные РТ включены на одно и то же рабочее ответвление.

Независимо от действительных потерь напряжения в сети СН потери напряжения в сети НН ограничиваются прежде всего предельно допустимыми отклонениями напряжения у ЭП. Кроме того, приходится учитывать влияние ступени регулировочных ответвлений у РТ. С помощью средств регулирования напряжения, установленных в ЦП, осуществляют встречное регулирование напряжения, при котором в часы максимальных нагрузок на шинах ЦП поддерживается повышенный уровень напряжения, а в часы минимальных нагрузок уровень напряжения – пониженный. Диапазон регулирования напряжения на шинах ЦП определяется диапазоном изменения напряжения в сети.

Выбор закона регулирования напряжения на шинах ЦП производят для предельных режимов совместно с выбором регулировочных ответвлений РТ.

В статических компенсирующих устройствах, источниках реактивной мощности (ИРМ) применяется ступенчатый характер изменения реактивной мощности и плавное регулирование.

Для плавного регулирования напряжения и реактивной мощности используются статические ИРМ с параллельным соединением БК и управляемых реакторов. Управление мощностью реакторов осуществляется либо с помощью встречно-параллельно включаемых управляемых тиристоров, либо путем изменения продольного или поперечного подмагничивания. Плавность регулирования достигается с помощью тиристорного блока путем изменения угла коммутации тиристоров.

Студентам предлагается самостоятельно более глубоко проанализировать технические средства регулирования напряжения и составить таблицу по области их применения.

Выводы.

1. Приведены характеристики генераторов, силовых трансформаторов, линейных регуляторов, управляемых БК, ИРМ, синхронных двигателей с АВР, синхронных компенсаторов как средств регулирования напряжения.
2. Показано, как осуществлять анализ режимов напряжений в распределительных сетях.
3. Даны условия обеспечения требуемого режима напряжения в распределительных сетях.

Лекция 14.

Ограничение колебаний напряжения. Схемные решения.

Цель лекции: показать как схемным путем можно снизить колебания напряжения.

Задачи:

- рассмотреть возможные виды схемных решений по снижению колебаний напряжения и показать их область применения.
- привести примеры, подтверждающие эффективность использования схемных решений для ограничений колебаний напряжения.

План лекции.

1. Подключение резкопеременных нагрузок к сетям более высокого класса напряжения.
2. Снижение реактивного сопротивления питающей сети.
3. Распределение питания спокойных и резкопеременных нагрузок.

Краткое содержание лекции.

К мероприятиям по уменьшению колебаний U относятся:

- схемные решения;
- специальные технические средства.

При наличии резко переменных нагрузок меры по ограничению колебаний напряжения должны предусматриваться на стадии проектирования электрических сетей и систем электроснабжения.

Основным схемным решением по уменьшению колебаний напряжения, реализуемым на стадии проектирования, является подключение резкопеременных нагрузок к сетям более высокого напряжения. Это позволяет приблизить их к ИП и уменьшить токи и сопротивления между системой и нагрузкой, что приводит к снижению колебаний напряжения.

Уменьшение реактивного сопротивления возможно за счет продольной ёмкостной компенсации, т.е. включения БК последовательно в рассечку линии. Благодаря этому уменьшаются индуктивное и полное сопротивления линии, а также потери напряжения в линии.

Применение установок продольной компенсации (УПК) наиболее эффективно при преобладании реактивного сопротивления линии и при низких значениях $\cos\varphi$. При пиковых нагрузках УПК оказываются хорошим средством уменьшения размахов изменения напряжения. УПК находят широкое применение для электроснабжения сварочных установок и руднотермических печей.

Обычно УПК включаются последовательно со сварочными или печными трансформаторами, т.е. параллельно их ветви намагничивания. В образовавшемся ферромагнитном контуре при резких изменениях нагрузки или шунтировании БК возможно возникновение феррорезонанса токов и субгармонических колебаний. Появление субгармоник может привести к возникновению субгармонического резонанса, при котором наблюдаются периодические колебания напряжения. В результате чего становится заметным мигание ламп, возникают периодические колебания частоты вращения ротора электродвигателей.

Аналогично, если линия основного питания, т.е. связь системы электроснабжения прокатного стана с ГПП или ТЭЦ выполнена протяженным токопроводом, то при работе стана возникают субгармонические колебания, что приводит к кратковременным перенапряжениям, являющимся причиной повышения аварийности в кабельной сети.

Методами активизации обучения выбираются совместно со студентами меры, устраняющие указанные недостатки:

- 1) использование специальных конденсаторов, допускающих кратковременное перенапряжение;
- 2) использование постоянно включенных шунтирующих резисторов, сопротивления которых в несколько раз больше сопротивления конденсаторов;

3) подключение параллельно БК нелинейных ограничителей перенапряжения, шунтирующих батарею конденсаторов при КЗ на стороне потребителя, т.е. за БК.

Разделение питания спокойных и резкопеременных нагрузок возможно следующими путями.

1. Выделение резкопеременной нагрузки на отдельный СТ

2. Развитием этого способа, позволяющим снижать размах колебаний напряжения практически до 0, является применение сдвоенного реактора

При этом спокойные и резкопеременные нагрузки подключаются к разным ветвям реактора.

3) Применение силового трансформатора с расщепленными обмотками.

В случае подключения к одной ветви обмотки НН СТ спокойной нагрузки, а к другой - резкопеременной связь между значениями размахов изменения напряжения на соответствующих шинах ΔU_2 и ΔU_3 можно представить в виде

$$\Delta U_2 = \Delta U_3 \frac{4K_p}{4 + K_p},$$

где K_p – коэффициент расщепления ($K_{p\text{CP}} = 3,5$).

На самостоятельную работу предлагается несколько вариантов схем сети с резкопеременной нагрузкой, для которых нужно будет выбрать наиболее эффективные схемы решения.

Выводы.

1. Рассмотрена целесообразность перевода резкопеременной нагрузки на более высокий уровень напряжения.

2. Показано, почему при снижении реактивного напряжения питающей сети уменьшаются размах и изменения напряжения.

3. Приведены способы разделения питания спокойной и резкопеременной нагрузок и дана их характеристика.

Лекция 15.

Технические средства для снижения колебаний напряжения.

Цель лекции: выявить специальные технические средства, снижающие колебания напряжения и показать каким путем осуществляется это снижение.

Задачи:

- провести сравнительный анализ использования для снижения колебаний синхронных компенсаторов и специальных синхронных компенсаторов;
- рассмотреть прямую компенсацию колебаний напряжения;
- рассмотреть косвенную компенсацию колебаний напряжения.

План лекции.

1. Применение синхронных машин для ограничения колебаний напряжения.
2. Быстродействующие статические компенсирующие устройства.
3. Прямая компенсация колебаний напряжения.
4. Косвенная компенсация колебаний напряжения.

Краткое содержание лекции.

Если мероприятия схемного характера оказались недостаточными для уменьшения колебаний напряжения, то следует предусмотреть специальные устройства и установки, требующие, как правило, дополнительных капитальных вложений.

Синхронные компенсаторы и двигатели, генерируя в сеть реактивную мощность, обеспечивают в установившемся режиме увеличение $\cos\phi$ и уменьшение колебаний напряжения. Это объясняется наличием у них естественного регулирующего эффекта,

который проявляется тем значительнее, чем круче фронт изменения реактивной мощности и напряжения на шинах, а также чем меньше нагрузка на валу синхронной машины.

Исследования показали, что при скоростной выдаче реактивной мощности порядка 115Мвар/с можно достичь полной стабилизации напряжения в сети при работе резкопеременных нагрузок. Однако, обычные синхронные компенсаторы и двигатели, работающие в режиме перевозбуждения, этого обеспечить не могут, что объясняется недостаточной перегрузочной способностью синхронной машины по цепи возбуждения. Номинальное напряжение возбуждения равно 200 – 300 В. В связи с этим, выполняются специальные синхронные компенсаторы, СКК. Их номинальное напряжение возбуждения равно 20 – 50 В. По сравнению с обычными компенсаторами у них уменьшаются значения постоянных времени цепи возбуждения и статора. СМ должна быть снабжена быстроходной системой автоматического регулирования возбуждения, позволяющей обеспечить режим непрерывного слежения за колебанием реактивной мощности и напряжения.

При использовании быстродействующих СК в сетях с резкопеременной нагрузкой закон регулирования компенсирующего устройства, т.е. ССК, будет

$$Q_{КУ}(t) = Q_{\sim}(t)K_{\sim} + Q_{СР}(t) K_{СР},$$

где K_{\sim} , $K_{СР}$ – относительные значения переменной и постоянной составляющих потребляемой реактивной мощности, далее – переменный и постоянный коэффициенты компенсации.

а переменная составляющая реактивной мощности Q_{\sim} находится по выражению:

$$Q_{\sim} = \sqrt{Q_{СК}^2 - Q_{СР}^2},$$

Средняя и среднеквадратичная реактивные мощности $Q_{СР}$ и $Q_{СК}$ могут быть найдены по методу трапеций.

Переменный коэффициент компенсации равен

$$k_{\sim} = \frac{\delta Q - \delta Q_{дон}}{\delta Q} = 1 - \frac{\delta U_{т дон} S_{кз}}{100 \delta Q},$$

где $\delta Q = Q_{max} - Q_{min}$ - разность между наибольшим и наименьшим значением реактивной мощности.

Постоянный коэффициент компенсации равен:

$$k_{ксп} = 1 - \frac{tg\varphi_{дон}}{tg\varphi_{сп}},$$

где $tg\varphi_{дон}$ и $tg\varphi_{сп}$ - допустимое и среднее значение коэффициента реактивной мощности.

Искомая мощность компенсирующего устройства – ССК определяется по выражению:

$$Q_{КУ} = \sqrt{k_{\sim}^2 Q_{\sim}^2 + k_{ксп}^2 Q_{сп}^2}.$$

Быстродействующие статические компенсирующие устройства

Главное их назначение – уменьшение δU_t и обеспечение компенсации реактивной мощности. Кроме того, они снижают коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Простейший пример таких устройств – батарея конденсаторов, регулируемая тиристорами.

По сравнению с синхронными компенсаторами батареи конденсаторов, регулируемые тиристорным блоком, имеют следующие преимущества:

- более широкий диапазон регулирования;
- низкие эксплуатационные расходы и потери электроэнергии;
- большая скорость компенсации;
- возможность пофазного регулирования мощности БК.

Недостатки управляемых с помощью тиристорных батарей конденсаторов:

- недостаточное быстродействие;
- ступенчатый характер регулирования реактивной мощности.

К таким устройствам относятся:

1) Параметрический статический компенсатор, построенный на основе насыщающегося реактора (НР) с вращающимся магнитным полем. Основным элементом компенсатора – регулирующее звено, состоящее из БК и НР.

2) Статическое компенсирующее устройство (СКУ) на основе тиристорно-реакторных групп, например тиристорный компенсатор реактивной мощности (ТКРМ). Здесь реактор управляется тиристорными ключами.

По сравнению с БК, управляемыми тиристорами, СКУ обладают рядом преимуществ. Так, СКУ на основе тиристорно-реакторных групп:

- обеспечивают ограничение скорости нарастания тока и его амплитудного значения, облегчая тем самым режим работы тиристорных;
- симметрируют импульс тока относительно момента времени, соответствующего нулевому значению напряжения;
- позволяют естественную коммутацию тока тиристорных;

Параметрические статические компенсаторы имеют:

- 1) малую инерционность;
- 2) меньшую величину генерируемых ВГ тока по сравнению с устройствами, использующими тиристорно-реакторные группы.

Независимо от мощности компенсатора полное устранение колебаний напряжения невозможно. Для большинства тиристорных компенсаторов коэффициент снижения колебаний напряжения не превышает 70%.

Прямая компенсация колебаний напряжения

Мощность СКУ, основанных на ступенчатом подключении к сети батарей конденсаторов или силовых резонансных фильтров с помощью тиристорных ключей, определяется следующим образом. Вначале находится мощность КУ для компенсации переменной составляющей реактивной мощности из условия:

$$Q_{ку} \geq Q_{max} k_{к\sim} .$$

Значение реактивной мощности каждой ступени определяется из условия:

$$Q_{ст} \leq \frac{\delta U_{t\partial on}}{100} S_{кз} .$$

Косвенная компенсация колебаний напряжения

В случае компенсации по схеме с нерегулируемыми батареями конденсаторов и управляемыми реакторами мощность регулируемого реактора Q_p будет определяться следующим образом:

$$Q_p \geq \delta Q_{max} k_{к\sim},$$

где

$$k_{к\sim} = 1 - \frac{\delta U_{t\dot{d}on} S_{кз}}{100 \Delta Q}.$$

Установленная мощность нерегулируемой части компенсатора равна:

$$Q_{БК} \geq (Q_{cp} + Q_p) k_{кcp} = [Q_{cp} + (Q_{max} - Q_{min}) k_{к\sim}] k_{кcp},$$

где

$$k_{кcp} = 1 - \frac{tg\varphi_{don}}{tg\varphi_{cp}}.$$

В ходе лекции на примерах по выбору технических средств ограничений колебания напряжения закрепляется полученная информация. На самостоятельную проработку выносятся анализ конструктивного исполнения указанных технических средств.

Выводы.

1. Рассмотрена возможность использования различных синхронных компенсаторов для ограничения колебаний напряжения.
2. Дана характеристика статических компенсирующих устройств.
3. Показано, как определяется мощность устройств при прямой и косвенной компенсации колебаний напряжения.

Лекция 16.

Снижение несинусоидальности напряжения схемным путем и применение силовых резонансных фильтров.

Цель лекции: рассмотреть схемные решения, обеспечивающие снижение синусоидальности напряжения и применения силовых резонансных фильтров.

Задачи:

- дать характеристику и область применения схемных решений по снижению несинусоидальности напряжения;
- привести схемы силовых резонансных фильтров и показать выбор их параметров.

План лекции.

1. Увеличения мощности КЗ на шинах источника ВГ.
2. Раздельное питание линейных и нелинейных нагрузок.
3. Увеличение числа фаз выпрямления ВП.
4. Принципиальные схемы силовых резонансных фильтров (СРФ) и схемы их включения в сеть.
5. Расчет параметров СРФ.

Краткое содержание лекции.

Снижение несинусоидальности напряжения обеспечивается либо рациональным построением схемы электрической сети, при которой коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения будет в допустимых пределах, либо применением специальных схем нелинейных нагрузок, либо применением корректирующих устройств.

К схемным решениям, снижающим несинусоидальность напряжения, относятся:

- увеличение мощности КЗ на шинах источника ВГ;
- раздельное питание линейных и нелинейных нагрузок;
- увеличение числа фаз выпрямления ВП;

Увеличение мощности КЗ на шинах источника ВГ осуществляется за счет повышения напряжения для нелинейных нагрузок или снижения сопротивления питающей сети. Мощные нелинейные нагрузки (ДСП, РТП) подключаются через специальные трансформаторы к сетям 35-220 кВ, где мощность КЗ больше, чем на шинах 6-10 кВ.

Раздельное питание линейных и нелинейных нагрузок осуществляется путем выделения нелинейных нагрузок на отдельную секцию шин или применением сдвоенных реакторов. В этом случае на шинах питания нелинейных нагрузок допускается высокий уровень коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (k_U), поскольку его значение ограничивается только условиями надежности работы автоматических систем управления и самих нагрузок, например условиями надежной коммутации тиристорных преобразователей.

Основным средством ограничения ВГ, генерируемых вентильными преобразователями, является увеличение числа фаз выпрямления.

Увеличение числа фаз выпрямления достигается путем применения вентильных преобразователей с большим числом фаз (12 или 24 - редко) или путем параллельного включения трансформаторов шестифазных преобразователей, при котором один СТ имеет схему соединения обмоток звезда-треугольник, а другой звезда-звезда, либо специальным выполнением обмоток трансформаторов преобразователей или посредством установки специальных фазоповоротных трансформаторов, включенных перед трансформаторами преобразователей.

Если схемные решения не дают требуемого уменьшения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, то используют специальные корректирующие устройства. К ним относятся силовые резонансные фильтры (СРФ), фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), фильтросимметрирующие устройства (ФСУ), ненастроенные фильтры (НФ), комбинированные фильтры высших гармоник (КФВГ), гибридные фильтры (ГФ).

Наибольшее распространение получили силовые резонансные фильтры, которые одновременно предназначаются для компенсации реактивной мощности (КРМ) и снижения уровня ВГ.

Силовой резонансный фильтр состоит из последовательно соединенных реактора L и БК C . Каждый фильтр настраивается на частоту определенной ВГ таким образом, чтобы сопротивление реактора на частоте гармоники было равно сопротивлению БК

$$n\omega L = \frac{1}{n\omega C}.$$

В сетях с шестифазными преобразователями устанавливаются СРФ пятой и седьмой гармоник, если при этом k_U превышает допустимое значение, то и СРФ 11 гармоник. В сетях с двенадцатифазными преобразователями – СРФ 11 гармоник, возможно и 13 гармоник.

в сетях с ДСП, сварочными установками, газоразрядными лампами, электродуговыми печами – фильтры Ф3, Ф5, Ф7 или Ф3 и Ф5 или Ф3.

При наличии фильтров возможно подключение БК без защитных реакторов. Во избежание резонансных явлений в сети необходим следующий порядок включения фильтров: Ф3-Ф5-Ф7-Ф11-Ф13-БК. Отключение должно производиться в обратном порядке. Настраивают фильтры на резонансную частоту с точностью, равной величине ступени регулирования индуктивности фильтра α .

Упрощенные принципиальные схемы фильтров показаны на рис.1.

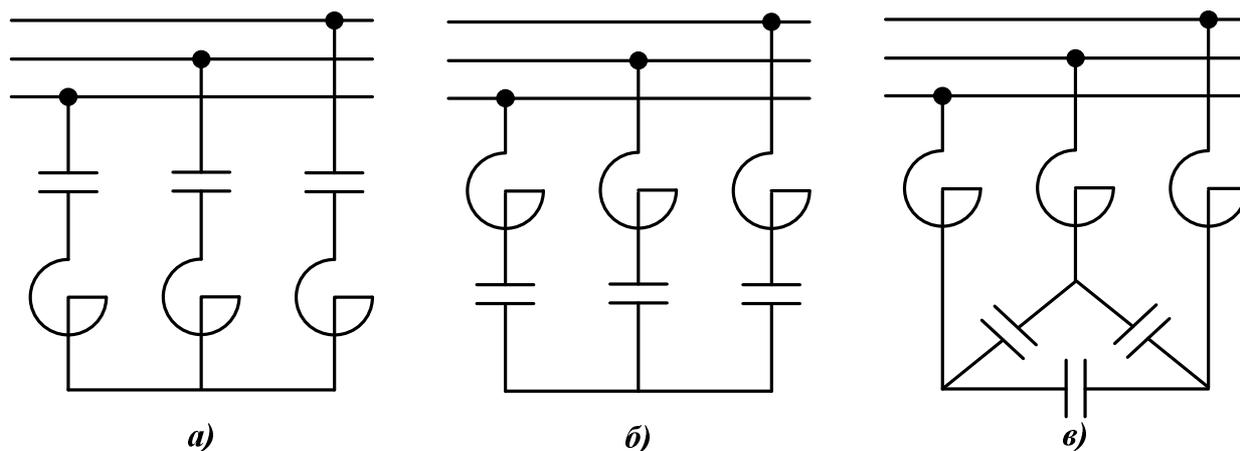


Рис.1. Упрощенные принципиальные схемы фильтров

В схеме рис.1, а) изоляция БК относительно земли находится под напряжением, не превышающим напряжение реактора, таким образом повышается надежность использования БК. Наибольшее распространение получила схема рис.1. б).

Расчет параметров СРФ

Для проектирования фильтров необходимо определить емкость БК и индуктивность реакторов по условию резонанса напряжения с учетом:

а) допустимой загрузки БК по току ($\leq 1,3I_{ном}$) и мощности ($\leq Q_{ном}$) и допустимой величине напряжения на БК ($\leq U_{ном}$);

б) допустимых величин технологических отклонений индуктивности нерегулируемых реакторов (до 2%) и емкостей БК (до 5%);

При использовании регулируемых реакторов допустимые величины технологических отклонений емкостей не лимитируются.

в) допустимых пределов отклонений мощности БК фильтров и мощности КЗ в точке подключения фильтров.

Подробный алгоритм расчета параметров СРФ и пример расчета приведены в [1]. В процессе лекции целесообразно их рассматривать одновременно для лучшего понимания алгоритма, при этом поясняя определения, используемые в нем. На самостоятельную проработку предлагается студентам по рассмотренному примеру проанализировать эффективность фильтра при случайном изменении токов ВГ.

Одной из трудностей применения СРФ является выполнения условия резонанса

$$n\omega \cdot L = \frac{1}{n\omega \cdot C}$$

при неизбежном технологическом разбросе параметров оборудования фильтра, отклонениях значений под воздействием окружающей среды, времени и нагрузки. Поэтому в последние годы было предложено использовать комбинированные фильтры ВГ (КФВГ). Они представляют собой комбинации СРФ и БК, обладают одновременно свойствами ненастроенных фильтров и ИРМ. При этом в КФВГ по сравнению с СРФ меньше мощность реакторных групп и загрузка БК по току и напряжению, меньше потери мощности в фильтре. Примеры таких фильтров приведены в [3].

Выводы.

1. Дана характеристика и область применения схемных решений, направленных на снижение несинусоидальности кривой напряжения.
2. Приведены принципиальные схемы силовых резонансных фильтров и дана их характеристика.
2. Показан алгоритм выбора СРФ.

Лекция 17.

Фильтросимметрирующие устройства. Ненастроенные фильтры.

Цель лекции: дать характеристику, особенности, область применения фильтросимметрирующих устройств (ФСУ) и ненастроенных фильтров (НФ).

Задачи:

- показать как выбираются параметры ФСУ;
- привести характеристику НФ и порядок выбора их параметров;

План лекции.

1. Фильтросимметрирующие устройства.
2. НФ, состоящий из одного фильтра.
3. НФ, состоящий из двух фильтров.
4. НФ, состоящий из фильтра и БК.

Краткое содержание лекции.

ФСУ представляет собой несимметричный фильтр, который подключен на линейное напряжение сети. Выбор линейных напряжений, на которые включаются фильтрующие цепи ФСУ, и соотношения мощностей конденсаторов, включаемых в фазы фильтра, определяются условиями симметрирования напряжения.

Мощность конденсаторов, включаемых на линейное напряжение $U_{AB}(U_{BC})$, должна удовлетворять условию

$$Q_{БК}^{AB(BC)} > 1,2 U_{номБК} I_{н\Sigma}^{AB(BC)},$$

где $I_{н\Sigma}^{AB(BC)}$ - действующее значение тока ВГ, протекающего через фильтрующую цепь, настроенную на частоту n_p -той гармоники.

Ток $I_{н\Sigma}^{AB(BC)}$ определяется по формуле

$$I_{н\Sigma}^{AB(BC)} = \sqrt{\sum_{n=2}^m (I_{nq} \sigma_{nq*}^{AB(BC)})^2},$$

где I_{nq} - ток n_q -й гармоники источника нелинейной нагрузки;

$\sigma_{nq*}^{AB(BC)}$ - доля тока I_{nq} , проходящего через плечо фильтра ФСУ, включенного на напряжение $U_{AB}(U_{BC})$.

Коэффициенты $\sigma_{nq*}^{AB(BC)}$ при включении фильтра на U_{AB} и U_{BC} будут:

$$\sigma_{nq*}^{AB} = \frac{\sqrt{1 + \rho_{BC} + \rho_{BC}^2}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}}, \quad \sigma_{nq*}^{BC} = \frac{\sqrt{1 + \rho_{AB} + \rho_{AB}^2}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}},$$

где $\rho_{AB(BC)}$ - коэффициенты, которые рассчитываются по выражению

$$\rho_{AB(BC)} = \frac{1}{1 + \frac{3k_{pAB(BC)} n_{pAB(BC)}^2}{1 - n_{q*AB(BC)}^2}},$$

где $k_{pAB(BC)}$ - относительная мощность БК ФСУ, включенной на $U_{AB}(U_{BC})$

$$k_{pAB(BC)} = \frac{Q_{BK}^{AB(BC)}}{S_K},$$

$n_{pAB(BC)}$ – номер ВГ, на частоту которой настроено плечо ФСУ;

S_K – мощность КЗ на шинах ФСУ;

$n_{q^*AB(BC)}$ – относительная доля n_q – той ВГ, протекающей через плечо ФСУ.

$$n_{q^*AB(BC)} = \frac{n_q}{n_{pAB(BC)}}.$$

Суммарная мощность БК ФСУ не должна превышать требуемой реактивной мощности $Q_{треб}$ для узла сети.

При значениях $K_p \leq 1,5 \cdot 10^{-2}$ отклонения частоты настройки от резонансной допускаются в пределах $\pm 5\%$.

Эффективность ФСУ по снижению напряжения ВГ определяется по относительным значениям ВГ напряжения после установки ФСУ по отношению к их значению до установки ФСУ (ФСУ включен на АВ, ВС):

$$U_{n^*AB} = \sqrt{3} \frac{\rho_{AB} \sqrt{3(1 + \rho_{BC} + \rho_{BC}^2)}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}};$$

$$U_{n^*BC} = \sqrt{3} \frac{\rho_{BC} \sqrt{3(1 + \rho_{AB} + \rho_{AB}^2)}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}};$$

$$U_{n^*CA} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3(\rho_{AB}^2 + \rho_{BC}^2 + \rho_{AB}\rho_{BC})}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}}.$$

Возрастание удельного веса нелинейных нагрузок, имеющих низкий коэффициент мощности, привело к необходимости использования в составе ФКУ батарей конденсаторов весьма большой мощности ($k_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$), что позволило уменьшить требования к точности настройки фильтров. Исследование ущербов от ВГ показало, что полное снижение ВГ не нужно, необходимо их понизить до требований ГОСТ 13109-97. Очевидно, при таком подходе не требуется устанавливать большое число СРФ.

Применение ненастроенных фильтров предпочтительно с точки зрения его загрузки токами ВГ. При неточной настройке СРФ при их малой мощности возможны их перегрузки по току и даже выход из строя.

Ненастроенные фильтра могут состоять из одного фильтра n_p -той гармоники, либо выполняться на базе двух настроенных на частоты n_{p1} и n_{p2} . НФ может использоваться также в сочетании с отдельно стоящей БК.

1) Определяется доля тока n_q -той ВГ, протекающего через фильтр, настроенный на частоту n_p

2) Находится ток ВГ в цепи БК фильтра

3) Минимально определяется допустимая мощность БК.

4) Если требуемая мощность конденсаторов фильтра превосходит $Q_{онм}$, то есть реактивную мощность, определенную из условия компенсации реактивной мощности, то находится частота гармоники, на которую следует настроить фильтр.

5) Проверка БК на отсутствие перегрузки по мощности

6) Определение сопротивления фазы реактора

7) Эффективность работы фильтра оценивается остаточным коэффициентом K_{u^*} в сети после установки фильтра.

Подробный алгоритм выбора НФ и пример расчета показан в [1].

Для НФ, состоящего из двух фильтров или НФ, состоящего из фильтра и БК порядок расчета его параметров тот же, что и в предыдущем случае, кроме определения долей тока, протекающих через фильтры и батарею конденсаторов.

Студентам предлагается самостоятельно провести анализ на предложенном примере по эффективности и области применения каждого из рассмотренных НФ. Результаты такого анализа должны быть обсуждены на следующей лекции.

Выводы.

1. Показана область применения ФСУ и методика определения его параметров.
2. Приведены преимущества ненастроенных фильтров по сравнению с СРС.
3. Дан порядок выбора параметров НФ.

Лекция 18.

Снижение несимметрии напряжения.

Цель лекции: Рассмотреть схемные решения и технические средства по снижению несимметрии в сети.

Задачи:

- дать характеристику схемным решениям по снижению несимметрии напряжения в сети;
- привести сравнительную характеристику симметрирующих устройств.

План лекции.

1. Схемные решения по снижению несимметрии напряжения.
2. Способы симметрирования.
3. Симметрирующие устройства и их характеристика (трансформаторного типа и индуктивно-емкостные).

Краткое содержание лекции.

Схемные решения по снижению несимметрии напряжения

1. Подключение однофазных ЭП к шинам с более высоким значением мощности К.З.

Как известно, при соотношении мощностей К.З. в узле сети S_K и однофазной нагрузки $S_{Одн}$ $S_K \geq 50 \cdot S_{Одн}$ K_{2U} не превышает указанного в ГОСТе значения. Поэтому несимметричные ЭП должны питаться от сетей с более высоким номинальным напряжением, для которых мощность короткого замыкания достаточно велика. Такое решение применяется для мощных однофазных ЭП путем подключения их к шинам 110 – 220 кВ через отдельные трансформаторы.

2. Рациональное распределение однофазных нагрузок – перераспределение нагрузок между фазами при систематической несимметрии, а при вероятностной несимметрии – с помощью устройств автоматического перераспределения нагрузок.

3. Применение силовых трансформаторов 6 – 10 /0,4 кВ со схемой соединения обмоток $\Delta - Y_0$ или $Y - Z$ (зигзаг) вместо $Y - Y_0$. Лучше $Y - Z$.

Если схемные решения не приводят к требуемому снижению несимметрии, то применяют специальные технические средства – симметрирующие устройства (СУ).

Использование СУ позволяет компенсировать в сети эквивалентный ток обратной последовательности, а следовательно и напряжения обратной последовательности.

В зависимости от места установки СУ различают следующие способы симметрирования: индивидуальный; групповой; централизованный; комбинированный;

Индивидуальные СУ целесообразны непосредственно для симметрирования отдельных ЭП.

Групповое симметрирование заключается в установке в различных точках сети СУ, каждое из которых симметрирует определенный участок сети (группу несимметричных ЭП).

При централизованном способе в распределительной сети устанавливается одно СУ.

Комбинированный способ заключается в одновременном использовании нескольких способов, представленных в одной сети.

Индивидуальный способ симметрирования устраняет несимметрию непосредственно в месте её возникновения – на зажимах несимметричного ЭП. Однако, коэффициент использования СУ при этом низкий.

При централизованном способе установленная мощность СУ оказывается меньше, чем при индивидуальном, но и снижение несимметрии напряжения также меньше, т.е. более низкая эффективность использования СУ. Лучшими показателями обладает групповой способ симметрирования. Выбор способа симметрирования в конкретных случаях определяется параметрами сети, числом и характером работы несимметричных ЭП.

В системах электроснабжения в зависимости от характера ЭП и места их установки используются управляемые и неуправляемые СУ. В настоящее время разработано большое число схем СУ как с электрическими, так и с электромагнитными связями между элементами. Рассмотрим основные из них.

СУ трансформаторного типа

Принцип работы: при помощи нескольких трансформаторов или специального трансформатора, включенного определенным образом между сетью и несимметричной нагрузкой, получают необходимое напряжение на нагрузке и добиваются некоторого выравнивания линейных токов.

К таким СУ относятся трансформатор Скотта, автотрансформаторная схема с регулируемой емкостью, автотрансформаторная схема с регулируемой емкостью и индуктивностью. Их подробное описание приведено в [1, 3].

Индуктивно-емкостные СУ.

Они представляют собой комбинацию индуктивных и ёмкостных элементов. Наибольшее распространение получила схема Штейнметца.

Симметрирующее устройство Штейнметца наиболее эффективно при коэффициенте мощности нагрузки равном 1. Поэтому при активно – индуктивной нагрузке параллельно ей подключается батарея конденсаторов C_2 . Мощность реактора и батареи конденсаторов C_1 в этом случае выбирается из условия

$$Q_L = Q_{C_1} = P_n / \sqrt{3}.$$

Схема Штейнметца в основном применяется для симметрирования однофазных ЭП с незначительно меняющимся ГЭН и $\cos\varphi$ близким к единице (дуговые печи косвенного действия, печи сопротивления).

Симметрирование при неизменных значениях СУ обеспечивается только при одном значении мощности нагрузки. Если возможные изменения параметров нагрузки приводят к превышению $K_{2U доп}$, возникает необходимость применения управляемых СУ.

Подробное описание таких устройств дано в [1, 3].

Управляемые СУ могут иметь как непрерывное, так и дискретное управление.

БК дискретных СУ набираются из нескольких групп, одна из которых подключена постоянно, а другая – переменна. Переключение осуществляется с помощью контакторов или тиристорных ключей. Сейчас применяют плавное регулирование емкостных элементов путем подключения параллельно БК реакторов, управляемых тиристорами.

Недостатки этого способа: увеличение потерь электроэнергии, увеличение установленной мощности оборудования СУ, генерирование ВГ тиристорами.

Характеристика управляемых СУ на основе схемы Штейнметца также приведена в [1, 3].

Их недостатки: суммарная полная мощность оборудования превосходит полную мощность нагрузки; СУ имеет ограниченный диапазон регулирования.

Выводы.

1. Рассмотрены схемные решения по снижению несимметрии напряжения.
2. Даны способы симметрирования нагрузки сети.
3. Приведена характеристика и анализ работы симметрирующих устройств трансформаторного типа и индуктивно-емкостных СУ.

Лекция 19.

Технические средства по снижению несимметрии напряжения.

Данная лекция является продолжением предыдущей, поэтому цель и задачи лекции остаются те же.

План лекции.

1. Емкостные симметрирующие устройства, их типы и выбор.
2. СУ на основе силовых трансформаторов с вращающимся магнитным полем.
3. Симметрирование системы, введением добавочных ЭДС.

Краткое содержание лекции.

Симметрирование одно-, двух-, трехфазных несимметричных нагрузок с низким $\cos\varphi$ осуществляется с помощью БК с неодинаковыми мощностями фаз. При этом мощность СУ выбирают из условия компенсации реактивной мощности. Она распределяется между фазами таким образом, чтобы ток обратной последовательности БК компенсировал ток обратной последовательности нагрузки (рис.11.6). Однако емкостные СУ компенсируют только реактивную составляющую тока нагрузки и не влияют на активную.

Емкостные симметрирующие устройства бывают одноплечевыми (емкость включена на однолинейное напряжение), двухплечевыми (емкости включены на два линейных напряжения) и трехплечевыми (емкости включены на три линейных напряжения).

Для определения параметров элементов емкостного СУ разработаны аналитические, графические методы расчета и специальные номограммы [11].

Ниже рассмотрен один из них.

Мощность симметрирующего устройства выбирается из условия компенсации реактивной мощности

1. $Q_{СУ} = Q_{КУ}$.

2. При подключении реактивных элементов СУ должно обеспечивать допустимое значение K_{2U}

$$K_{2U_{доп}} = \frac{(1 + \delta U_y) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{S_K},$$

где $\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}(P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2}(Q_{AB} + Q_{CA}) + Q_{BC}$;

$$\beta = -\frac{1}{2}(P_{AB} - P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_{AB} - Q_{CA}) + P_{BC}.$$

Входной коэффициент реактивной мощности узла с симметрирующим устройством и несимметричной нагрузкой составляет:

$$\operatorname{tg}\varphi_{ax} = (Q_{СУ} + Q_{\Sigma}) / P_{\Sigma}.$$

В зависимости от заданного значения реактивной мощности в узле сети $Q_{СУ}$, допустимых отклонений напряжения прямой последовательности и K_{2U} определяются реактивные мощности элементов СУ:

$$Q_{AB.CY} = -\frac{1}{3} \left[\sqrt{3}C - D - Q_{СУ} (1 - A - \sqrt{3}B) \right];$$

$$Q_{BC.CY} = -\frac{1}{3} [2D - Q_{CY} (1 + 2A)];$$

$$Q_{CA.CY} = \frac{1}{3} [\sqrt{3}C + D + Q_{CY} (1 - A + \sqrt{3}B)],$$

где $A = \frac{K_{2U_{\text{дон}}} \cos \psi_U}{1 + \delta U_{\text{дон}}};$

$$B = \frac{K_{2U_{\text{дон}}} \sin \psi_U}{1 + \delta U_{\text{дон}}};$$

$$C = BS_K + S_{AB} \cos(60^\circ - \varphi_{AB}) - P_{BC} + S_{CA} \cos(60^\circ + \varphi_{CA});$$

$$D = -AS_K + S_{AB} \sin(60^\circ - \varphi_{AB}) - Q_{BC} + S_{CA} \sin(60^\circ + \varphi_{CA}).$$

Здесь $S_{AB}, S_{BC}, S_{CA}, P_{BC}, Q_{BC}$ – модули мощностей нагрузок.

Положительное значение Q_{CY} соответствует индуктивной мощности его элемента, а отрицательное – емкостной. Если в схеме есть еще ВГ, то ставим ФСУ.

На самостоятельную проработку выносятся изучение всех остальных способов определения параметров СУ и проведение сравнительного анализа по их применению к конкретному примеру, заданному на лекции. Разбор предложенных решений должен быть произведен на следующей лекции с применением методов активизации обучения.

Оригинальным техническим решением является СУ на основе силовых трансформаторов с вращающимся магнитным полем, состоящих из трехфазного статора и заторможенного ротора. На роторе имеется однофазная обмотка, к которой подключены постоянные реактивные элементы: БК или реактор. Устройство представляет собой несимметричную нагрузку, фаза тока обратной последовательности которой может изменяться в диапазоне $0-2\pi$ при повороте ротора. Комбинация из двух таких СУ позволяет регулировать модуль и фазу тока I_2 путем поворота на определенные углы их роторов.

Симметрирование системы напряжений может быть осуществлено путем введения системы добавочных ЭДС. Суть этого способа заключается в том, что между источником и приемником в разрыв линейных проводов включаются источники ЭДС, образующие систему обратной последовательности. В результате суммирования ЭДС основного и добавочного источников их симметричные составляющие обратной последовательности взаимно компенсируются, напряжение на ЭП становится симметричным. В качестве добавочного источника ЭДС может быть использован синхронный генератор, трансформатор последовательного регулирования, трансформатор с пофазным регулированием коэффициента трансформации.

Более подробная информация по рассмотренным СУ приведена в [1, 3].

Материал данной и предыдущей лекцией закрепляется характерными примерами.

Выводы.

1. Рассмотрены СУ емкостного типа, на основе силовых трансформаторов с вращающимся магнитным полем, симметрирования путем ввода добавочных ЭДС, даны их сравнительные характеристики и области применения.
2. Приведены алгоритмы выбора параметров СУ рассмотренных типов.
3. Показаны примеры по выбору параметров СУ некоторых типов.

Лекция 20.

Эксплуатационный контроль ПКЭ. Анализ качества электроэнергии.

Цель лекции: определить задачи анализа КЭ в условиях эксплуатации и в правовой практике и показать пути их решения.

Задачи:

- систематизировать задачи анализа КЭ;
- рассмотреть методику определения фактического вклада в искажение КЭ;
- изучить порядок оценки соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97;
- привести порядок сравнения фактического и допустимого вкладов.

План лекции.

1. Задачи анализа КЭ.
2. Оценка соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97.
3. Измерение фактического вклада в искажение КЭ.
4. Оценка доминирующего влияния. Определение фактического вклада.
5. Порядок сравнения фактического и допустимого вкладов подсистемы.
6. Диагностика системы электроснабжения по качеству электроэнергии.

Краткое содержание лекции.

К задачам анализа качества электроэнергии относятся: оценка соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97, определение фактического вклада каждой подсистемы в точке общего присоединения.

Можно выделить следующие технико-экономические задачи определения фактического вклада:

- ✓ выявление причин несоответствия КЭ установленным требованиям, т.е. потребителей и их электроприемников, влияние которых в точке общего присоединения (ТОП) приводит к ухудшению КЭ;
- ✓ управление режимом работы энергоснабжающей организации и потребителя путем проведения мероприятий, направленных на обеспечение требуемого КЭ;
- ✓ регулирование договорных отношений между энергоснабжающей организацией и потребителем в части влияния сторон на КЭ на границе их раздела.

Перечисленные задачи направлены на обеспечение КЭ, т.е. снижения в электрической сети уровня кондуктивных помех и повышения эффективности производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Задачи технико-экономического анализа КЭ следует решать только в том случае, если выявлено несоответствие КЭ требованиям ГОСТ 13109-97. Оценка соответствия ПКЭ установленным нормативным значениям осуществляется следующим образом.

Минимальный интервал времени измерений ПКЭ, за исключением длительности провала, составляет 24 ч. Оценить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97 можно, представляя ПКЭ случайной величиной, характеризующейся статистической оценкой математического ожидания, дисперсии и законом распределения вероятностей, и используя выражения для определения вероятности попадания возможных значений случайной величины в заданный интервал. Рассмотрим порядок оценки соответствия значений ПКЭ ГОСТ 13109-97 на примере нормального и равномерного распределения, как наиболее распространенных законов распределения ПКЭ в условиях эксплуатации.

1. По результатам измерений определяют математическое ожидание, дисперсию, вид закона распределения вероятностей исследуемого ПКЭ, x .

2. Значения, задаваемые ГОСТ 13109-97 для исследуемого ПКЭ, записывают в виде заданного интервала. При этом будут рассматриваться два интервала: интервал, определенный нормально допустимыми значениями, и интервал, определенный предельно допустимыми значениями.

Например, для коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности интервал, определенный нормально допустимыми значениями, равен:

$$0\% \leq K_{2U} \leq 2\%.$$

Интервал, определенный предельно допустимыми значениями, равен:

$$0\% \leq K_{2U} \leq 4\%.$$

3. Рассчитываются вероятности попадания в интервалы, заданные ГОСТ 13109-97. При нормальном законе распределения:

$$p\left(x_{1H(\Pi)} \leq x \leq x_{2H(\Pi)}\right) = \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_2 - M[x]}{\sigma_x}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x_1 - M[x]}{\sigma_x}\right),$$

где $x_{1H(\Pi)}$ и $x_{2H(\Pi)}$ - границы интервала заданного ГОСТом для исследуемого ПКЭ, при нормально допустимом значении (Н) или при предельно допустимом (П);

$M[x]$, σ_x - соответственно математическое ожидание или его статистическая оценка, среднее квадратичное отклонение или его статистическая оценка исследуемого ПКЭ.

Равномерный закон распределения.

Вначале определяются границы самого закона распределения исследуемого ПКЭ из выражений для математического ожидания и дисперсии:

$$\begin{cases} M_{[x]} = \frac{a + b}{2}, \\ \sigma_x = \frac{b - a}{2\sqrt{3}}. \end{cases}$$

Отсюда

$$a = M_{[x]} - \sqrt{3}\sigma_x,$$

$$b = M_{[x]} + \sqrt{3}\sigma_x.$$

Затем находится вероятность попадания возможных значений ПКЭ в интервалы, заданные ГОСТом при нормально допустимых и предельно допустимых значениях:

$$p\left(x_{1H(\Pi)} \leq x \leq x_{2H(\Pi)}\right) = \frac{x_{2H(\Pi)} - x_{1H(\Pi)}}{b - a},$$

если

$$x_{2H(\Pi)} \leq b,$$

$$x_{1H(\Pi)} \geq a.$$

Если $x_{1H(\Pi)} < a$, то вместо $x_{1H(\Pi)}$ в предыдущее выражение подставляется a , если $x_{2H(\Pi)} > b$, то в предыдущее выражение вместо $x_{2H(\Pi)}$ подставляется b .

4. Найденные вероятности сравниваются с заданными в ГОСТе значениями. Для оценки соответствия исследуемого ПКЭ нормальным допустимым значениям найденная вероятность сравнивается с 0,95: если $p(x_{1H} \leq x \leq x_{2H}) \geq 0,95$ требования ГОСТ выполняется, в противном случае – нет.

Для оценки соответствия исследуемого ПКЭ предельным допустимым значением найденная вероятность попадания возможных значений ПКЭ в интервал, определенный предельно допустимыми значениями сравнивается с 1.

если $P(x_{1П} \leq x \leq x_{2П}) = 1$, требования ГОСТ выполняются, в противном случае – нет.

Примеры по оценке соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97 приведены в [2].

В условиях эксплуатации, как правило, осуществляют контроль КЭ путем измерения его параметров, поэтому целесообразно рассмотреть как определять фактический вклад в искажение КЭ по результатам измерений. Для этого составляется схема замещения сети, состоящая из двух подсистем, включающих свой вклад в искажение КЭ, относительно ТОП. За фактический вклад по напряжению подсистемы 1 принимается напряжение на параллельно соединенных входных сопротивлениях обеих подсистем, создаваемое источником тока ВГ первой подсистемы, а для подсистемы 2 соответственно источником тока ВГ второй подсистемы. Подробно данная методика и пример определения фактического вклада приведен в [5].

Виновник искажения качества электроэнергии определяется путем сравнения фактического и допустимого вкладов каждой подсистемы. Допустимый вклад – это доля нормируемого ГОСТ 13109-97 значения ПКЭ, которую потребителю разрешено вносить в точке его присоединения к системе электроснабжения. Метод расчета допустимого вклада приведен в [5]. Если электроснабжающая организация не указывает в технических условиях или договоре электроснабжения требования к допустимому вкладу, то она должна принять на себя всю ответственность за обеспечение КЭ в соответствии с требованиями ГОСТ.

В целом оценка фактического вклада и степени виновности отдельных подсистем состоит из пяти этапов:

- формирование базы исходных данных по результатам измерения ПКЭ;
- проверка выполнения требований ГОСТ 13109-97;
- оценка доминирующего влияния;
- расчет фактического вклада по напряжению (току, мощности);
- определение виновника ухудшения КЭ.

Их реализация раскрыта в [5 стр. 153-159].

Диагностика системы электроснабжения (СЭС) по качеству электроэнергии осуществляется также на этапе проектирования. При этом оценивается возможность подключения к сети энергоснабжающей организации (ЭСО) нового потребителя с точки зрения его влияния на качество электроэнергии в сети.

Диагностика СЭС проводится в три этапа:

- 1) оценка допустимых вкладов объектов, присоединенных в точке общего присоединения (ТОП);
- 2) определение ожидаемого вклада в ТОП и сравнение его с допустимым для выработки решений по ограничению влияния создаваемых электроустановкой помех еще на этапе проектирования;
- 3) проведение измерений до и после присоединения электроустановки для оценки его фактического влияния на уровень кондуктивных помех в точке общего присоединения.

Выводы.

1. Сформулированы задачи анализа КЭ и показана их реализация в условиях эксплуатации.
2. Дана методика оценки соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97.
3. Приведены методики определения фактического вклада, допустимого вклада в искажения КЭ в ТОП.
4. Показана сущность диагностики КЭ в системах электроснабжения.

Лекция 21. *Оптимизация КЭ.*

Цель лекции: поставить математическую задачу оптимизации параметров КЭ и показать пути ее решения методами линейного и нелинейного программирования.

Задачи:

- определить критерии оптимальности и целевую функцию, систему ограничений;
- рассмотреть методику оптимизации КЭ на примере отключений напряжений;
- рассмотреть оптимизацию несинусоидальности режимов напряжения.
-

План лекции.

1. Постановка задачи оптимизации параметров КЭ.
2. Применение метода «оптимума номинала» для решения задач оптимизации отключений напряжений.
3. Формулировка задач оптимизации несинусоидальных режимов напряжения.
4. Алгоритмы определения оптимальных параметров фильтрокомпенсирующих устройств.

Краткое содержание лекции.

Условия оптимальности КЭ заключается в обеспечении минимума функции среднегодовых затрат при выполнении ограничений, устанавливаемых на основании технических требований.

При таком подходе в наиболее полной мере учитывается экономическая сущность задачи оптимизации КЭ. Постановка задачи оптимизации возможна в двух основных аспектах:

оптимизация выбора технических средств и их параметров для обеспечения требуемых значений ПКЭ;

оптимизация ПКЭ в процессе эксплуатации СЭС предприятий (решение этой задачи возможно, очевидно, при наличии регулируемых технических средств). Возможно сочетание обеих задач.

В общем виде постановка задачи оптимизации ПКЭ (в отдельности и совокупности) с математической точки зрения заключается в минимизации функции $Z(\bar{P})$ при наличии ограничений:

$$\bar{f}_{\min}(\bar{P}) \leq \bar{f}(\bar{P}) \leq \bar{f}_{\max}(\bar{P}),$$

$$\bar{P}_{\min} \leq \bar{P} \leq \bar{P}_{\max}$$

здесь $Z(\bar{P})$ - функция приведенных затрат k -мерного вектора \bar{P} , характеризующего оптимальные параметры $P_1, \dots, P_i, \dots, P_k, (i = 1, 2, \dots, k)$

Функция $Z(\bar{P})$ представляется выражением

$$Z(\bar{P}) = EK(\bar{P}) + I(\bar{P}) + Y(\bar{P}),$$

где E - ставка дисконтирования; $K(\bar{P})$ - капитальные затраты на средства улучшения качества напряжения; $I(\bar{P})$ - ежегодные эксплуатационные издержки; $Y(\bar{P})$ - ежегодный экономический ущерб, обусловленный некачественным напряжением.

В процессе составления целевой функции ряд ограничений может быть включен в ее состав или, наоборот, часть целевой функции может быть записана в виде ограничений.

Ранее считалось, что номинальное напряжение на зажимах ЭП является оптимальным. Однако, это априорное решение является справедливым лишь при одновременном выполнении следующих условий:

а) симметричного (по отношению к номинальному напряжению) закона распределения отношений напряжения (ОН);

б) постоянной по значению или симметричной относительно номинального напряжения зависимости ущерба от ОН.

В целом номинальное напряжение не всегда является оптимальным, и в процессе расчетов необходимо определять для каждого ЭП сдвиг напряжения относительно номинального значения, при котором работа ЭП и участка сети, питающего его, с учетом средств регулирования напряжения будет наиболее экономичной.

Анализ методов решения задачи оптимизации ОН показал, что одним из наиболее эффективных является метод «оптимума номинала». Метод «оптимума номинала» позволяет для любого известного закона распределения ОН и заданной функции ущерба определить такое напряжение на зажимах ЭП, которое дает наибольшее значение математического ожидания экономического эффекта.

Выражение эффективности по методу «оптимума номинала» представляет собой известную интерпретацию выражение приведенных затрат в вероятностной постановке задачи, включающих приведенные капитальные затраты.

Задача оптимизации заключается в установлении таких значений моментов распределения $\mu_{l_0}, \dots, \mu_{k_0}, \dots, \mu_{n_0}$, которые обеспечивали бы минимум функции $\varphi(\mu_l, \dots, \mu_k, \dots, \mu_n)$.

Минимальное значение ущерба и оптимальный сдвиг ΔU_0 определяются из решения уравнения

$$\frac{\partial Y}{\partial(\Delta U_0)} = \frac{\partial}{\partial(\Delta U_0)} \left[\sum_{i=1}^m \int_{\Delta U_{i_n} + \Delta U_0}^{\Delta U_{i_k} + \Delta U_0} f(\Delta U) d\Delta U \right] = 0$$

или

$$\sum_{i=1}^m Y_i \left[f(\Delta U_{i_k} + \Delta U_0) - f(\Delta U_{i_n} + \Delta U_0) \right] = 0$$

Таким образом, при нормальном законе распределения ОН получится трансцендентное уравнение вида

$$\sum_{i=1}^m Y_i \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_{i_k} + \Delta U_0 - m}{\sigma} \right)^2 \right] - \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta U_{i_n} + \Delta U_0 - m}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} = 0$$

Подставив в это выражение значения Y_i, U_{i_n}, U_{i_k} при известных m и σ , получаем уравнение, решение которого дает оптимальное значение ΔU_0 , т.е. оптимальное напряжение на зажимах одного ЭП или группы электроприемников (например, для осветительных сетей).

Функция экономического ущерба, обусловленного несинусоидальностью напряжения, в удобной для проведения оптимизационных расчетов форме при детерминированном представлении параметров может быть записана в виде

$$Y_{\Sigma} = \sum_{v=2}^n a_v U_v^2 + Y_v^{(T)} + Y_v^{(Q)},$$

где a_v - коэффициенты, получаемые в результате преобразования выражений электромагнитной составляющей ущерба и зависящие от номера гармоники напряжения v , состава, количества и режимов работы электрооборудования; n - число учитываемых ВГ; $Y_v^{(T)} = f(I_v)$ - составляющая ущерба, обусловленная сбоями СИФУ преобразователей,

вызванными проникновением в их цепи гармоники тока I_v ; $Y_v^{(Q)} = f\left(\sqrt{\sum_{v=1}^n I_{vBK}^2}\right)$ -

составляющая ущерба, обусловленная невозможностью RHV с помощью БК вследствие перегрузки их ВГ тока.

При установке ARE добиваются снижения электромагнитной составляющей ущерба, а также полного устранения технологической составляющей $Y_v^{(T)}$ и составляющей, обусловленной невозможностью RHV с помощью БК $Y_v^{(Q)} = f\left(\sqrt{\sum_{v=1}^n I_{vBK}^2}\right)$. В этом случае

функция остаточного ущерба $Y_{v\Sigma_{ост}}$ записывается следующим образом:

$$Y_{v\Sigma_{ост}} = \sum_{v=2}^n a_v \left[U_{v*} \left(1 - \sigma_{v\eta\Sigma} \right) \right]^2,$$

где U_{v*} - относительные значения напряжения v -той гармоники до установки ФКУ;

$\sigma_{v\eta\Sigma}$ - суммарная величина долей токов $v_{qi} - xBG$ в узле сети, потребляемых фильтрами, настроенными на частоты ВГ порядков $v_{pi} (i = 1, 2, \dots, m)$, отдельно стоящими БК.

Установка преобразователей с повышенной пульсностью выпрямления, а также с улучшенными характеристиками не предопределяет обязательного устранения ущербов $Y_v^{(T)}$ и $Y_v^{(Q)}$, поэтому в общем виде для этих случаев остаточный ущерб определяется при новых значениях ВГ напряжения U'_{v*} и ВГ тока I'_v :

$$Y'_{v\Sigma_{ост}} = \sum_{v=2}^n a_v (U'_{v*})^2 + Y_v'^{(T)} + Y_v'^{(Q)}$$

Задача сводится к построению математической модели целевой функции, оптимальные параметры которой соответствуют ее номинальному значению в области наложенных ограничений. В качестве основного критерия оптимальности принимаемых решений в настоящее время выбирается минимум приведенных затрат, хотя в частных случаях возможен выбор и других критериев.

При выборе оптимальных параметров одного ФКУ и отдельно стоящей БК задача оптимизации формулируется следующим образом.

$$\text{Минимизировать } Z = E_p K_p + E_{BK} K_{BK} + Y_{v\Sigma_{ост}} + Y_{v_{ост}}^{(Q)}.$$

Здесь E_p и E_{BK} - суммарные коэффициенты отчислений от капитальных затрат K_p и K_{BK} соответственно на реакторы фильтра и БК;

$Y_{v_{ост}}^{(Q)}$ - штраф ЭС при недокомпенсации РМ в периоды максимума (это возможно при $Q_p \ll Q_{D\Sigma}$, $Q_{BK} = 0$, что приведет к $tg \varphi < tg \varphi_{норм}$) и стоимость потерь электроэнергии в сети при установке конденсаторов мощностью $(Q_p - Q_{BK})$.

Минимум среднегодовых затрат находится методами двухпараметрического нелинейного программирования.

При установке двух и более ФКУ в целевую функцию включаются суммарные затраты на ФКУ и остаточный ущерб. Установка двух и более ФКУ требует по возможности точной настройки их на частоты минимизируемых ВГ напряжения. Вследствие этого изменяется порядок расчета и запись ограничений при проведении оптимизационных расчетов. Задача заключается в распределении мощности БК, определяемой дефицитом РМ, таким образом, чтобы минимизировать функцию среднегодовых затрат.

Отыскание минимума осуществляется методами двух- и более параметрического нелинейного программирования.

Алгоритм выбора оптимальных параметров одного звена ФКУ
и отдельно стоящей БК.

1. На основании условия устанавливаются интервалы квантования значений сопротивления реакторов (от $x_{p\min}$ до $x_{p\max}$) и мощности БК ФКУ (от 0 до $Q_{D\Sigma}$).

2. Для первого значения $x_p^{(1)}$ и первого значения $Q_p^{(1)}$ (не считая нулевого значения) рассчитываются $\sigma_{v_q}^{(\phi)}$.

3. По выражению рассчитывается $Q_{p\min}^{(1)}$ и сравнивается с $Q_p^{(1)}$. Если $Q_{p\min}^{(1)} > Q_p^{(1)}$, то принимается $Q_p = Q_p^{(2)}$ и осуществляется возврат к шагу 2. В противном случае и при $Q_{p\min}^{(1)} = Q_p^{(1)}$ осуществляется переход к шагу 4.

4. Рассчитываются $Q_{БК}^{(1)} = Q_{D\Sigma} - Q_p^{(1)}$ и $\sigma_{v_q}^{(\sigma)}$.

5. Осуществляется проверка по выражению. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 2, а если выполняется, то переход к шагу 6.

6. Рассчитываются $U_{v\text{ост}^*}$ и осуществляется проверка по условию. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 2, если выполняется, то переход к шагу 7.

7. Осуществляется проверка по условию. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход к шагу 9, если выполняется, то переход к шагу 8.

8. Осуществляется проверка по выражению. Если соответствующее условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 9, если не выполняется, то осуществляется переход к шагу 11.

9. Осуществляется проверка по выражению. Если это условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 10, если не выполняется, то переход к шагу 11.

10. Рассчитывается и выводится на печать величина

$$Z^{(k)} = E_{БК} K(Q_{D\Sigma}^{(k)}) + E_p K(x_p^{(k)}) + Y_{v\text{ост}}^{(k)} (U_{v\text{ост}^*}^{(k)}) + C_{\Delta\Delta}^{(k)},$$

где $C_{\Delta\Delta}^{(k)}$ — стоимость потерь ЭЭ.

11. Рассчитываются штрафы за дефицит компенсирующей мощности БК $\Pi_{БК}^{(k)}$ и невозможность регулирования напряжения с помощью БК $\Pi_{\Delta U}^{(k)}$, тогда

$$Z^{(k)} = E_{БК} K(Q_p^{(k)}) + E_p K(x_p^{(k)}) + Y_{v\text{ост}}^{(k)} (U_{v\text{ост}^*}^{(k)}) + C_{\Delta\Delta}^{(k)} + \Pi_{БК}^{(k)} (Q_{БК}^{(k)}) + \Pi_{\Delta U}^{(k)}.$$

12. Переход к шагу 2 при $Q_p = Q_p^{(k+1)}$ и $x_p = x_p^{(k+1)}$ - цикл.

13. Останов при окончании перебора всех $Q_p^{(k)}$ и. Если на каком—либо шаге одно из ограничений не выполняется ни при одном значении $Q_p^{(k)}$ и $x_p^{(k)}$, то принимаются решения,

направленные на устранение этих явлений. Например, при невыполнении условия (5.37) или (5.38) принимается решение о необходимости установки большего числа звеньев при невыполнении условия (5.41) — о необходимости изменения схемы или номинального напряжения конденсаторов ФКУ, либо напряжения на шинах узла, где устанавливается ФКУ. После принятия этих решений расчет повторяют или переходят к следующему алгоритму.

В заключение приведем результаты обобщения решений оптимизационных задач. Параметры ФКУ и отдельно стоящей БК в рассматриваемых случаях, как правило, оказываются близкими к оптимальным, т.е. обеспечивают минимум приведенных затрат при выполнении всех ограничений, наложенных по техническим условиям.

Возможны случаи ошибок в априорном принятии решения об установке одного ФКУ, если не производится анализ функции ущерба. Это объясняется тем, что возможны случаи, когда в функции электромагнитной составляющей ущерба преобладает слагаемое, обусловленное увеличением числа однофазных замыканий на землю и вероятностью перехода однофазных замыканий на землю в многофазные (пропорционально величине $\sum_{\nu=2}^n \nu U_{\nu*}^2$). При этих условиях может оказаться целесообразной установка двух ФКУ.

Установка двух и более ФКУ предопределяет необходимость точной настройки на частоты ВГ, имеющих в амплитудном спектре напряжения. Поэтому выбор оптимальных параметров заключается в определении мощностей БК, включаемых в ФКУ; сопротивления реакторов рассчитываются из условия точной настройки ФКУ.

Приводится обобщение по курсу в целом.

Выводы.

1. Показана целесообразность оптимизации параметров КЭ.
2. Приведены целевые функции для общей и частных задач оптимизации КЭ.
3. Показано решение задачи оптимизации отклонений напряжения.
4. Показано как оптимизируются несинусоидальные режимы по напряжению.
5. Дано заключение по курсу в целом.

3. Практические занятия, их содержание и объем в часах

3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий

Практические занятия проводятся для того, чтобы студент получил навыки в решении вопросов качества электроэнергии, которые возникают в эксплуатации и проектной практике, а также для закрепления теоретического материала, изученного на лекциях. В результате студенты должны научиться и анализировать показатели качества электроэнергии в сетях энергосистем и системах электроснабжения, уметь правильно выбирать схемные решения и технические средства по улучшению качества электроэнергии.

Согласно учебных планов, предусмотрено семь практических занятий (ПЗ), перечень которых приведен ниже.

ПЗ №1. Эксплуатационный контроль ПКЭ, определение соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 13109-97.

ПЗ №2. Расчет отклонения напряжения в распределительных сетях предприятий и энергосистем. Расчет колебаний напряжения.

ПЗ №3. Расчет несинусоидальных и несимметричных режимов.

ПЗ №4. Регулирование напряжения в электрических сетях. Выбор добавок напряжения при различных средствах регулирования.

ПЗ №5. Выбор параметров технических средств по снижению несинусоидальности напряжения в электрических сетях.

ПЗ №6. Выбор параметров технических средств по снижению несимметрии напряжения в электрических сетях.

ПЗ №7. Снижение колебаний напряжения в электрических сетях.

В процессе обучения студенты осваивают методы расчета и средства автоматизации инженерных расчетов. Практические занятия проводятся с привлечением программных комплексов MathCad, SDO-6, RASTR. На занятиях используются результаты измерений ПКЭ, полученные с помощью ИВК «Омск», ИВК «Ресурс» в сетях Амурской энергосистемы и на заводе ОАО «Амурметалл» (г. Комсомольск-на-Амуре).

Практические занятия рекомендуется проводить согласно следующего плана.

План проведения практического занятия.

1. Цель занятия.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Блиц-опрос студентов.
4. Решение задач.
5. Анализ качества выполнения индивидуальных домашних заданий и разбор типовых ошибок.
6. Выводы и обобщение результатов.
7. Домашнее задание и задание на самостоятельную проработку.

На первом занятии целесообразно устроить входной контроль, на последнем – комплексную проверку качества знаний студентов.

При изложении кратких теоретических сведений рекомендуется систематизировать и обобщить материал, выделив при этом главные моменты. В процессе изложения материала целесообразно вовлекать студентов в его анализ, активизировать процесс мышления студентов за счет средств интенсивного обучения.

Блиц-опрос студентов или небольшая самостоятельная работа по теме практического занятия позволят лучше усвоить ход решения задач, понять их сущность.

При решении задач можно использовать разные формы. Например, преподаватель, решая задачу на доске, поясняет ее и привлекает к работе всю группу путем вопросов, постоянно подводя студентов к правильному решению.

Другая форма решения задач - самостоятельная работа студентов под контролем преподавателя с пояснением наиболее трудных моментов. Возможно решение задачи на доске студентом, но в этом случае преподаватель руководит процессом решения и вовлекает в работу всю группу.

Как правило, защита индивидуальных домашних заданий должна проводиться во внеаудиторное время, а на практическом занятии следует показать типовые ошибки, проанализировать результаты выполнения и защиты индивидуальных заданий, отметить лучшие и худшие из них, предложить студентам в виде деловой игры принять решение по устранению замечаний.

В конце практического занятия преподаватель называет тему следующего, указывает разделы теоретического материала, которые студент должен освоить для наиболее эффективного решения задач, выдает домашнее задание.

В процессе проведения практических занятий используются классические и современные педагогические технологии.

3.2. Методические указания по проведению практических занятий

Практическое занятие № 1.

«Эксплуатационный контроль ПКЭ. Определение соответствия показателям качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97».

Цель: научиться анализировать ПКЭ и определять их соответствие требованиям ГОСТ 1310997.

При подготовке по теме практического занятия используется теоретический материал, изложенный в [1, стр. 20-37; 44-66; 2, стр. 189-192; 5, стр. 129-130].

Примеры решения типовых задач.

Пример 1. Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97, если в точке общего присоединения (ТОП) оценка математического ожидания коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности $\bar{K}_{2U} = 1\%$, среднего квадратического напряжения $\bar{\sigma}_{K_{2U}} = 1\%$ при нормальном законе распределения вероятностей.

Согласно ГОСТ нормируемое нормально допустимое значение $K_{2UH} = 2\%$, а предельно допустимое значение $K_{2UII} = 4\%$.

Определим интервалы, заданные ГОСТом, для нормально допустимых значений и предельно допустимых значений:

$$0 \leq K_{2U} \leq 2; \quad 0 \leq K_2 \leq 4.$$

Найдем вероятности попадания возможных значений исследуемого ПКЭ – K_{2U} в интервалы, заданные ГОСТ:

$$\begin{aligned}
 p(0 \leq K_{2U} \leq 2) &= \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{2 - \bar{K}_{2U}}{\sigma_{K_{2U}}}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{0 - \bar{K}_{2U}}{\sigma_{K_{2U}}}\right) = \\
 &= \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{2-1}{1}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{0-1}{1}\right) = \frac{1}{2} \Phi(1) + \frac{1}{2} \Phi(1) = \Phi(1) = 0,68,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p(0 \leq K_{2U} \leq 4) &= \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{4-1}{1}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{0-1}{1}\right) = \frac{1}{2} \Phi(4) - \frac{1}{2} \Phi(-1) = \\
 &= \frac{1}{2} \Phi(4) + \frac{1}{2} \Phi(1) = \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 0,68 = 0,84.
 \end{aligned}$$

Сравним найденные вероятности с вероятностями, определенными в ГОСТ и сделаем вывод об их соответствии

$$p(0 \leq K_{2U} \leq 2) = 0,68 < 0,95.$$

Следовательно, требования ГОСТ 13109-97 по нормально допустимым значениям не выполняются.

$$p(0 \leq K_{2U} \leq 4) = 0,84 < 1.$$

Следовательно, требования ГОСТ 13109-97 по предельно допустимым значениям не выполняются. Необходимо принять меры по поддержанию требуемого качества электроэнергии.

Пример. Произвести оценку качества электроэнергии на шинах ГПП с $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ по установившемуся отклонению напряжения, если в результате измерения оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения напряжения на шинах соответственно равны

$$M[U] = 10,2 \text{ кВ}, \sigma_U = 0,2 \text{ кВ},$$

а закон распределения вероятностей равномерный.

Определяем интервалы, заданные ГОСТ 13109-97:

для нормально допустимых значений $-5\% \leq \delta U_y \leq 5\%$;

для предельно допустимых значений $-10\% \leq \delta U_y \leq 10\%$.

Переведем границы интервалов, заданных ГОСТом, в именованные единицы и выразим их через напряжения:

нормально допустимые значения $9,5 \leq U \leq 10,5 \text{ (кВ)}$;

предельно допустимые значения $9 \leq U \leq 11 \text{ (кВ)}$.

Определим границы самого закона распределения случайной величины – напряжения на шинах ГПП, зная математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение:

$$a = M[U] - \sqrt{3}\sigma_U; \quad b = M[U] + \sqrt{3}\sigma_U;$$

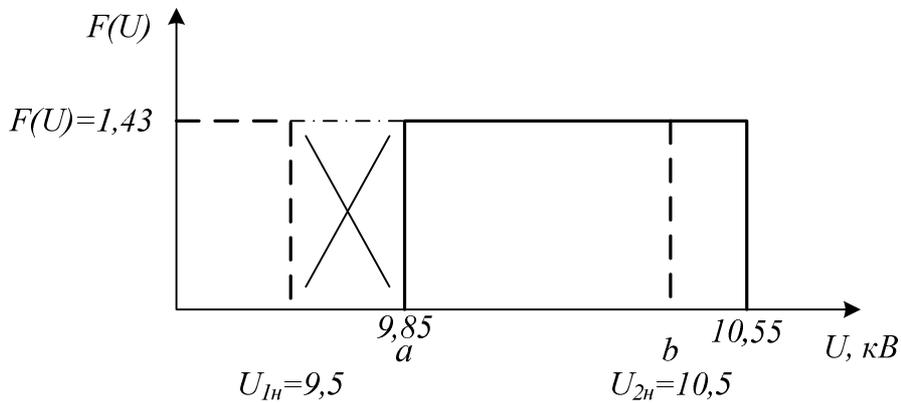
$$a = 10,2 - \sqrt{3} \cdot 0,2 = 9,85 \text{ кВ}; \quad b = 10,2 + \sqrt{3} \cdot 0,2 = 10,55 \text{ кВ};$$

$$f_{(U)} = \frac{1}{b-a} = \frac{1}{10,55 - 9,85} = 1,43 \frac{1}{\text{кВ}}.$$

Определим вероятности попадания возможных значений напряжения в интервалы, заданные ГОСТом.

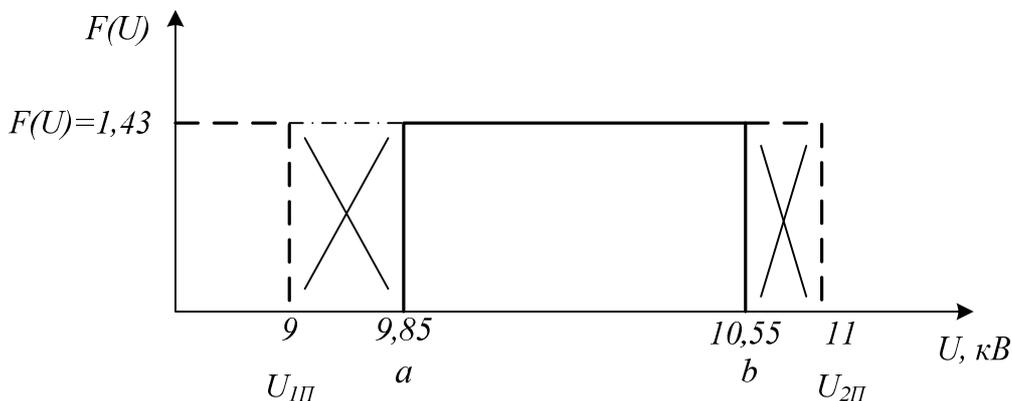
Для большей наглядности покажем это графически.

Для нормально допустимых значений



$$p(9,5 \leq U \leq 10,5) = \frac{U_{2н} - U_{1н}}{b - a} = \frac{10,5 - 9,85}{10,55 - 9,85} = 0,93.$$

Для предельно допустимых значений



$$p(9 \leq U \leq 11) = \frac{b - a}{b - a} = 1.$$

Сравниваем найденные вероятности со значениями вероятностей, заданными в ГОСТе:

$$p(9,5 \leq U \leq 10,5) = 0,93 < 0,95.$$

Следовательно, требования ГОСТ 13109-97 нормально допустимым значением не выполняются.

$$p(9 \leq U \leq 11) = 1 = 1.$$

Следовательно, требования ГОСТ 13109-97 по предельно допустимым значениям выполняются.

Контрольные вопросы.

1. Что такое ТОП?
2. Задачи эксплуатационного контроля.
3. Какие показатели КЭ используют для количественного описания свойств качества электроэнергии?
4. Что входит в анализ результатов измерения ПКЭ?
5. Как нормируются ПКЭ?
6. Порядок оценки соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 13109-97.
7. Периодичность контроля ПКЭ.
8. Допустимая погрешность измерения ПКЭ.

Практическое занятие № 2.

«Расчет отклонений напряжений в распределительных сетях предприятий и энергосистем.

Расчет колебаний напряжения».

Цель: получить навыки и умения при расчете установившегося отклонения напряжения, размахов измерения напряжения.

При подготовке по теме практического занятия используется теоретический материал в [1, стр. 67-86; 3, стр. 59-63; 84-95].

Примеры решения задач.

Пример 1.

На ГПП установлен СТ ТДН-10000/10 ($r_T=7,95$ Ом; $x_T=1390$ Ом), который питается по ЛЭП 110 кВ ($r_{ЛЭП}=39$ Ом, $x_{ЛЭП}=25,2$ Ом). Напряжение в начале ЛЭП при max нагрузке равно $U_{ном}$. От ГПП питается кабелем $U=10$ кВ ($r_{КЛ}=1,34$ Ом; $x_{КЛ}=0,14$ Ом). Трансформатор ТП ($r_T=1,22$ Ом; $x_T=5,35$ Ом). В режиме max нагрузки через СТ передаются следующие мощности:

ГПП: $P_{max}=7120$ кВт;

$Q_{max}=2350$ квар;

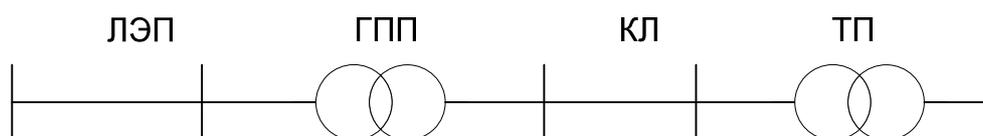
ТП: $P'_{max}=760$ кВт;

$Q'_{max}=250$ квар;

Определить δU .

Решение.

Потери U в ЛЭП :



или в %:

$$\Delta U_{ЛЭП\%} = \frac{\Delta U_{ЛЭП}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{307}{110} \cdot 100 = 2,79\%.$$

Потери U в СТ ГПП :

$$\Delta U_{ГПП} = \frac{P_{max} r_T + Q_{max} x_T}{U_n} = \frac{7120 \cdot 7,95 + 2350 \cdot 139}{110} = 3470 B$$

$$\Delta U_{ГПП\%} = \frac{3,470}{110} \cdot 100 = 3,15\%.$$

Потери U в КЛ:

$$\Delta U_{КЛ} = \frac{P'_{max} r_{КЛ} + Q'_{max} x_{КЛ}}{U_n} = \frac{760 \cdot 1,34 + 250 \cdot 0,14}{10} = 105 B$$

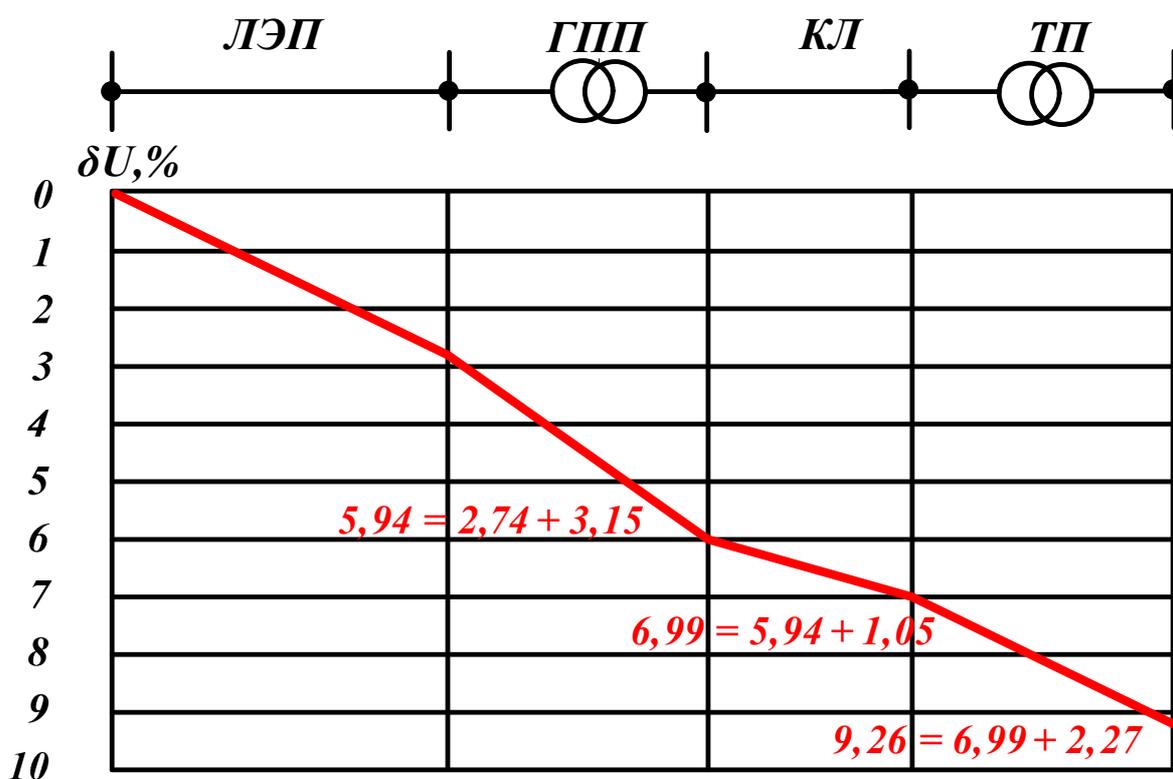
$$\Delta U_{КЛ\%} = \frac{0,105}{10} \cdot 100 = 1,05\%.$$

Потери U в ТП:

$$\Delta U_{ТП} = \frac{P'_{\max} r_{ТП} + Q'_{\max} x_{ТП}}{U_n} = \frac{760 \cdot 1,22 + 250 \cdot 5,35}{10} = 226,6B$$

$$\Delta U_{ТП\%} = \frac{0,2266}{10} \cdot 100 = 2,27\%$$

$$\delta U = U_{ин} - \Delta U_{ЛЭП} - \Delta U_{ГПП} - \Delta U_{КЛ} - \Delta U_{ТП} = 0 - 2,79 - 3,15 - 1,05 - 2,27 = -9,26\%$$



Контрольные вопросы.

1. Какова цель расчета отклонений напряжения?
2. Что понимается под характерными точками и режимами при расчете отклонений напряжения?
3. Как определить δU_y на зажимах электроприемника?
4. Как рассчитать предельно допустимые отклонения напряжения на шинах центра питания?
5. Что такое эквивалентный размах изменения напряжения и как его определить.
6. Как рассчитать размахи изменения напряжения при работе ДСП?
7. Как определить размах изменения напряжения в сети с электрифицированным железнодорожным транспортом, прокатными станами?
8. Как оценить колебания напряжения при работе сварки?
9. Как рассчитать размахи изменения напряжения при пуске двигателей?

Пример 2.

Рассчитать размахи изменения U в сети блюминга $1150 S_{кз} = 300$ МВА. Продолжительность цикла $T_{ц} = 30$ с. Число набросов Q за один цикл $n = 30$. Суммарная величина размахов δU_t в квадрате $\sum (\delta Q_i)^2 = 1800 \text{ Мвар}^2$.

Решение.

1. Эквивалентный размах изменения напряжения

$$\delta U_{t_{эк}} = \frac{1}{S_{кз}} \sqrt{\frac{\sum (\delta Q_i)^2}{n}} = \frac{1}{300} \sqrt{\frac{1800}{30}} = 2.58\%$$

2. Средняя частота колебаний

$$f_{ср} = \frac{n}{T_{ц}} = \frac{30}{30} = 1 \text{ 1/с} = \frac{1}{60} \text{ 1/мин}$$

3. Определим по ГОСТ 13109-97 $\delta U_{t_{доп}}$.

$$\delta U_{t_{доп}} = 1,75\%$$

$$2,58\% > 1,75\%$$

Следовательно, требования ГОСТ не выполняются.

Пример 3.

К ШРА с сопротивлением $r=0,021$ Ом; $x=0,0145$ Ом подключены 9 машин стыковой сварки типов МТН-40; МТН-75 и МТН-100, распределенных следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{AB } 2 \times 100 &= 200 \text{ кВА} \\ \text{BC } 2 \times 75 &= 1 \times 40 = 190 \\ \text{CA } 1 \times 75 + 3 \times 40 &= 195 \end{aligned}$$

Определить допустимость колебаний U на стороне 0,4 кВ СТ, к которому подключен этот ШП при $n \text{ Вр}_{ср} = 0,05$. Число свариваемых изделий $N = 360 \text{ 1/ч}$.

$$K_3 = 1 \cos \phi = 0.8.$$

Решение.

1. Находим число одновременно работающих машин по кривым рис. 27 (ПКЭ Жежеленко старая): $m_{AB} = 2$; $m_{BC} = 2$; $m_{CA} = 2$.

2. Пиковая мощность будет наибольшей при учете 2-х машин в фазах АВ и ВС. Их мощности соответственно равны:

$$2 \times 100 = 200 \text{ кВА}; 2 \times 75 = 150 \text{ кВА}$$

Пиковая нагрузка линейного провода.

$$S_{nB} = \sqrt{S_{n(AB)}^2 + S_{n(BC)}^2 + S_{n(AB)} S_{n(BC)}} = \sqrt{200^2 + 150^2 + 200 \cdot 150} = 304 \text{ кВА}.$$

3. Значения размаха напряжения U

$$\delta U_t = \frac{U_3 S_{пик}}{U_{ном}^2} (r \cos \phi + x \sin \phi) = \frac{U_3 \cdot 304}{0.38^2} (0.021 \cdot 0.8 + 0.0145 \cdot 0.6) = 9.3\%$$

4. Средняя частота включения

$$\lambda_{cp} = \frac{N_1 + N_2 + n}{3600n},$$

где n - число машин,
 N – число включений в час.

$$\lambda_{cp} = \frac{360}{3600} = 0,1c^{-1}.$$

4. Средняя длительность расчетного пика

$$5. t_{cp} = \frac{k_B k_0}{\lambda_{cp} [mk_0 + (n - m) \cdot k_B]} = \frac{0.05 \cdot 0.95}{0.1 [4 \cdot 0.95 + (5 - 4) \cdot 0.05]} = 0.129c$$

$k_B = PB_{\phi cp}$ - число рабочих машин и общее число машин берется по рассмотренным параметрам фаз АВ, ВС.

6. Число пиков в мин.

$$\gamma = \frac{0,36}{t_m} = \frac{0.36}{0.123} = 2.9 \text{ в мин } 0,048 \text{ } 1/\text{мин}.$$

7. Допустимое значение δU_t по кривым ГОСТ люминисцентные лампы

$\delta U_t = 5\%$ недопустимо, т.к. $9,3 > 5\%$.

Практическое занятие № 3.

«Расчет несинусоидальных и несимметричных режимов».

Цель: освоить методику инженерного расчета несинусоидальных и несимметричных режимов.

При подготовке по теме практического занятия используется теоретический материал, изложенный в [1, стр. 87-99, 103-104, 105-109; 2, стр. 64-83].

Примеры решения задач.

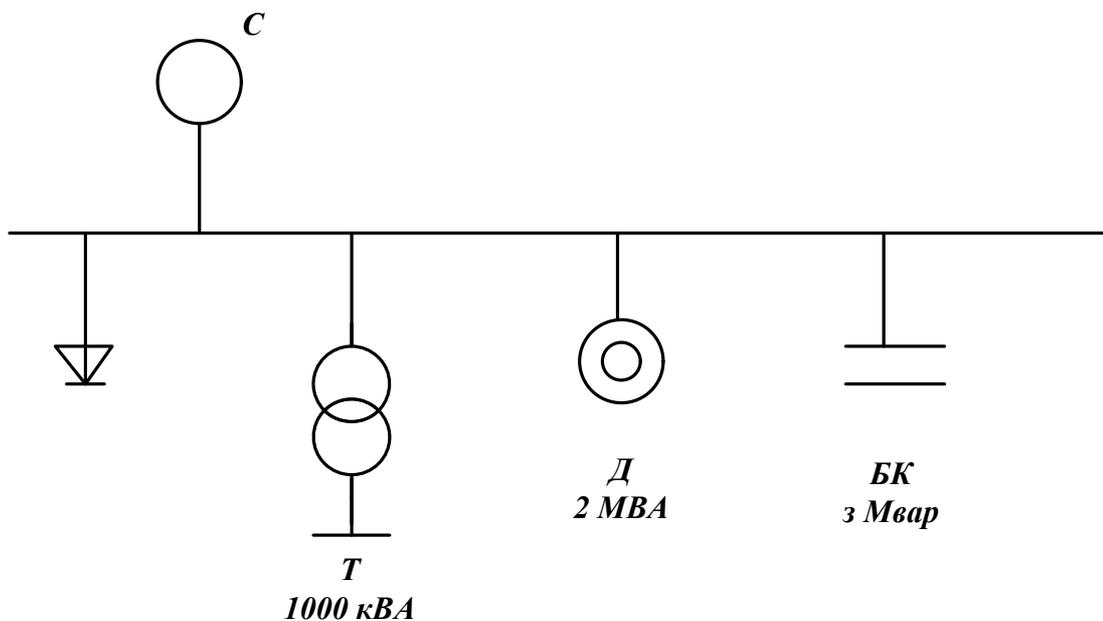
Пример 1.

Определить напряжения гармоник и K_U на шинах ПС 6 кВ, к которой подключен ВП при включении и отключении БК.

Исходные данные.

$$I_5 = 108A \quad I_{11} = 42A \quad S_{кз} = 130MVA$$

$$I_7 = 75A \quad I_{13} = 24A$$



Проверить возможность возникновения резонанса и загрузку БК токами ВГ.

Решение.

$$I_{\text{номБК}} = \frac{Q}{\sqrt{3}U_n} = 288,68 \text{ A}.$$

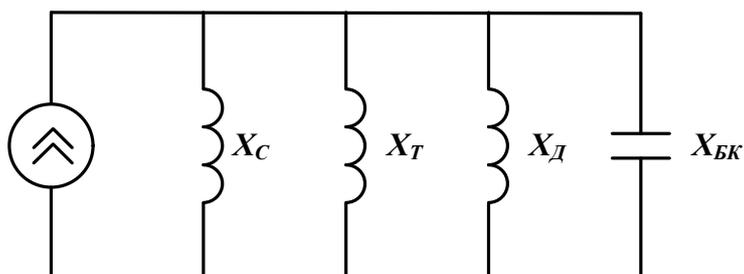


Схема замещения.

1. Определяем сопротивления всех элементов схемы замещения.

$$x_{c_n} = \frac{U^2}{S_{кз}} n = \frac{36}{130} n = 0,28n \text{ Ом}$$

$$x_{ТН_n} = \frac{12}{S_{ном}} n = \frac{12}{1} n = 12n \text{ Ом}$$

$$x_{D_n} = \frac{6}{S_{ном}} n = \frac{6}{2} n = 3n \text{ Ом}$$

$$x_{БК_n} = \frac{40}{S_{БК} \cdot n} = \frac{40}{3 \cdot n} = \frac{13,3}{n} \text{ Ом}$$

2. БК отключена. Эквивалентное сопротивление сети

$$x_{\Sigma_n} = \frac{x_{c_n} \frac{x_{y_n} x_{TH_n}}{x_{\partial_n} + x_{T_n}}}{x_{c_n} + \frac{x_{\partial_n} x_{T_n}}{x_{\partial_n} + x_{T_n}}} = \frac{0,28 \frac{3_n \cdot 12_n}{3_n + 12_n}}{0,28 + \frac{3_n \cdot 12_n}{3_n + 12_n}} = 0,25_n \text{ Ом}$$

Напряжения гармоник

$$U_5 = I_5 X_5 = 108 \cdot 5 \cdot 0,25 = 135 \text{ В}$$

$$U_7 = I_7 X_7 = 75 \cdot 7 \cdot 0,25 = 131,25 \text{ В}$$

$$U_{11} = 42 \cdot 11 \cdot 0,25 = 115,5 \text{ В}$$

$$U_{13} = 24 \cdot 13 \cdot 0,25 = 78 \text{ В}$$

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_2^n U_n^2}}{U_H} = \frac{\sqrt{135^2 + 131,25^2 + 115,5^2 + 78^2}}{6000} = 3,9\%$$

Требования ГОСТ не нарушены.

3. БК включена. Эквивалентное сопротивление сети

$$x_{\Sigma_n} = \frac{x_3 n \frac{x_{БК}}{n}}{\frac{x_{БК}}{n} - x_3 n} = \frac{x_3 x_{БК}}{x_{5к} - x_3 \cdot n^2} n = \frac{0,25 \cdot 13,3n}{13,3 - 0,25n^2} = \frac{3,325n}{13,3 - 0,25n^2}$$

$$x_5 = \frac{3,325 \cdot 5}{13,3 - 0,25 \cdot 5^2} = 2,36 \text{ Ом}$$

$$x_7 = \frac{3,325 \cdot 7}{13,3 - 0,25 \cdot 7^2} = 22,17 \text{ Ом}$$

$$x_{11} = \frac{3,325 \cdot 11}{13,3 - 0,25 \cdot 11^2} = 2,16 \text{ Ом}$$

$$x_{13} = -1,49 \text{ Ом}$$

$$U_5 = I_5 x_5 = 108 \cdot 2,36 = 254,88 \text{ В}$$

$$U_7 = 75 \cdot 22,17 = 1662,75 \text{ В}$$

$$U_{11} = -42 \cdot 2,16 = -90,72 \text{ В}$$

$$U_{13} = -24 \cdot 1,49 = -35,76 \text{ В}$$

$$K_U = \frac{\sqrt{254,88^2 + 1662,75^2 + 90,72^2 + 35,76^2}}{6000} = 28,08\%$$

Нарушения требований ГОСТ 13109-97.

4. Определим номер ВГ, на который возможен резонанс токов.

$$n = \sqrt{\frac{x_{БК}}{x_3}} = \sqrt{\frac{13,3}{0,25}} = 7,3$$

5. Определим кратность тока через БК.

$$K_{B_n} = \frac{x_{\mathcal{O}_n \Sigma}}{x_{\mathcal{O}_n \Sigma} - x_{BK B_n}}; K_{BK} = \frac{x_{\mathcal{O}_n}}{x_{\mathcal{O}_n} - \frac{x_{BK}}{n}} = \frac{x_{\mathcal{O}} n^2}{x_{\mathcal{O}} n^2 - x_{BK}}$$

$$x_{BK5} = \frac{0,25 \cdot 5^2}{0,25 \cdot 5^2 - 13,3} = 0,89$$

$$x_{BK7} = \frac{0,25 \cdot 7^2}{0,25 \cdot 7^2 - 13,3} = 11,7$$

$$x_{BK11} = 1,78$$

$$x_{BK13} = 1,46$$

Определим эквивалентный ток в цепи БК и кратность перегрузки БК по току, $K_{нл}$. Ток ВГ, протекающий через БК

$$I_{BK_n} = K_{BK_n} I_n$$

$$I_{BK5} = K_{BK5} I_5 = -0,89 \cdot 108 = -96,12 A$$

$$I_{BK7} = 11,7 \cdot 75 = 877,5 A$$

$$I_{BK11} = 1,78 \cdot 42 = 74,76 A$$

$$I_{BK13} = 1,46 \cdot 24 = 35,04 A$$

Суммарный ток, протекающий через БК

$$I_{\mathcal{O}BK} = \sqrt{I_{номBK}^2 + I_{BK5}^2 + I_{BK7}^2 + I_{BK11}^2 + I_{BK13}^2} = 932,4 A$$

Кратность перегрузки БК по току $K_n = 3,2 > 1,3$ - режим невозможен, т.к. БК выйдет из строя.

Пример 2.

Определить K_{2U} на шинах 6 кВ при подключении к сети однофазной печи мощностью 5 МВА, $\cos \varphi = 1$ ЭСПЦ. $S_{кз}$ в точке подключения 144 МВА.

Решение.

Ток обратной последовательности.

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_n} \sqrt{3S_{AB}^2 + (S_{AB} - 2S_{BC})^2} = \frac{\sqrt{3}}{6 \cdot 6} \sqrt{3 \cdot 5000^2 + 5000^2} = 486 A$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3}S_{AB}}{S_{AB} - 2S_{BC}} - \varphi_{напр.} = \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot 5}{5} - 0 = 60^\circ \text{ или } \pi/3$$

ψ_2 - нах. фаза тока обратной последовательности.

$$2. \text{ Сопровитления короткого замыкания } x_k = \frac{U^2}{S_{кз}} = \frac{36}{144} = 0,25 \text{ Ом}$$

$$3. K_{2U}: \kappa_{2U} = \frac{\sqrt{3}I_2 x_k}{U_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot 483 \cdot 0,25}{6000} \cdot 100\% = 3,5\%$$

Требования ГОСТ 13109-97 нарушены.

Контрольные вопросы.

1. Как определяются токи высших гармоник, генерируемые сваркой, выпрямительными установками, ДСП?
2. Как найти эквивалентные токи ВГ при нескольких источниках искажения синусоидальности кривых тока и напряжения в сети?
3. Составление схемы замещения для расчета несинусоидальных режимов.
4. Как найти сопротивления элементов сети на частотах ВГ?
5. Порядок расчета несинусоидальных режимов.
6. Условия возникновения резонанса в сети.
7. Что такое однофазная, двухфазная и трехфазная несимметрия?
8. Как найти токи обратной последовательности?
9. Чему равны сопротивления обратной последовательности элементов сети.
10. Составление схемы замещения для расчета несимметричных режимов.
11. Порядок расчета несимметричных режимов.
12. Как быстро оценить возможность подключения к сети специальной нагрузки.

Практическое занятие № 4.

«Регулирование напряжения в электрических сетях. Выбор добавок напряжения при различных средствах регулирования напряжения».

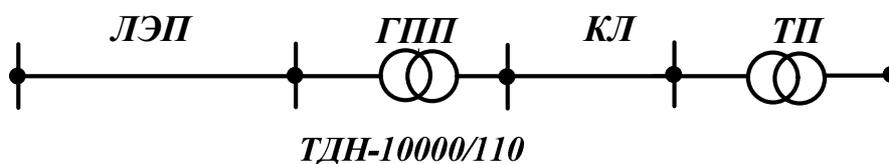
Цель: научиться обеспечивать требуемые ГОСТ 13109-97 уровень отклонений напряжения в сети путем регулирования напряжения.

При подготовке по теме практического занятия используется теоретический материал, изложенный в [1, стр. 110-123, 3, стр. 115-126, 5, стр. 168-178].

Примеры решения задач.

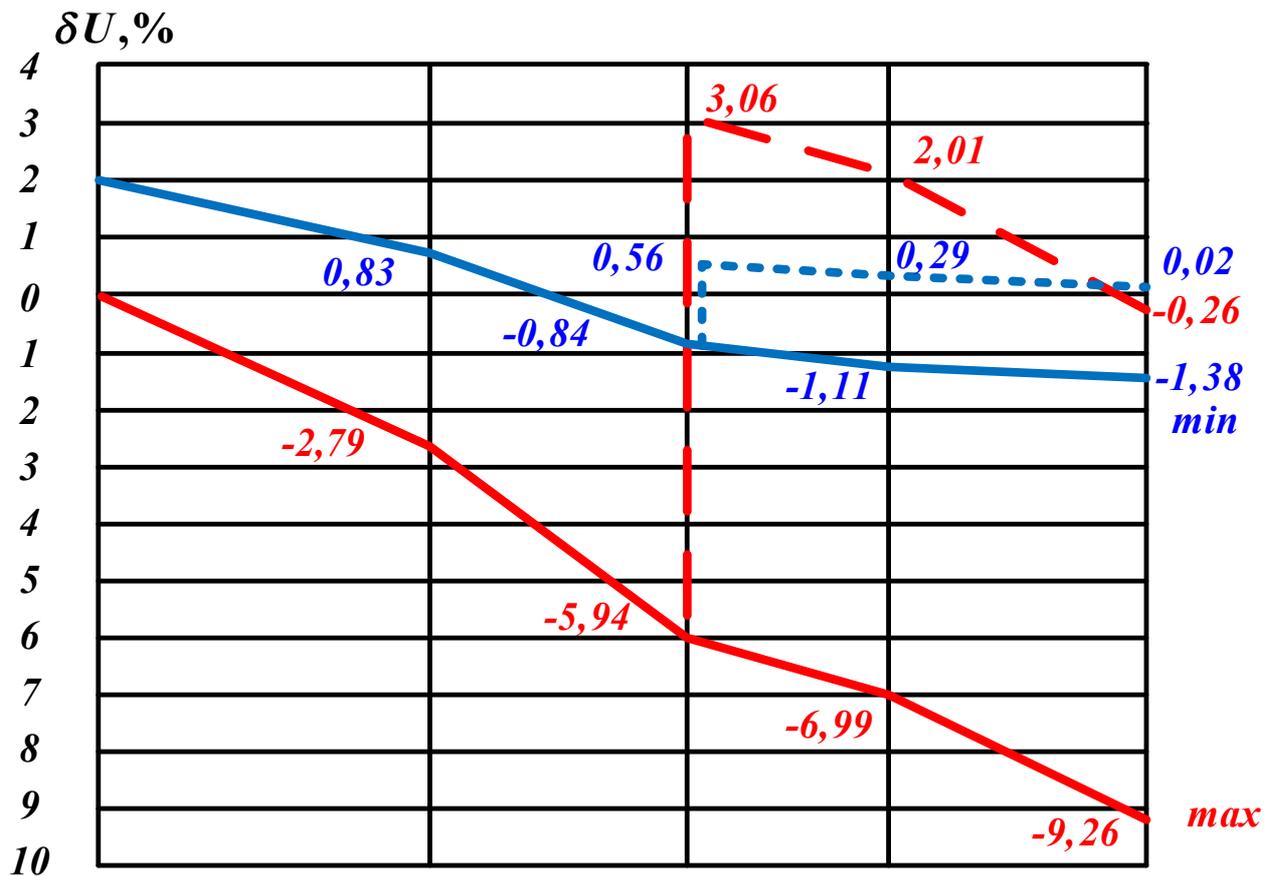
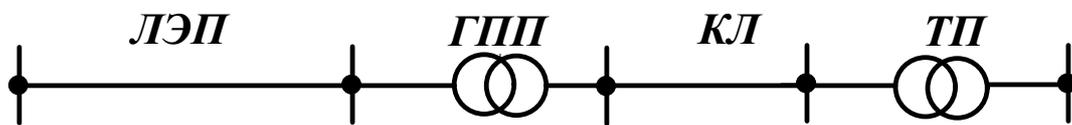
Определить требуемый диапазон регулирования $U_{ст}$ ГПП, используемые при регулировании отпайки, если задано, что U на шинах НН СТ ТП должно быть const и равно $U_{ном}$. Построить диаграмму отклонений U при регулировании напряжения на ГПП.

Известна диаграмма отклонений U до регулирования и потери на участках сети, а также U в центре питания. (Данная задача является продолжением задачи практического задания № 2).



$$\delta U' = \delta U'_{ТП} - \Delta U'_{ЛЭП} - \Delta U'_{ГПП} - \Delta U'_{КЛ} - \Delta U'_{ТП} = 0 - 2,79 - 3,15 - 1,05 - 2,27 = -9,26\%$$

$$\delta U'' = \delta U''_{ТП} - \Delta U''_{ЛЭП} - \Delta U''_{ГПП} - \Delta U''_{КЛ} - \Delta U''_{ТП} = 2 - 1,17 - 1,67 - 0,27 - 0,27 = -1,38$$



По справочнику диапазон регулирования для ТДН- 10000/110 составляет $\pm (4 \times 2,5 \%)$, что больше величины отклонения U на шинах ТП. Определим на каких ответвлениях будет работать СТ ГПП при max и min нагрузке.

1. Напряжение на зажимах СТ ГПП при max нагрузке

$$U'_1 = U'_{III} - \Delta U'_{ЛЭП} = 110 - 3,07 = 106,93 \text{ кВ}.$$

При min нагрузке

$$U''_1 = U''_{III} - \Delta U''_{ЛЭП} = 112,2 - 1,29 = 110,9 \text{ кВ}.$$

Чтобы U на шинах вторичного U ТП было равно $U_{ном}$ в режиме max и min нагрузки надо соответственно повысить U на зажимах обмотки вторичного U СТ ГПП на 9,26 и 1,38% (см. величину отклонений).

Для этого выберем ответвление при max нагрузке по формуле

$$U_{отв} = \left(U_{xx} - \frac{\Delta U'_T U_{xx}}{100} \right) \frac{U'_1}{U'_2} = \left(11 - \frac{3,15 \cdot 11}{100} \right) \frac{106,93}{10,926} = 104,26.$$

U'_2 - величина напряжения на шинах ТП по диаграмме.

Ближайшее стандартное ответвление

$$U_{отв} = U_n - \frac{U_n (nE_0)}{100} = 110 - \frac{110(2 \cdot 2,5)}{100} = 104,5 \text{ кВ}$$

При выбранном ответвлении напряжения на вторичной обмотке при max нагрузке равно

$$U'_2 = \left(U_{xx} - \frac{\Delta U'_T U_{xx}}{100} \right) \frac{U'_1}{U'_{отв}} = \left(11 - \frac{3,15 \cdot 11}{100} \right) \frac{106,93}{104,5} = 10,9 \text{ кВ}.$$

Ответвление при min нагрузке

$$U'_{отв} = \left(U_{xx} - \frac{\Delta U''_T U_{xx}}{100} \right) \frac{U''_1}{U'_2} = \left(11 - \frac{1,67 \cdot 11}{100} \right) \frac{110,91}{10,138} = 118,3 \text{ кВ}.$$

Ближайшее стандартное ответвление

$$U_{отв} = U_n + \frac{U_n (nE_0)}{100} = 110 + \frac{110(3 \cdot 2,5)}{100} = 118,25.$$

Напряжение на вторичной обмотке СТ при min нагрузке

$$U''_2 = \left(U_{xx} - \Delta U''_T \frac{U_{xx}}{100} \right) \frac{U''_1}{U'_{отв}} = \left(11 - \frac{1,67 \cdot 11}{100} \right) \frac{110,91}{118,25} = 10,14 \text{ кВ}.$$

Определяем δU с учетом регулирования СТ ГПП

$$\delta U = \delta U_{НП} - \Delta U_{ЛЭП} - \Delta U_{ГПП} + E - \Delta U_{кл} - \Delta U_{ТП}$$

$$\delta U' = 0 - 2,79 - 3,15 + 9 - 1,05 - 2,27 = -0,26\%$$

$$E = \frac{U'_2 - U_n}{U_n} \cdot 100 = \frac{10,9 - 10}{10} \cdot 100 = 9\%.$$

$$\delta U'' = 2 - 1,17 - 1,67 + 1,4 - 0,27 - 0,27 = 0,02\%$$

$$E = \frac{U''_2 - U_n}{U_n} \cdot 100 = \frac{10,14 - 10}{10} \cdot 100 = 1,4.$$

Покажем диаграмму отклонения (см. рис.).

Контрольные вопросы.

1. Какова цель регулирования напряжения?
2. Способы регулирования напряжения.
3. Принципы регулирования напряжения.
4. Технические средства, применяемые для регулирования напряжения.
5. Каковы условия обеспечения требуемого уровня напряжения.
6. В чем заключается анализ режима напряжения в сети?
7. Как определяются добавки напряжения, создаваемые техническими средствами?
8. Как обеспечить закон регулирования напряжения в сети?
9. Как построить эпюру напряжения для рассматриваемого участка сети?

Практическое занятие № 5.

«Выбор параметров технических средств по снижению несинусоидальности в электрических сетях»

Цель: Научиться выбирать технические средства и их параметры для снижения несинусоидальности напряжения в сети и исключения резонансных режимов.

При подготовке по теме практического занятия используются теоретические материалы, изложенные в [1, стр. 136-153, 3, стр. 134-149].

Примеры решения задач.

Пример 1.

Пример выбора силового резонансного фильтра

Для проектирования фильтра необходимо определить емкость конденсаторов и индуктивность реакторов по условию резонанса напряжения с учетом:

а) допустимых величин загрузки конденсаторов по току ($I_B \leq 1,3I_n$), по мощности ($Q_o \leq Q_n$) и по напряжению ($U_o \leq U_n$);

б) допустимых величин технологических отклонений индуктивности нерегулируемых реакторов (до 2%) и емкостей конденсаторов (до 5%) от номинальных значений;

в) допустимых пределов отклонений мощности конденсаторов фильтра и мощности КЗ в точке подключения фильтра K_p . Для фильтра 11 гармоники $K_p \geq 0,25 \cdot 10^{-2}$

1. Исходные данные для расчета фильтра

Мощность трехфазного КЗ на шинах 10кВ подстанции в максимальном режиме $S_{кз\max} = 350 \text{ МВА}$.

Наибольшее рабочее напряжение на шинах подстанции $U_{ин} = 10 \text{ кВ}$.

Номинальное напряжение принимаемых к установке конденсаторов $U_{н.к.} = 6,6 \text{ кВ}$.

Расчетные величины токов высших гармоник

$$\begin{array}{l} \text{III с.ш.} \left\{ \begin{array}{l} I_{11} = 206 \text{ А;} \\ I_{13} = 160 \text{ А;} \end{array} \right. \\ \text{IV с.ш.} \left\{ \begin{array}{l} I_{11} = 231 \text{ А;} \\ I_{13} = 181 \text{ А.} \end{array} \right. \end{array}$$

2. Выбор батарей конденсаторов

Ориентировочная мощность батарей конденсаторов фильтров $Q_o = \sqrt{3} \cdot 1,3 U_{ин} I_n$

11 гармоника

13 гармоника

$$Q_o^{(III)} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 206 = 4600 \text{ квар}; \quad Q_o^{(III)} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 160 = 3602,67 \text{ квар};$$

$$Q_o^{(IV)} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 230 = 5200 \text{ квар}; \quad Q_o^{(IV)} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 181 = 4075,52 \text{ квар}.$$

Мощность батарей конденсаторов фильтров, определяемая из условия эффективности поглощения гармоники $Q_o \geq S_{кз} K_p$

$$Q_o^{(III)} = 350 \cdot 0,25 \cdot 10^{-2} = 880 \text{ квар}; \quad Q_o^{(IV)} = 880 \text{ квар}.$$

Принятая мощность батарей конденсаторов из условий обеспечения требований первых двух пунктов

$$Q_{11}^{(III)} = 5280 \text{ квар (66 банок по 80квар);}$$

$$Q_o^{(IV)} = 6240 \text{ квар (78 банок по 80квар).}$$

Расчет коэффициента эффективности поглощения гармоники для принятой батареи

конденсаторов $K_p = \frac{Q_{11}}{S_{кз}}$

$$K_p \geq 0,1 \cdot 10^{-2};$$

$$K_p = \frac{5,28}{350} = 1,5 \cdot 10^{-2} > 0,1 \cdot 10^{-2} \quad (\text{III с. ш.});$$

$$K_p = \frac{6,24}{350} = 1,8 \cdot 10^{-2} > 0,1 \cdot 10^{-2} \quad (\text{IV с. ш.}).$$

Расчет коэффициента a_p , характеризующего увеличение напряжения основной частоты на конденсаторах в сравнении с напряжением на шинах подстанции

$$a_p = \frac{n^2}{n^2 - 1} = \frac{11^2}{11^2 - 1} = 1,008.$$

Расчет коэффициента K_U , характеризующего запас по напряжению конденсаторов с учетом номинального напряжения батарей и расчетного напряжения сети

$$K_U = \frac{U_m}{\sqrt{3}U_{H.K.}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 0,88.$$

Проверка БК на отсутствие перенапряжения

$$a_p K_U \leq 1 \text{ или } 1,008 \cdot 0,88 < 1.$$

Определение коэффициента, учитывающего нелинейность частотной характеристики, влияние фильтра на её деформацию и влияние отклонений параметров фильтра от величин, соответствующих резонансной настройке

$$X_n = \frac{\alpha}{K_3 K_p n^2};$$

$$X_{11} = \frac{-0,01}{1,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2} = -0,004.$$

Определение коэффициента загрузки фильтра по току 11-й гармоники

$$K_{i11} = \frac{1}{1 + X_{11}} = \frac{1}{1 - 0,004} = 1,004.$$

Проверка мощности БК по условию исключения перегрузки по току и с учетом отсутствия перенапряжений.

$$Q_{11} = \frac{3U_{H.K.} I_{11} K_{i11}}{\sqrt{C_i^2 - (a_p K_U)^2}},$$

где $C_i=1,3$.

$$Q_{11} = \frac{3 \cdot 6,6 \cdot 230 \cdot 1,04}{\sqrt{1,6 - (1,008 \cdot 0,88)^2}} = 5000 \text{ квар.}$$

Реактивная мощность, выдаваемая батареями конденсаторов фильтра

$$Q_{\text{выд}} = Q_{11} (a_p K_U)^2 = 5280 \cdot 0,89^2 = 4150 \text{ квар.}$$

3. Выбор реактора фильтра

Определение емкостного сопротивления фазы батареи конденсаторов

$$x_c = \frac{U_{H.K.}^2}{\frac{Q_{11}}{3}} = \frac{3U_{H.K.}^2}{Q_{11}} = \frac{3 \cdot 6,6^2}{5,28} = 24,6 \text{ Ом.}$$

Определение индуктивного сопротивления реакторов из условия резонанса

$$x_p = \frac{x_c}{n^2} = \frac{24,6}{121} = 0,205 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток реактора

$$I_{pH} \geq \frac{Q_{11}}{\sqrt{3}U_{ш}};$$

$$I_p = \frac{5280}{1,73 \cdot 10} = 305 \text{ А.}$$

Определение реактивности реактора

$$x_{p,\%} = \frac{\sqrt{3}I_{HP}x_p}{10U_{PHOM}};$$

$$x_{p,\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 0,205}{10 \cdot 10} = 2,1\%.$$

Снижение гармоник тока в сети после установки фильтра

$$K_{эн} = x_n K_{ин} 100 = 0,004 \cdot 1,004 \cdot 100 = 0,4\%,$$

то есть после установки фильтра 11-й гармоники уровень тока 11 гармоники снизился до 0,4% на III с.ш. и до 0,34% на IV с.ш.

Пример 2.

Рассчитать фильтр для подстанции цеха электролиза, если $S_{кз}=330$ МВА; $S_{II}=26000$ кВА; число фаз $m=12$; $U_{ш}=10,5$ кВ; оптимальная величина $Q_{онм}=4500$ квар; $U_{11*}=5,4\%$; $U_{13*}=4,1\%$; $K_U=7\%$.

Решение.

1) Определяем токи ВГ преобразователей

$$I_{11} = \frac{S_{II}}{\sqrt{3}U_{ш}n} = \frac{26000}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 11} = 130 \text{ А};$$

$$I_{13} = 110 \text{ А.}$$

2) Принимаем к установке один фильтр, настроенный на $n=11$. Мощность БК принимается равной $Q_{онм}$:

$$Q_{онм} = 4500 \text{ квар}; \quad K_p = \frac{4500}{330 \cdot 10^{-3}} = 1,38 \cdot 10^{-2}.$$

Выбираем конденсаторы КС-75-6,3, соединенные в звезду.

3) Находим долю тока 13 ВГ, протекающую через фильтр

$$\sigma_{n13} = \frac{1}{\frac{1}{K_p n_p^2} \left[1 - \left(\frac{n_p}{n_q} \right)^2 \right] + 1} = \frac{1}{\frac{1}{1,38 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2} \left[1 - \left(\frac{11}{13} \right)^2 \right] + 1} = 0,86.$$

Ток ВГ в цепи БК равен

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{\sum (I_{nq} \sigma_{nq})^2} = \sqrt{130^2 + (110 \cdot 0,86)^2} = 161 \text{ А.}$$

Мощность БК фильтра на 3 фазы по условию отсутствия перегрузки
 $Q_p \geq 1,2 K_c I_{n\Sigma} U_{НБ} = 1,2 \cdot 3 \cdot 161 \cdot 6,3 = 3650 < 4500$ квар.
 Проверим БК на отсутствие перегрузки по мощности и превышению напряжения.

$$\left(\frac{U_u}{\sqrt{3} U_{БК}} \right) \left(\frac{n_p^2}{n_p^2 - 1} \right) < \sqrt{1 - \frac{0,7}{n}}$$

или

$$\left(\frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \right) \left(\frac{11^2}{11^2 - 1} \right) = 0,96 < \sqrt{1 - \frac{0,7}{11}} = 0,97.$$

Значит БК не перегружена.

Сопротивление фазы реактора

$$X_p = \frac{3U_{НБ}^2}{n_p^2 Q_{НБ}} = \frac{3 \cdot 6,3^2 \cdot 10^3}{11^2 \cdot 4500} = 0,22 \text{ Ом}$$

После установки фильтра остаточное напряжение ВГ

$$\Delta U_{nq^*} = U_{nq^*} \left[1 - \sigma_{nq\Sigma}^\phi \right];$$

$$\Delta U_{11^*} = 5,4 [1 - 1] = 0; \quad \Delta U_{13^*} = 4,1 [1 - 0,86] = 0,57\%;$$

$$K_U = 0,57\%.$$

Если установить фильтр двенадцатой гармоники, то

$$\sigma_{n11} = \frac{1}{\frac{1}{1,38 \cdot 10^{-2} \cdot 12^2} \left[1 - \left(\frac{12}{11} \right)^2 \right] + 1} = 1,1;$$

$$\sigma_{n13} = \frac{1}{\frac{1}{1,38 \cdot 10^{-2} \cdot 12^2} \left[1 - \left(\frac{12}{13} \right)^2 \right] + 1} = 0,93;$$

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{(130 \cdot 1,1)^2 + (110 \cdot 0,93)^2} = 176 \text{ А};$$

$$Q_p = 1,2 \cdot 3 \cdot 176 \cdot 6,3 = 4000 < 4500 \text{ квар};$$

$$\Delta U_{11^*} = 5,4 [1 - 1,1] = -0,54\% \quad \Delta U_{13^*} = 4,1 [1 - 0,93] = 0,29\%$$

$$K_U = 0,61\%.$$

Т.о., ненастроенный фильтр также эффективен, как и СРФ, настроенный на номер ВГ.

Контрольные вопросы.

1. Перечислить схемные решения для снижения несинусоидальности кривой напряжения.
2. Какие технические средства используются для компенсации высших гармоник?
3. Принципиальные схемы силовых резонансных фильтров (СРФ).
4. Схемы подключения СРФ к сети.
5. Порядок выбора параметров СРФ.
6. Чем отличаются СРФ от ненастроенных фильтров?
7. Порядок выбора ненастроенных фильтров.
8. Что из себя представляют гибридные фильтры?

Практическое занятие № 6.

«Выбор параметров технических средств по снижению несимметрии в электрических сетях»

Цель: научиться выбирать технические средства, обеспечивающие оптимальные снижения несимметрии в сети.

При подготовке по теме практического занятия используются теоретические материалы, изложенные в [1, стр. 154-163; 3, стр. 149-165].

Примеры решения задач.

Однофазная печь ЭШП мощностью $S_n = 5\text{MVA}$ ($\cos \varphi_n = 0.866$) подключена к сети 6 кВ ЭСПЦ, питающегося от районной ПС энергосистемы. Мощность Кз в узле подключения $S_{кз} = 136\text{MVA}$. Мощность, требуемая по условию компенсации реактивной мощности = 5 Мвар. Выбрать симметрирующее устройство СУ.

Решение.

1. Печь подключена на линейное напряжение.

Определим K_{2U}

$$\kappa_{2U} = \frac{S_n}{S_{кз}} = \frac{5}{136} = 0,0368 > 0,02.$$

2. Определим параметры СУ.

Принимаем $\delta U = 0$, $K_{2U \text{ don}} = 0,02$ и находим вспомогательные величины:

$$A = \kappa_{2U \text{ don}} \cos \psi_U / (1 + \delta U_{\text{don}}); \psi_U = \arctg \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2} \times (Q_{AB} - Q_{CA}) + Q_{BC} = \frac{\sqrt{3}}{2} (0 - 0) - \frac{1}{2} (0 - 0) + 2,5 = 2,5$$

$$Q_{BC} = S_n \sin \varphi_n = 2,5$$

$$\beta = \frac{1}{2} (P_{AB} - P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Q_{AB} - Q_{CA}) + P_{BC} = 4,33$$

$$P_{BC} = S_n \cos \varphi_n = 4,33; \psi_U = \arctg \frac{4,33}{2,5} = 60^\circ.$$

$$A = \frac{0,02 \cdot 0,5}{1 + 0} = 0,01;$$

$$B = \frac{K_{2U \text{ don}} \sin \psi_U}{1 + \delta U_{\text{don}}} = \frac{0,02 \cdot 0,5}{1 + 0} = 0,0173.$$

$$C = BS_{\kappa} + S_{AB} (\cos(60^\circ - \varphi_{AB})) - P_{BC} + S_{CA} \cos(60^\circ - \varphi_{CA}) = 0,0173 \cdot 136 + 0 - 4,33 + 0 = -1,98$$

$$D = -AS_{\kappa} + S_{AB} \sin(60^\circ - \varphi_{AB}) + Q_{BC} - S_{CA} \sin(60^\circ - \varphi_{CA}) = -0,01 \cdot 136 + 0 + 2,5 - 0 = 1,14$$

Определяем реактивные мощности элементов СУ:

$$\begin{aligned} Q_{AB_{CV}} &= -\frac{1}{3} \left[\sqrt{3}C - D - Q_{CV} \cdot (1 - A - \sqrt{3}B) \right] = \\ &= -\frac{1}{3} \left[\sqrt{3}(-1,98) - 1,14 - (-5)(1 - 0,01 - \sqrt{3} \cdot 0,0173) \right] = -0,077 \text{ Мвар} \\ Q_{BC_{CV}} &= -\frac{1}{3} \left[2D - Q_{CV} \cdot (1 + 2A) \right] = \\ &= -\frac{1}{3} \left[2 \cdot 1,14 - (-5)(1 + 2 \cdot 0,01) \right] = -2,46 \text{ Мвар} \\ Q_{CA_{CV}} &= \frac{1}{3} \left[\sqrt{3}C + D + Q_{CV} \cdot (1 - A + \sqrt{3}B) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \left[\sqrt{3} \cdot (-1,98) + 1,14 + (-5)(1 - 0,01 + \sqrt{3} \cdot 0,0173) \right] = -2,46 \text{ Мвар} \\ Q_{CV} &= Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = -(0,077 + 2,46 + 2,46) \approx -5 \text{ Мвар} \end{aligned}$$

Параметры СУ выбраны правильно.

Контрольные вопросы.

1. Что относится к схемным решениям по снижению несимметрии в сети?
2. Перечислить технические средства, обеспечивающие снижение несимметрии напряжения в сети и дать их классификацию.
3. Способы симметрирования напряжения.
4. Привести принципиальные схемы СУ трансформаторного типа.
5. Принципы работы управляемых СУ.
6. Как определяются параметры элементов емкостных СУ?
7. Порядок определения параметров СУ, состоящих из емкостных и индуктивных элементов.
8. Как определяются углы поворотов роторов СУ на основе силовых трансформаторов с вращающимся магнитным полем?

Практическое занятие № 7.

«Снижение колебаний напряжения в электрических сетях».

Цель: Научиться выбирать типы технических устройств и их параметры для ограничения колебаний напряжения.

При подготовке по теме практического занятия используются теоретические материалы, изложенные в [1, стр. 128-135, 3, стр. 126-133].

Пример 1.

Для ограничения колебаний напряжения прокатного стана выбрать ССК. Определить его параметры.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} Q_{cp} &= 71,4 \text{ Мвар} & t_{прок} &= 10 \text{ с} & \Delta Q_{НБ} &= 107 \text{ Мвар} \\ Q_{СК} &= 76,29 \text{ Мвар} & t_{цикл} &= 116 \text{ с} & \Delta Q_{НБ} &= Q_{max} - Q_{min} \\ S_{кз} &= 3240 \text{ МВА} & & & tg\varphi_{cp} &= 0,9 \\ & & & & tg\varphi_{дон} &= 0,484 \\ & & & & S_{СД} &= 8 \text{ МВА} \end{aligned}$$

Число СД – 2 шт. $P_{прок} = 8,8 \text{ МВА}$ - определена по ГЭН.

Решение.

1. Определяем долю погрешностей части нагрузки, на которую необходимо скомпенсировать:

$\delta U_{t\text{дон}} = 0,0086$ - определено по ГОСТ.

$$K_{к\sim} = 1 - \frac{\delta U_{t\text{дон}} S_{кз}}{\Delta Q_{НБ}} = 1 - \frac{0,0086 \cdot 3240}{107} = 0,74.$$

Определим долю постоянной нагрузки, которую нужно скомпенсировать.

$$K_{кcp} = 1 - \frac{tg\varphi_{дон}}{tg\varphi_{cp}} = 1 - \frac{0,484}{0,9} = 0,46$$

Требуемая мощность КУ

$$\begin{aligned} Q_{КУ} &= \sqrt{K_{к\sim}^2 Q_{\sim}^2 + K_{кcp}^2 Q_{cp}^2} \\ Q_{\sim} &= \sqrt{Q_{СК}^2 - Q_{cp}^2} = \sqrt{76,29^2 - 71,4^2} = 26,9 \text{ Мвар} \\ Q_{КУ} &= \sqrt{0,74^2 \cdot 26,9^2 + 0,46^2 \cdot 71,4^2} = 39 \text{ Мвар} \end{aligned}$$

Выбираем СК-10000-8 по 2 штуки на секцию шин, т.е. всего 4 штуки.

Проверяем их. Для этого определяем располагаемую мощность ССК

$$\begin{aligned} Q_{СК} &= 7,7 \text{ Мвар} . \\ Q_{СК\text{ расн}} &= 0,95 \cdot 4 \cdot 7,7 = 29 \text{ Мвар} , \end{aligned}$$

где коэффициент 0,95 принят из-за наличия ВГ в сети.

Остальные 10 Мвар - это СД стана располагаемая мощность СД черновых клетей

$$Q_{СД\text{ расн}} = \sqrt{\left(0,95 \cdot S_{СД\text{ ном}}\right)^2 - P_{пр}^2 \frac{t_{прок}}{t_{цикл}}} = 6,95 \text{ Мвар} /$$

Тогда мощность компенсирующих устройств равна

$$Q_{КУ} = Q_{ССК} + Q_{СД\Sigma} = 29 + 6,95 \cdot 2 = 41,5 \text{ Мвар}$$

$$41,5 > 39 \text{ Мвар}$$

Следовательно ССК выбран правильно.

Пример 2.

Выбрать мощность СТК для снижения уровня КН до допустимого значения для прокатных станов типа «слябинг», если интенсивность фликера (ИФ) для всего графика нагрузки равна $P_{st} = 10,28$.

Решение.

Мощность СТК равна

$$Q_{k \max} = Q_{\max} \left(1 - \frac{1}{P_{st}} \right) = 39 \left(1 - \frac{1}{10,28} \right) = 35,2 \text{ Мвар}$$

$$P_{stk} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i \Delta d_i}{d_0} \right)^3},$$

$$\text{где } \Delta d_i = \begin{cases} d_i - d_{k \max}, & d_i > d_{k \max} \\ 0 & d_i \leq d_{k \max} \end{cases}.$$

$$P_{stk} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{60} P_{sti}^3} = 0,92 < 1.$$

Контрольные вопросы.

1. Схемные решения по снижению колебаний напряжения.
2. Что относится к техническим средствам по снижению колебаний напряжения?
3. Как выглядит закон регулирования ССК.
4. Порядок расчета мощности ССК.
5. Преимущества СТК по сравнению с ССК.
6. Типы СТК.
7. Прямая компенсация колебаний напряжения.
8. Косвенная компенсация колебаний напряжения.
9. Выбор СКУ для схем с ДСП.

4. Самостоятельная работа студентов

4.1. График самостоятельной работы студентов

номер темы (лекции)	наименование темы	содержание самостоятельной работы	объем в часах	формы контроля (СРС)	сроки контроля (№ учебной недели)
1. (лекция 1)	Влияние качества электроэнергии на электроприемники и технологические установки.	1. Определение закономерностей влияния отклонения напряжения на производительность и срок службы ламп.	2	блиц-опрос на лекции	2
(лекция 2)		2. Вывести зависимость потерь мощности в элементах сети от K_{2U} . 3. Влияние колебаний напряжения на отказы электроустановок. 4. Ущерб от низкого КЭ	2	блиц-опрос на лекции	2
2. (лекция 3) (лекция 4)	Нормирование качества электроэнергии.	1. Сопоставление стандартов на КЭ разных стран.	2	блиц-опрос на лекции; реферат; опрос на практическом занятии.	3
(практическое занятие, ПЗ №1)		2. Подробное изучение ГОСТ 1309-97, правовой основы проблемы КЭ. Решение домашних индивидуальных заданий на тему «Оценка соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97»	2		
3. (лекция 5).	Экспериментальные исследования КЭ.	1. Изучение устройств и функциональных систем приборов для измерения ПКЭ.	2	блиц-опрос на лекции	4
(лекция 6)		2. Методика обработки результатов измерения. 3. Произвести анализ результатов контроля ПКЭ, полученных с помощью ИВК «Омск» и «Ресурс» в Дальневосточном регионе.	2		
4. (лекция 7) (ПЗ №2)	Методы расчета ПКЭ	1. Выбор характерных ЭП и точек сети для расчета и анализа отклонений напряжения. 2. Методика расчета размахов изменения напряжения и фазы фликера при пуске электродвигателя.	1	защита индивидуального исследовательского задания по контролю КЭ	5
(лекция 8)		3. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Расчет отклонений и колебаний напряжения»	1		
				блиц-опрос на лекции; решения примеров	6
				защита индивидуального домашнего задания ПЗ №2.	5

номер темы (лекции)	наименование темы	содержание самостоятельной работы	объем в часах	формы контроля (СРС)	сроки контроля (№ учебной недели)
(лекция 9)	ПЗ № 3.	1.Схема замещения турбогенераторов для оценки несинусоидальности напряжения, вывод формул для сопротивлений на частоте ВГ.	1	блиц-опрос на лекции; и практическом занятии № 3. опрос на лекции блиц-опрос на лекции; опрос на лекции и практическом занятии защита индивидуального домашнего задания	7
(лекция 10)		2.Подключения БК к шинам ВН и НН подстанций.	1		8
(лекция 11)		3.Решение примеров 4. Метод расчета K_{2U} в вероятностной постановке.	0,5		8
		5. Примеры на тему: «Возможность подключения к узлу нагрузки специфичных ЭП».	1		8
		6. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Расчет несинусоидальных и несимметричных режимов»	0,5 2		6
5. (лекция 12)	Методы и средства нормализации ПКЭ	1. Регулирование напряжения с помощью изменения коэффициента трансформации силового трансформатора.	1	блиц-опрос на лекции блиц-опрос на лекции, реферат защита индивидуального домашнего задания опрос на лекции блиц-опрос на лекции	9
(лекция 13)		2. Изучение конструктивных особенностей и принципиальных электрических схем технических средств, используемых для регулирования напряжения.	1		10
ПЗ № 4		3. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Регулирование напряжения в электрических сетях».	1		10
(лекция 14)		4. Выбор схемных решений по ограничению колебаний напряжения для заданных вариантов сети с резкопеременными нагрузками.	1		8
(лекция 15)		5. Анализ конструктивного исполнения технических средств, используемых для снижения колебаний напряжения.	1		10
(лекция 16)		6. Анализ эффективности силовых резонансных фильтров при случайном изменении ВГ.	0,5		10
		7. Конструктивное исполнение СРФ.			

номер темы (лекции)	наименование темы	содержание самостоятельной работы	объем в часах	формы контроля (СРС)	сроки контроля (№ учебной недели)		
(лекция 17)	Эксплуатационный контроль ПКЭ. Анализ КЭ. Оптимизация КЭ	8. Область применения каждого из технических средств снижения несинусоидальности напряжения. Их эффективности и конструктивное исполнение.	0,5 1	блиц-опрос на лекции	11		
ПЗ № 5.		9. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Выбор параметров технических средств по снижению синусоидальности в электрических сетях».	2				
(лекция 18, 19)		10. Конструктивное исполнение технических средств, снижающих несимметрию напряжения.	1	блиц-опрос на лекции	12		
ПЗ № 6.		11. Анализ эффективности СУ. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Выбор параметров технических средств по снижению несимметрии напряжения в сети».	2	блиц-опрос на лекции	12		
		ПЗ № 7	12. Выполнение индивидуального домашнего задания на тему «Снижение колебаний напряжения в электрических сетях».	2	защита индивидуального домашнего задания	12	
6. (лекция 20)		1. Диагностика систем электроснабжения.	2	блиц-опрос на лекции			10
		2. Примеры расчета фактического вклада в искажение КЭ.					
7. (лекция 21)		1. Методы оптимизации, используемые в задачах КЭ	2	блиц-опрос на лекции			13
				защита индивидуального домашнего задания	14		
				защита индивидуального домашнего задания	11		
				блиц-опрос на лекции	14		
				защита индивидуального домашнего задания	21		
			Экзамен	21			

4.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ.

При изучении дисциплины предусмотрено выполнение семи индивидуальных домашних заданий для студентов очной формы обучения и одной контрольной работы для студентов заочной и сокращенной заочной форм обучения.

Тематика индивидуальных домашних заданий совпадает с тематикой практических занятий.

Прежде чем приступать к выполнению домашних заданий необходимо изучить соответствующих теоретический материал и разобраться с решением аналогичных задач, рассмотренных на практических занятиях или в литературе.

Примеры решения задач по всем темам приведены в п. 3.2 данного УМКД.

В таблице 4.1 систематизирована рекомендуемая литература, которая поможет успешно справиться с индивидуальным домашним заданием.

Таблица 4.2.

номер индивидуального домашнего задания	наименование темы домашнего задания	номер из списка литературы с изложением теоретического материала по теме задания	номер из списка литературы с примерами решения задач по теме индивидуальных заданий.
1	Оценка соответствия качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97	1, стр. 47-66 2, стр. 189-192 5, стр. 230-235	2, стр. 192-195 5, стр. 227, 229-230
2. 3.	Расчет отклонений напряжения. Расчет колебаний напряжения. Расчет несинусоидальных режимов Расчет несимметричных режимов	1, стр. 67-74 5, стр. 277-285 1, стр. 75-86 1, стр. 87-104 1, стр. 105-109	5, стр. 285-289 3, стр. 99-109 3, стр. 110-114 3, стр. 95-99
4.	Регулирование напряжения	1, стр. 110-123 5, стр. 289-298 5, стр. 168-174	
5	Выбор технических средств для снижения несинусоидальности напряжения	1, стр. 136-142, 146-152 5, стр. 178-187	1, стр. 143-146, 152-153 3, стр. 144-145
6.	Выбор технических средств для снижения несимметрии напряжения	1, стр. 154-164	3, стр. 162-163
7.	Выбор технических средств для ограничений колебаний напряжения.	1, стр. 124-135	3, стр. 130-133

Индивидуальные домашние задания выполняются с помощью ПК MathCad и графического редактора Visio.

Контрольная работа для студентов заочной и сокращенной заочной форм обучения предусматривает выполнение двух задач: одна из которых на тему: «Оценка соответствия КЭ требованиям ГОСТ 13109-97», другая посвящена расчету одного из ПКЭ.

Для выполнения контрольной работы целесообразно пользоваться п. 3.2 данного УМКД и табл. 4.2.

Ниже приводится пример решения одного из вариантов контрольной работы.

Пример.

Задача 1.

Проверить соответствие КЭ требованиям ГОСТ 13109-87 по отклонению напряжения, если при $U_{\text{ном}} = 6\text{кВ}$, $\delta\bar{U} = 4\%$, $S_{\delta U} = 1\%$. Что нужно сделать, чтобы отклонение напряжения удовлетворяло требованиям ГОСТ 13109-97? Закон распределения вероятностей нормальный.

Дано: $\bar{M}_{\delta U} = 4\%$; $S_{\delta U} = 1\%$; $U_{\text{ном}} = 6\text{кВ}$

Согласно ГОСТ 13109-97 для напряжения 6кВ отклонение напряжения δU_y :

для нормально допустимого режима $\pm 5\%$; для предельно допустимого режима $\pm 10\%$.

Вероятностные характеристики исследуемого ПКЭ – это математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и закон распределения вероятности.

$\bar{M}_{\delta U} = 4\%$; $S_{\delta U} = 1\%$. Закон распределения вероятностей нормальный.

Определяем вероятность попадания заданной вероятности для нормально допустимых и предельно допустимых значений.

Нормально допустимый режим.

$$\begin{aligned} P(-5\% < \delta U_y < +5\%) &= \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{-5-4}{1}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{-5-4}{1}\right) = \\ &= \frac{1}{2} \Phi(1) - \frac{1}{2} \Phi(-9) = \frac{1}{2} \Phi(1) + \frac{1}{2} \Phi(9) = \frac{1}{2} \cdot 0.6827 + \frac{1}{2} \cdot 1 = 0.34135 + 0.5 = 0.84135. \end{aligned}$$

$P = 0,84135 < 0,95 \Rightarrow$ для нормально допустимого режима ГОСТ 13109-97 – не выполняется.

Предельно допустимый режим.

$$\begin{aligned} P(-10\% < \delta U_y < +10\%) &= \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{10-4}{1}\right) - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{-10-4}{1}\right) = \\ &= \frac{1}{2} \Phi(6) - \frac{1}{2} \Phi(-14) = \frac{1}{2} \Phi(6) + \frac{1}{2} \Phi(14). \end{aligned}$$

$$\Phi(\text{от } 4 \text{ и выше}) = 1 \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 1 = 0,5 + 0,5 = 1.$$

$P = 1 \Rightarrow$ для предельно допустимого режима ГОСТ 13109-97 – выполняется.

Для того, чтобы отклонение напряжения удовлетворяло требованиям ГОСТ 13109-97, необходимо применить одно из следующих технических мероприятий:

1. Регулирование напряжения с помощью РПН силового трансформатора.
2. Применение устройств компенсации реактивной мощности:
 - а) установки продольной компенсации;
 - б) установки поперечной компенсации.
3. Различного рода схемные решения.

Задача 2

Исследовать качество электроэнергии (рассчитать) на шинах высокого, среднего и низкого напряжения для схемы, приведённой на рис. 1.

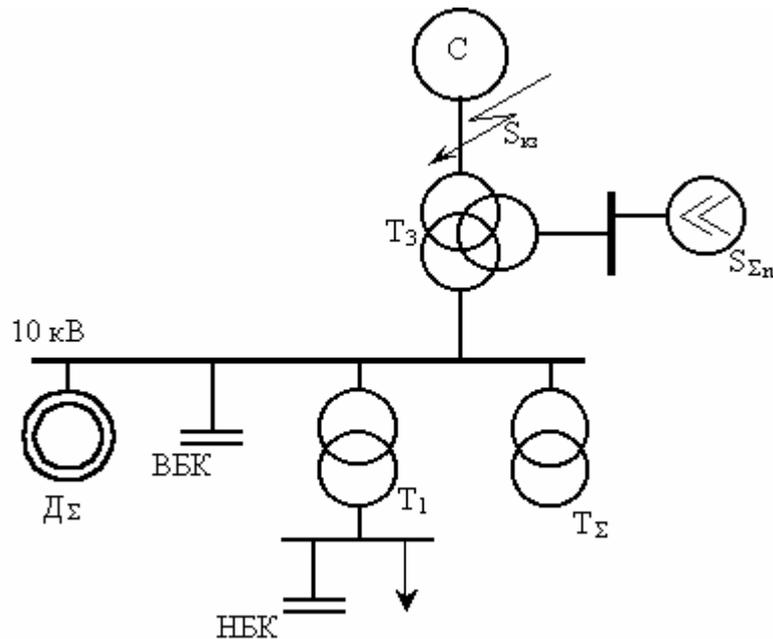


Рис. 1. Схема сети

Исходные данные: Источник искажения – тяга переменного тока;
 $S_{кз} = 4300 \text{ МВА}$; $S_{дв} = 4 \text{ МВА}$; $S_{стΣ} = 2 \text{ МВА}$; $S_{Т1} = 0.63 \text{ МВА}$;
 $S_{Σп} = 18 \text{ МВА}$; $Q_{вбк} = 3 \text{ МВАр}$; $Q_{нбк} = 0.3 \text{ МВАр}$;
 $U_{номВН} = 110 \text{ кВ}$; $U_{номСН} = 27.5 \text{ кВ}$; $U_{номНН} = 10 \text{ кВ}$.

Решение

Определяем мощность нагрузки трансформатора Т1 и мощность транс-форматора Т3:

$$S_H = 0.7S_{Т1} + Q_{нбк}$$

$$S_H = 0.741 \text{ МВА}$$

$$S_{Т3} = \frac{S_{дв} + S_H + S_{Σп} + S_{стΣ} - Q_{вбк} - Q_{нбк}}{0.85}$$

$$S_{Т3} = 25.225 \text{ МВА}$$

Принимаем: $S_{Т3} = 25 \text{ МВА}$.

По справочным данным определяем:

$$u_{квс} = 12.5\%$$

$$u_{квн} = 20\%$$

$$u_{ксн} = 6.5\%$$

$$u_{кт1} = 5.5\%$$

Составляем схему замещения для расчёта высших гармоник, при этом источник искажения представляется источником тока.

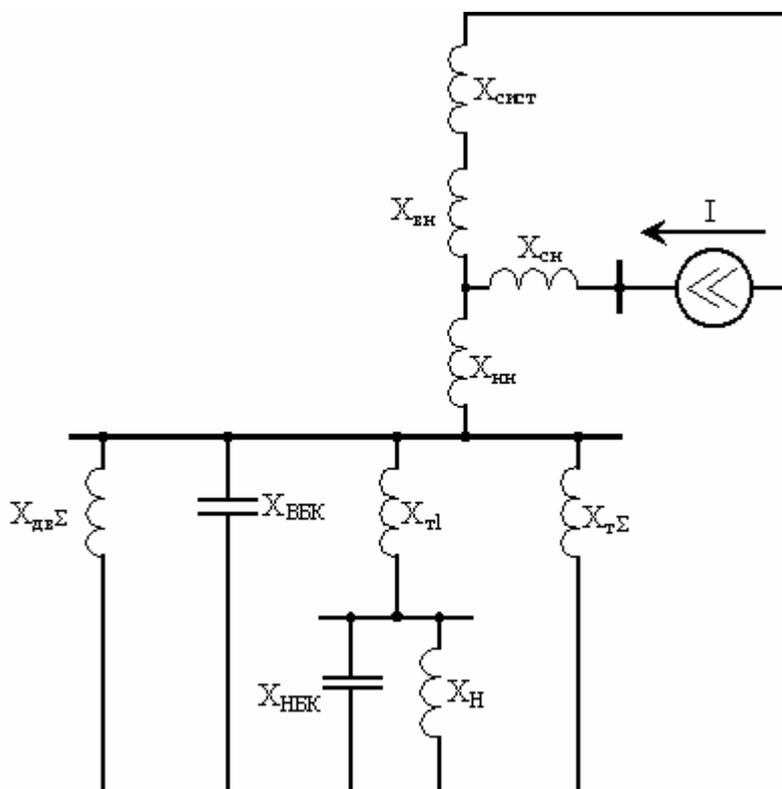


Рис. 2. Схема замещения

Определение параметров схемы замещения.

$$u_{KB} = 0.5(u_{KBC} + u_{KBH} - u_{КСН})$$

$$u_{KB} = 0.13$$

$$u_{KC} = 0.5(u_{KBC} + u_{КСН} - u_{KBH})$$

$$u_{KC} = -0.005$$

$$u_{KH} = 0.5(u_{KBH} + u_{КСН} - u_{KBC})$$

$$u_{KH} = 0.07$$

Сопротивления всех элементов приводим к стороне СН:

$$U_{НОМ} = U_{НОМСН}$$

$$X_{ВН} = \frac{u_{KB} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{Т3}}$$

$$X_{ВН} = 3.933 \text{ Ом}$$

$$X_{Т1} = \frac{u_{КТ1} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{Т1}}$$

$$X_{Т1} = 66.022 \text{ Ом}$$

$$X_{Н} = \frac{0.35 \cdot U_{НОМ}^2}{S_{Н}}$$

$$X_{Н} = 357.203 \text{ Ом}$$

$$X_{СН} = \frac{u_{KC} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{Т3}}$$

$$X_{СН} = 0 \text{ Ом}$$

$$X_{ТΣ} = \frac{u_{КТ1} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{СТΣ}}$$

$$X_{ТΣ} = 20.797 \text{ Ом}$$

$$X_{НБК} = \frac{U_{НОМ}^2}{Q_{НБК}}$$

$$X_{НБК} = 2520.833 \text{ Ом}$$

$$X_{НН} = \frac{u_{KH} \cdot U_{НОМ}^2}{S_{Т3}}$$

$$X_{НН} = 2.118 \text{ Ом}$$

$$X_{СИСТ} = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{К3}}$$

$$X_{СИСТ} = 0.176 \text{ Ом}$$

$$X_{ВБК} = \frac{U_{НОМ}^2}{Q_{ВБК}}$$

$$X_{ВБК} = 252.083 \text{ Ом}$$

$$X_{ДВ} = \frac{0.2 \cdot U_{НОМ}^2}{S_{ДВ}} \quad I_1 = \frac{S_{\Sigma n}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} \quad X_{ДВ} = 37.813 \text{ Ом} \quad I_1 = 377.902 \text{ А}$$

Определяем сопротивления элементов схемы замещения на частотах высших гармоник:

$$\begin{aligned} X_{ВН}(n) &= nX_{ВН} & X_{НН}(n) &= nX_{НН} & X_{СИСТ}(n) &= nX_{СИСТ} & X_{ДВ}(n) &= nX_{ДВ} \\ X_{Т\Sigma}(n) &= nX_{Т\Sigma} & X_{Т1}(n) &= nX_{Т1} & X_{Н}(n) &= nX_{Н} \\ X_{В\text{бк}}(n) &= \frac{X_{В\text{бк}}}{n} & X_{Н\text{бк}}(n) &= \frac{X_{Н\text{бк}}}{n} \end{aligned}$$

Для тяги учитываются 2, 3, 4, 5 и 7 гармоники. Ниже для примера приведены сопротивления на частотах 2 и 7 гармоник.

$$\begin{array}{lll} X_{ВН}(2) = 7.865 \text{ Ом} & X_{НН}(2) = 4.235 \text{ Ом} & X_{СИСТ}(2) = 0.352 \text{ Ом} \\ X_{ДВ}(2) = 75.625 \text{ Ом} & X_{Т\Sigma}(2) = 41.594 \text{ Ом} & X_{Т1}(2) = 132.044 \text{ Ом} \\ X_{Н}(2) = 714.406 \text{ Ом} & X_{В\text{бк}}(2) = 126.042 \text{ Ом} & X_{Н\text{бк}}(2) = 1260.417 \text{ Ом} \\ X_{ВН}(7) = 27.527 \text{ Ом} & X_{НН}(7) = 14.823 \text{ Ом} & X_{СИСТ}(7) = 1.231 \text{ Ом} \\ X_{ДВ}(7) = 264.688 \text{ Ом} & X_{Т\Sigma}(7) = 145.578 \text{ Ом} & X_{Т1}(7) = 462.153 \text{ Ом} \\ X_{Н}(7) = 2500.422 \text{ Ом} & X_{В\text{бк}}(7) = 36.012 \text{ Ом} & X_{Н\text{бк}}(7) = 360.119 \text{ Ом} \end{array}$$

Определяем высшие гармоники тока, генерируемые источником искажения (тягой переменного тока):

$$\begin{aligned} I(n) &= \frac{I_1}{n} & I(2) &= 188.951 \text{ А} & I(3) &= 125.967 \text{ А} \\ I(4) &= 94.475 \text{ А} & I(5) &= 75.58 \text{ А} & I(7) &= 53.986 \text{ А} \end{aligned}$$

Преобразуем схему замещения к следующему виду:

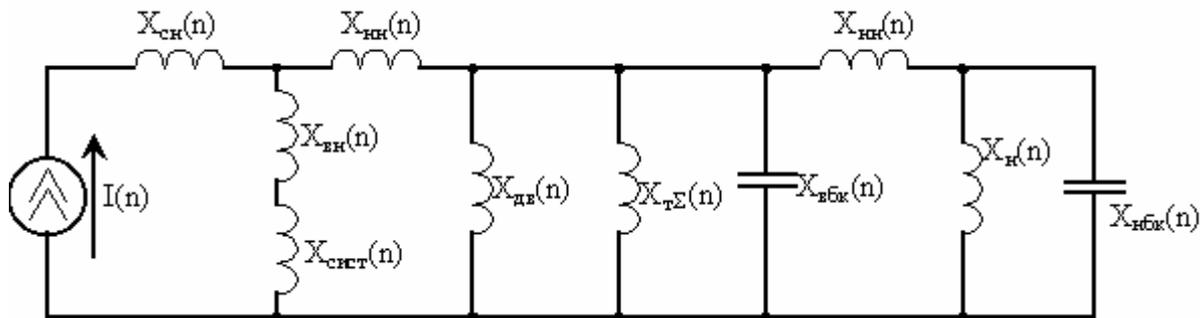


Рис. 3

Условие резонанса в цепи ВБК:

$$X_{В\text{бк}}(n) = X_{рез1}(n) = \left(X_1(n)^{-1} + X_2(n)^{-1} + X_3(n)^{-1} \right)^{-1}$$

где

$$X_1(n) = \left(X_{Н}(n)^{-1} - X_{Н\text{бк}}(n)^{-1} \right)^{-1} + X_{Т1}(n)$$

$$X_2(n) = \left(X_{Т\Sigma}(n)^{-1} + X_{ДВ}(n)^{-1} \right)^{-1}$$

$$X_3(n) = X_{НН}(n) + X_{ВН}(n) + X_{СИСТ}(n)$$

Сравниваем $X_{\text{ВБК}}(n)$ и $X_{\text{рез1}}(n)$ и делаем вывод о возможности возникновения резонанса:

$$\begin{aligned} X_{\text{ВБК}}(2) &= 126.042 \text{ Ом} & X_{\text{ВБК}}(3) &= 84.028 \text{ Ом} & X_{\text{ВБК}}(4) &= 63.021 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез1}}(2) &= 8.465 \text{ Ом} & X_{\text{рез1}}(3) &= 12.802 \text{ Ом} & X_{\text{рез1}}(4) &= 17.352 \text{ Ом} \\ X_{\text{ВБК}}(5) &= 50.417 \text{ Ом} & X_{\text{ВБК}}(7) &= 36.012 \text{ Ом} & X_{\text{рез1}}(5) &= 22.551 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез1}}(7) &= 17.324 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Вывод: резонанс в цепи ВБК на этих частотах не возникнет.

Условие резонанса в цепи НБК:

$$X_{\text{НБК}}(n) = X_{\text{рез2}}(n) = \left(X_{\text{H}}(n)^{-1} + X_4(n)^{-1} \right)^{-1}$$

где $X_4(n) = \left(X_2(n)^{-1} + X_3(n)^{-1} - X_{\text{НБК}}(n)^{-1} \right)^{-1} + X_{\text{T1}}(n)$

Сравниваем $X_{\text{НБК}}(n)$ и $X_{\text{рез2}}(n)$ и делаем вывод о возможности возникновения резонанса:

$$\begin{aligned} X_{\text{НБК}}(2) &= 1260.417 \text{ Ом} & X_{\text{НБК}}(3) &= 840.278 \text{ Ом} & X_{\text{НБК}}(4) &= 630.208 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез2}}(2) &= 117.484 \text{ Ом} & X_{\text{рез2}}(3) &= 176.303 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез2}}(4) &= 235.217 \text{ Ом} \\ X_{\text{НБК}}(5) &= 504.167 \text{ Ом} & X_{\text{НБК}}(7) &= 360.119 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез2}}(5) &= 294.262 \text{ Ом} \\ X_{\text{рез2}}(7) &= 412.924 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Вывод: резонанс в цепи НБК на частотах данных гармоник невозможен.

Определяем суммарное сопротивление сети для каждой гармоники:

$$X_5(n) = \left(X_1(n)^{-1} + X_2(n)^{-1} - X_{\text{ВБК}}(n)^{-1} \right)^{-1}$$

$$X_{\Sigma}(n) = \left[\left(X_{\text{ВН}}(n) + X_{\text{СИСТ}}(n) \right)^{-1} + \left(X_{\text{НН}}(n) + X_5(n) \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma}(2) &= 6.746 \text{ Ом} & X_{\Sigma}(3) &= 10.769 \text{ Ом} & X_{\Sigma}(4) &= 16.016 \text{ Ом} \\ X_{\Sigma}(5) &= 24.753 \text{ Ом} & X_{\Sigma}(7) &= 24.318 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Определяем гармоники напряжения на шинах СН:

$$U(n) = I(n) \cdot X_{\Sigma}(n)$$

$$\begin{aligned} U(2) &= 1.275 \text{ кВ} & U(3) &= 1.356 \text{ кВ} & U(4) &= 1.513 \text{ кВ} \\ U(5) &= 1.871 \text{ кВ} & U(7) &= 1.313 \text{ кВ} \end{aligned}$$

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения для шин СН:

$$K_{\text{УСН}} = \frac{\sqrt{U(2)^2 + U(3)^2 + U(4)^2 + U(5)^2 + U(7)^2}}{U_{\text{НОМ}}} \quad K_{\text{УСН}} = 12.048\%$$

Для определения гармоник напряжения на шинах ВН предварительно находим ток n -ой гармоники в цепи ВН:

$$I_{ВН}(n) = I(n) \cdot \frac{X_{НН}(n) + X_5(n)}{X_{ВН}(n) + X_{СИСТ}(n) + X_{НН}(n) + X_5(n)}$$

Гармоники напряжения на шинах ВН:

$$U_{ВН}(n) = I_{ВН}(n) \cdot X_{СИСТ}(n)$$

$$U_{ВН}(2) = 0.055 \text{ кВ} \quad U_{ВН}(3) = 0.058 \text{ кВ} \quad U_{ВН}(4) = 0.065 \text{ кВ}$$

$$U_{ВН}(5) = 0.08 \text{ кВ} \quad U_{ВН}(7) = 0.056 \text{ кВ}$$

Коэффициент искажения на шинах ВН:

$$K_{U_{ВН}} = \frac{\sqrt{U_{ВН}(2)^2 + U_{ВН}(3)^2 + U_{ВН}(4)^2 + U_{ВН}(5)^2 + U_{ВН}(7)^2}}{U_{НОМ}} \quad K_{U_{ВН}} = 0.516\%$$

Шины НН

$$I_{НН}(n) = I(n) \cdot \frac{X_{ВН}(n) + X_{СИСТ}(n)}{X_{ВН}(n) + X_{СИСТ}(n) + X_{НН}(n) + X_5(n)}$$

$$U_{НН}(n) = I_{НН}(n) \cdot X_5(n)$$

$$U_{НН}(2) = 1.131 \text{ кВ} \quad U_{НН}(3) = 1.255 \text{ кВ} \quad U_{НН}(4) = 1.493 \text{ кВ}$$

$$U_{НН}(5) = 2.035 \text{ кВ} \quad U_{НН}(7) = 1.189 \text{ кВ}$$

$$K_{U_{НН}} = \frac{\sqrt{U_{НН}(2)^2 + U_{НН}(3)^2 + U_{НН}(4)^2 + U_{НН}(5)^2 + U_{НН}(7)^2}}{U_{НОМ}} \quad K_{U_{НН}} = 11.861\%$$

Сравниваем рассчитанные значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения со значениями, указанными в ГОСТе 13109-97.

$$K_{U_{НН}} = 11.861\% \quad K_{U_{СН}} = 12.048\% \quad K_{U_{ВН}} = 0.516\%$$

Нормально допустимые значения:

$$K_{U_{10кВ}} = 5.0\% \quad K_{U_{27.5кВ}} = 4.0\% \quad K_{U_{220кВ}} = 2.0\%$$

Предельно допустимые значения:

$$K_{U_{10кВ}} = 8.0\% \quad K_{U_{27.5кВ}} = 6.0\% \quad K_{U_{220кВ}} = 3.0\%$$

Вывод: качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения соответствует ГОСТу только на шинах ВН.

4.3. Комплекты домашних заданий, контрольных работ.

Комплекты домашних заданий по каждой теме содержат 25-40 задач, которые варьируются случайным образом при выдаче студентам. Ниже приводятся примеры индивидуальных домашних заданий. Полный комплект заданий находится у лектора.

№ 1.1

В результате эксперимента получены следующие оценки числовых характеристик: $M(U)=400$ В; $\sigma(U)=10$ В.

Закон распределения вероятностей – нормальный.

Сделать вывод о соответствии (несоответствии) требованиям ГОСТ 13109-97 отклонений напряжения от номинального $U_n=380$ В.

№ 1.2

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 0,4 кВ при равномерном законе распределения и следующих оценках числовых характеристик: $K_U=1,6\%$; $\sigma(K_U)=0,9\%$; $K_{U11}=2,5\%$; $\sigma(K_{U11})=2\%$.

№ 1.3

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ ГПП, если при нормальном законе распределения вероятностей получены следующие числовые характеристики:

$$K_{2U}=2\%; \quad \sigma(K_{2U})=0,1\%;$$

$$K_{0U}=0,8\%; \quad \sigma(K_{0U})=1,6\%;$$

№ 1.4

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ ГПП, если при равномерном законе распределения вероятностей получены следующие числовые характеристики:

$$\Delta f=0,1 \text{ Гц}; \quad \sigma(\Delta f)=0,1 \text{ Гц}.$$

№ 1.5

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 при подключении к шинам ПГВ напряжением 35 кВ ДСП. При их подключении результаты экспериментальных исследований ПКЭ следующие:

$$\overline{K}_U=2\%; \quad \sigma(K_U)=1\%; \quad \overline{K}_{2U}=0,5\%; \quad \sigma(K_{2U})=1,5\%;$$

Закон распределения вероятностей этих ПКЭ – нормальный.

№ 1.6

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97, если при равномерном законе распределения вероятностей:

$$\overline{K}_{2U}=1\%; \quad \sigma(K_{2U})=0,7\%;$$

$$\overline{K}_{0U}=0,8\%; \quad \sigma(K_{0U})=1,2\%.$$

№ 1.7

В результате контроля качества электроэнергии на шинах 35 кВ подстанции получены при равномерном законе распределения следующие числовые характеристики:

$$\overline{K}_U = 3,5\%, \quad \sigma(K_U)=1\%;$$

$$\overline{K}_{2U} = 1,7\%, \quad \sigma(K_{2U})=0,8\%;$$

Проверить их соответствие требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.8

В результате контроля качества электроэнергии в точке общего присоединения получены следующие значения показателей КЭ при нормальном законе распределения:

$$\overline{P}_S = 1,2; \quad \sigma(P_S)=0,5; \quad \overline{\delta U}_t = 4,3\%; \quad \sigma(\delta U_t)=3\% \text{ при частоте колебаний } 2 \text{ мин}^{-1}.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.9

В результате контроля качества электроэнергии в точке общего присоединения получены следующие значения показателей КЭ при нормальном законе распределения:

$$\overline{\delta U_y} = 3,9\%; \quad \sigma(\delta U_y) = 1,5\%.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.10

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 при равномерном законе распределения и следующих оценках числовых характеристик:

$$\Delta f = 0,15 \text{ Гц}, \quad \sigma(\Delta f) = 0,1 \text{ Гц}.$$

№ 1.11

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97. Исходные данные:

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}, \quad U = 9,9 \text{ кВ}, \quad \sigma(U) = 0,1 \text{ кВ}, \quad \text{закон распределения – равномерный}.$$

№ 1.12

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97 на шинах РП-6 кВ при следующих результатах экспериментального исследования:

$$\overline{K_U} = 2\% \quad D(K_U) = 4\%^2$$

$$\overline{U_5} = 1\% \quad D(U_5) = 4\%^2$$

$$\overline{U_7} = 1\% \quad D(U_7) = 9\%^2$$

№ 1.13

Определить соответствие напряжения требованиям ГОСТ 13109-97, если в результате эксперимента получены следующие числовые характеристики при нормальном законе распределения вероятностей:

$$\overline{U} = 370 \text{ В} \quad D(U) = 100 \text{ В}^2$$

№ 1.14

В результате эксперимента получены следующие оценки числовых характеристик:

$$M(U) = 10,2 \text{ кВ}$$

$$\sigma(U) = 0,2 \text{ кВ}$$

Закон распределения вероятностей – нормальный.

Сделать вывод о соответствии качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.15

В результате эксперимента получены следующие оценки числовых характеристик:

$$M(U) = 9,8 \text{ кВ}$$

$$\sigma(U) = 0,4 \text{ кВ}$$

Закон распределения вероятностей – равномерный.

Оценить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.16

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ при равномерном законе распределения и следующих оценках числовых характеристик:

$$K_{U3} = 2,4\%; \quad \sigma(K_{U3}) = 0,7\%;$$

$$K_{U5} = 4\%; \quad \sigma(K_{U5}) = 0,4\%.$$

№ 1.17

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ при нормальном законе распределения и следующих оценках числовых характеристик:

$$K_{U7} = 3,1\%; \quad \sigma(K_{U7}) = 0,5\%;$$

$$K_{U13} = 2,8\%; \quad D(K_{U13}) = 1\%^2.$$

№ 1.18

В результате контроля качества электроэнергии в точке общего присоединения получены следующие значения показателей КЭ при нормальном законе распределения:

$$\overline{P_S} = 1,1; \quad \sigma(P_S) = 0,3; \quad \overline{\delta U_t} = 2,7\%; \quad \sigma(\delta U_t) = 0,5\% \text{ при частоте колебаний } 10 \text{ мин}^{-1}.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.19

В результате контроля качества электроэнергии в точке общего присоединения получены следующие значения показателей КЭ при равномерном законе распределения:

$$\overline{P_S} = 1; \quad \sigma(P_S) = 0,2; \quad \overline{\delta U_t} = 1,5\%; \quad \sigma(\delta U_t) = 0,1\% \text{ при частоте колебаний } 5 \text{ мин}^{-1}.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.20

В результате контроля качества электроэнергии на шинах 10 кВ получены следующие значения показателей КЭ при нормальном законе распределения:

$$\overline{\delta U_y} = 4,1\%; \quad \sigma(\delta U_y) = 0,9\%.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.21

В результате контроля качества электроэнергии на шинах 0,4 кВ получены следующие значения показателей КЭ при равномерном законе распределения:

$$\overline{\delta U_y} = 3,5\%; \quad D(\delta U_y) = 1,2\%^2.$$

Определить соответствие качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-97.

№ 1.22

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ ГПП, если при равномерном законе распределения вероятностей получены следующие числовые характеристики:

$$\Delta f = 0,15\%; \quad \sigma(\Delta f) = 0,11\%.$$

№ 1.23

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ ГПП, если при равномерном законе распределения вероятностей получены следующие числовые характеристики:

$$\Delta f = 0,24\%; \quad D(\Delta f) = 0,09\%^2.$$

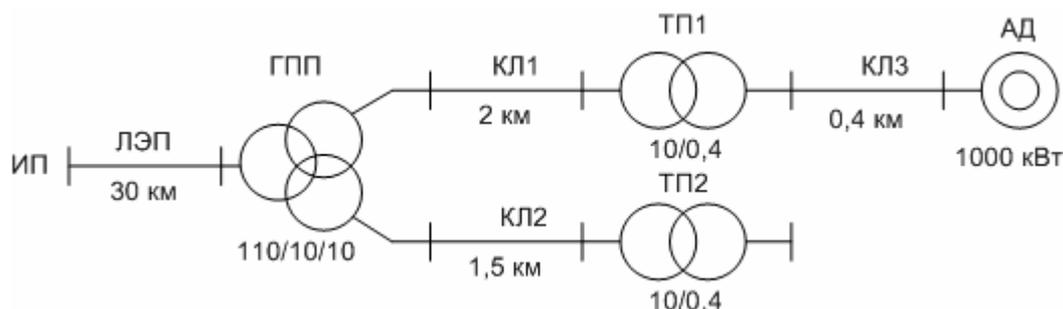
№ 1.24

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 на шинах 10 кВ ГПП, если при равномерном законе распределения вероятностей получены следующие числовые характеристики:

$$\begin{aligned} K_{U11} &= 2\%; & \sigma(K_{U11}) &= 1\%; \\ K_U &= 3\%; & \sigma(K_U) &= 0,6\%. \end{aligned}$$

№ 2.1

Определить отклонение напряжения на шинах низкого напряжения ТП2 и зажимах электроприемника (АД).



Исходные данные:

Напряжение в ИП ЛЭП 110 кВ max: $0,95U_{ном}$ min: $1,1U_{ном}$
АС – 185

Трансформатор ГПП ТРДН 40000 кВА

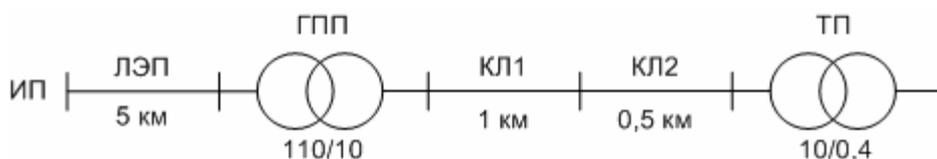
Кабельная линия КЛ1 - ААШВ 3*150
КЛ2 - ААШВ 3*120
КЛ3 - ААШВ 3*95

Трансформаторы ТП1 – ТМ 2500 кВА
ТП2 – ТП 1000 кВА

Коэффициент загрузки трансформаторов $k_{зmax}=0,65$; $k_{зmin}=0,6$; $\cos \varphi = 0,8$.

№ 2.2

Определить отклонение напряжения на шинах низкого напряжения ТП.



Исходные данные:

Напряжение в ИП ЛЭП 110 кВ max: $0,9U_{ном}$ min: $0,95U_{ном}$
АС – 120

Трансформатор ГПП ТДН 25000 кВА

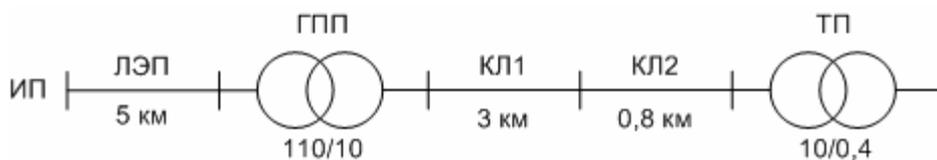
Кабельная линия КЛ1 - ААШВ 3*95
КЛ2 - ААШВ 3*70

Трансформаторы ТП – ТМ 2500 кВА

Коэффициент загрузки трансформаторов $k_{зmax} = 0,7$; $\cos \varphi = 0,7$;
 $k_{зmin} = 0,6$

№ 2.3

Определить отклонение напряжения на шинах низкого напряжения ТП.



Исходные данные:

Напряжение в ИП ЛЭП 110 кВ max: $1,03U_{ном}$ min: $U_{ном}$
АС – 150

Трансформатор ГПП ТДН 32000 кВА

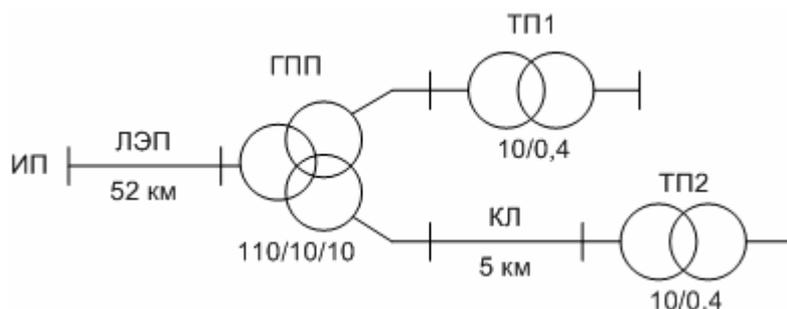
Кабельная линия КЛ1 - ААШВ 3*120
КЛ2 - ААШВ 3*95

Трансформаторы ТП ТМ 2500 кВА

Коэффициент загрузки трансформаторов $k_з = 0,6$; $\cos \varphi = 0,75$;

№ 2.4

Определить отклонение напряжения на шинах низкого напряжения ТП.

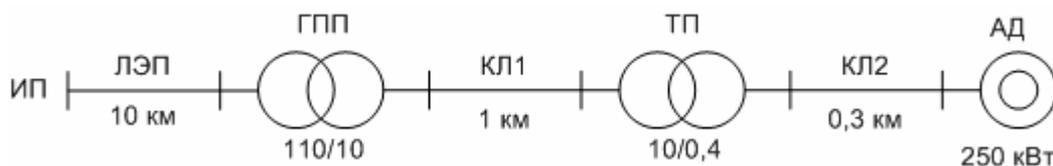


Исходные данные:

Напряжение в ИП	max: $1,02U_{\text{ном}}$	min: $0,98U_{\text{ном}}$
ЛЭП 110 кВ	АС – 185	
Трансформатор ГПП	ТРДН 40000 кВА	
Кабельная линия	КЛ - ААШВ 3*120	
Трансформаторы ТП1	ТМ 1000 кВА	
ТП2	ТМ 2500 кВА	
Коэффициент загрузки трансформаторов	$k_{\text{зmax}} = 0,55; \cos \varphi_{\text{max}} = 0,8;$	
	$k_{\text{зmin}} = 0,3; \cos \varphi_{\text{min}} = 0,85.$	

№ 2.5

Определить отклонение напряжения на шинах низкого напряжения ТП при отключенном двигателе и на зажимах электродвигателя при его работе.

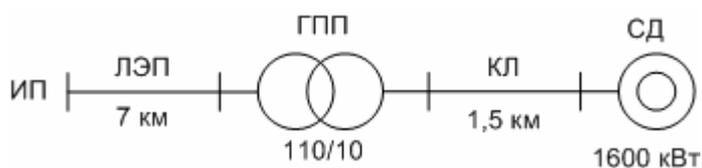


Исходные данные:

Напряжение в ИП	max: $1,05U_{\text{ном}}$	min: $1,02U_{\text{ном}}$
ЛЭП 110 кВ	АС – 95	
Трансформатор ГПП	ТДН 16000 кВА	
Кабельная линия	КЛ1 - ААШВ 3*70	
	КЛ2 - ААШВ 3*70	
Трансформаторы ТП	ТМ 1600 кВА	
Коэффициент загрузки трансформаторов	$k_{\text{зmax}} = 0,6; \cos \varphi = 0,7;$	
	$k_{\text{зmin}} = 0,4$	

№ 2.6

Определить отклонение напряжения на зажимах СД.

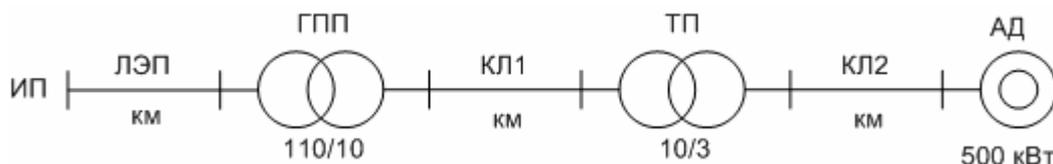


Исходные данные:

Напряжение в ИП max: $1,05U_{\text{ном}}$ min: $0,95U_{\text{ном}}$
 ЛЭП 110 кВ АС – 70
 Трансформатор ГПП ТДН 16000 кВА
 Кабельная линия КЛ - ААШВ 3*70
 Коэффициент загрузки трансформаторов $k_{\text{зmax}} = 0,8$; $\cos \varphi = 0,7$;
 $k_{\text{зmin}} = 0,4$
 $\cos \varphi_{\text{д}} = 0,75$

№ 2.7

Определить отклонение напряжения на зажимах АД.

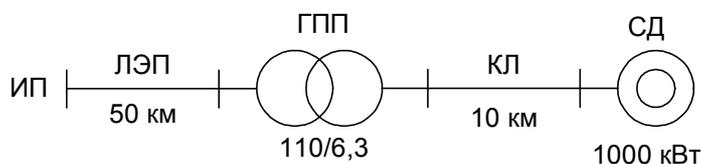


Исходные данные:

Напряжение в ИП max: $1,05U_{\text{ном}}$ min: $U_{\text{ном}}$
 ЛЭП 110 кВ АС – 95
 Трансформатор ГПП ТДН 25000 кВА
 РП ТМ 2500 кВА
 Кабельная линия КЛ1 - ААШВ 3*70
 КЛ2 - ААШВ 3*50
 Коэффициент загрузки трансформаторов $k_{\text{зmax}} = 0,9$; $\cos \varphi = 0,75$;
 $k_{\text{зmin}} = 0,5$

№ 2.8

Определить отклонение напряжения на зажимах СД.

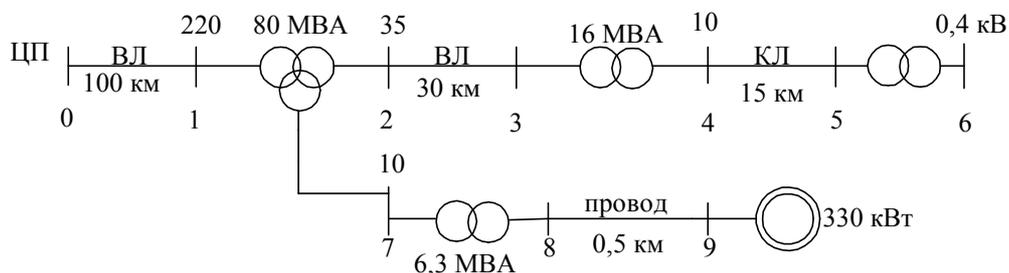


Исходные данные:

Напряжение в ИП max: $1,05U_{\text{ном}}$ min: $U_{\text{ном}}$
 ЛЭП 110 кВ АС – 120
 Трансформатор ГПП ТДН 25000 кВА
 Кабельная линия КЛ - ААШВ 3*95
 Коэффициент загрузки трансформаторов $k_{\text{зmax}} = 0,85$; $\cos \varphi = 0,8$;
 $k_{\text{зmin}} = 0,45$

№ 2.9

Выбрать закон регулирования напряжения в схеме в минимальном режиме.

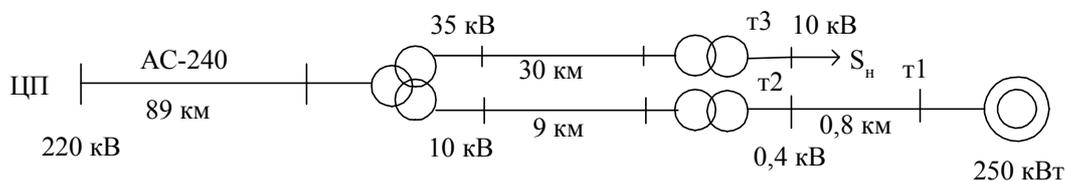


Значения δU_y в точках схемы:

0: $1,1U_{\text{НОМ}}$; 1: $1,09U_{\text{НОМ}}$; 2: $1,07U_{\text{НОМ}}$; 3: $1,05U_{\text{НОМ}}$;
 4: $U_{\text{НОМ}}$; 5: $0,94U_{\text{НОМ}}$; 6: $0,9U_{\text{НОМ}}$; 7: $1,05U_{\text{НОМ}}$;
 8: $1,01U_{\text{НОМ}}$; 9: $U_{\text{НОМ}}$.
 $k_{\text{ЗТ}}=0,6$; $tq\varphi=0,5$

№ 2.10

Определить отклонение напряжения в точках, указанных на схеме и сделать вывод о целесообразности регулирования напряжения.



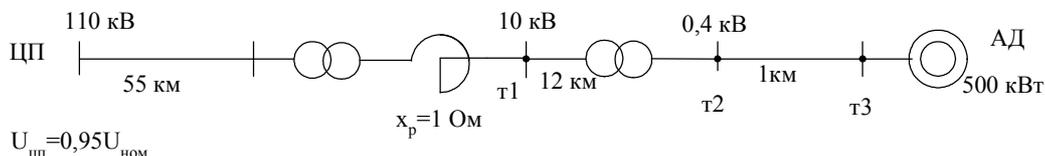
$$U_{\text{ЦП}}=1,02U_{\text{НОМ}}$$

В режиме максимальных нагрузок мощность нагрузки трансформатора 220/35/10 кВ составляет $56+j15$ МВА, трансформатора 35/10 кВ – $6+j1,5$ МВА, трансформатора 10/0,4 кВ – $0,7+j0,3$ МВА.

В режиме минимальных нагрузок мощность нагрузки трансформатора 220/35/10 кВ составляет $42+j10$ МВА, трансформатора 35/10 кВ – $4+j1$ МВА, трансформатора 10/0,4 кВ – $0,5+j0,1$ МВА.

№ 2.11

Определить отклонение напряжения в точках, указанных на схеме и сделать вывод о целесообразности регулирования напряжения.

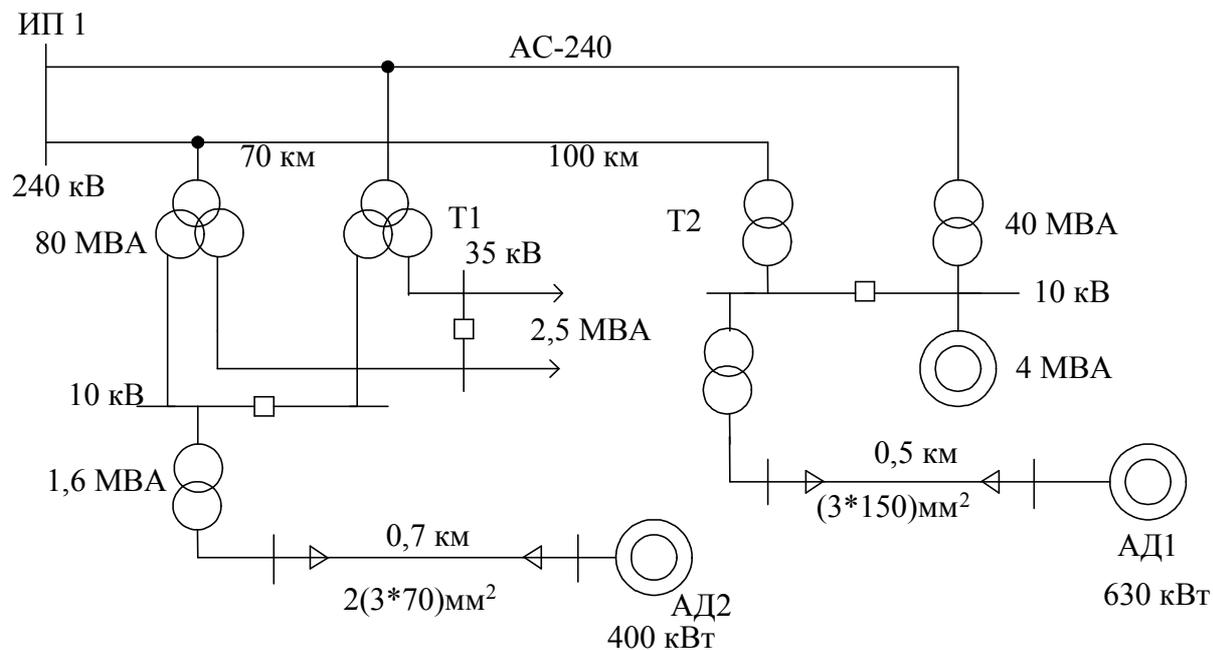


$$U_{\text{ЦП}}=0,95U_{\text{НОМ}}$$

В режиме минимальных нагрузок загрузка трансформатора 110/10 кВ составляет $0,3S_{\text{нагр}}$ в максимальном режиме, которая равна $33+j10$ МВА; загрузка трансформатора 10/0,4 кВ – $1+j0,3$ МВА, причем отношение $S_{\text{max}}/S_{\text{min}}=1,4$.

№ 2.12

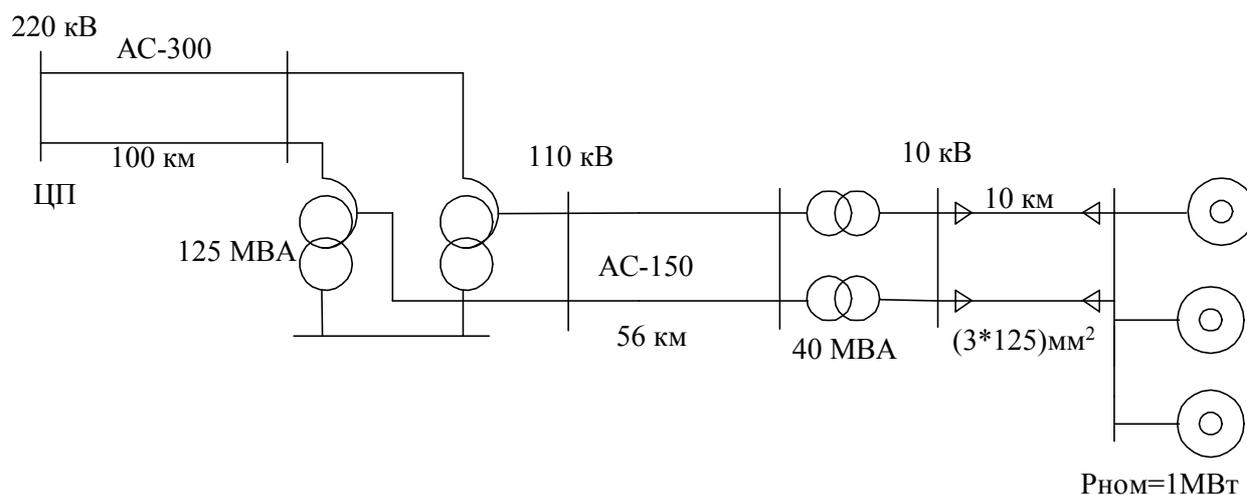
Определить отклонение напряжения на зажимах АД1 (АД2).



$k_{3T1}=0,6; \quad t_{q\varphi}=0,4$
 $k_{3T2}=0,7; \quad t_{q\varphi}=0,45$

№ 2.13

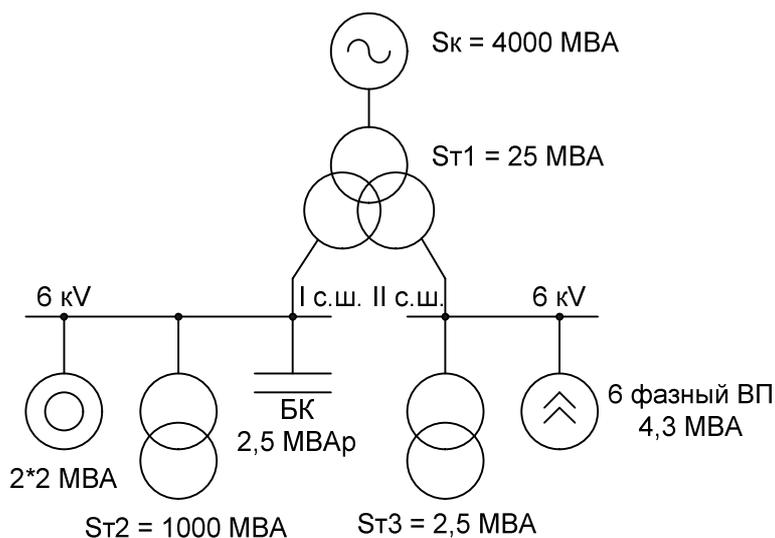
Определить отклонение напряжения на зажимах электроприемников и предложить меры, необходимые для выполнения ГОСТ13109-97.



$U_{ЦП}=1,05U_{НОМ};$ $k_{3AT}=0,6;$ $k_{3CT}=0,65;$
 $\cos\varphi_{AT}=0,85;$ $\cos\varphi_{CT}=0,83.$

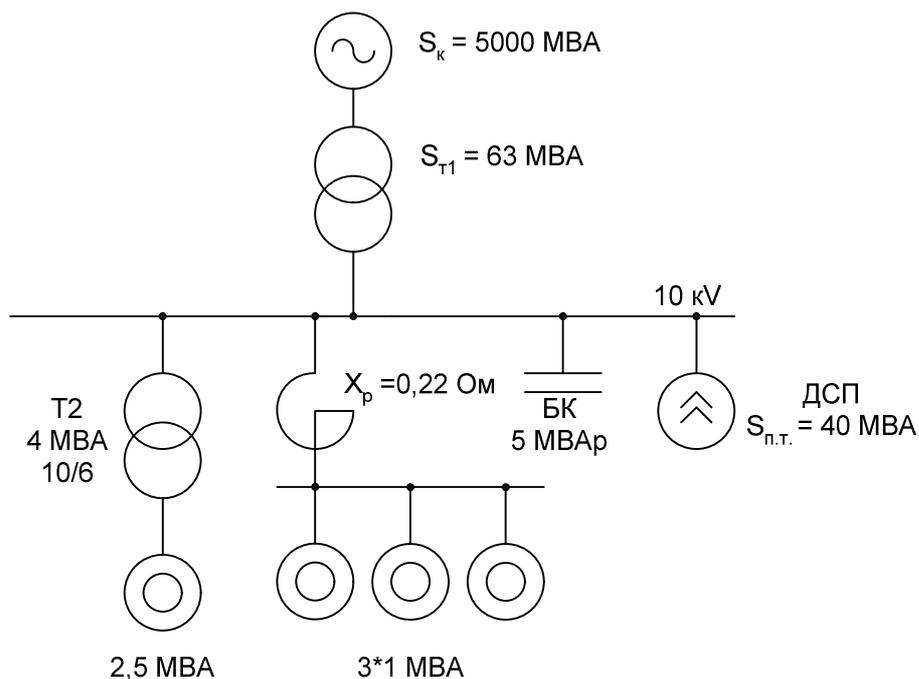
№ 3.1

Определить напряжения гармоник и K_U на I (II) с.ш. 6 кВ при включении и отключении БК. Проверить возможность резонанса и определить резонансную частоту. $U_{ном сист.} = 110$ кВ.



№ 3.2

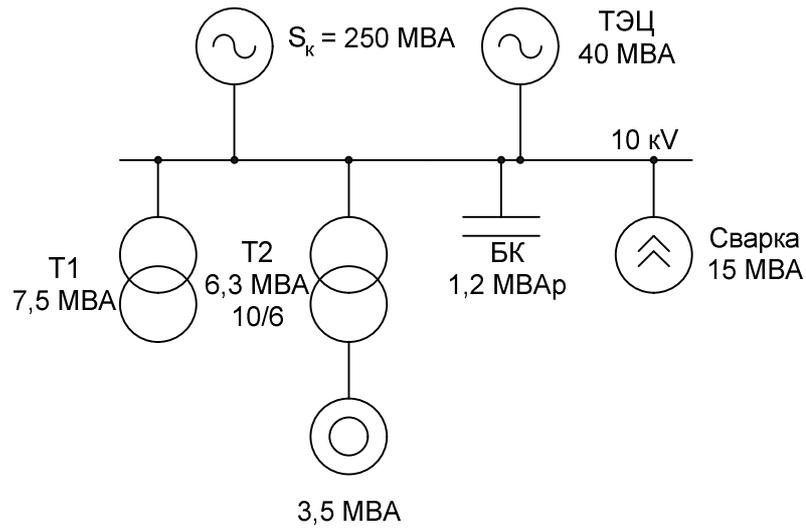
Определить перегрузку БК по току и напряжению и K_U на шинах 10 кВ (110 кВ). $U_{ном сист.} = 110$ кВ.



№ 3.3

Определить K_U на шинах 10 кВ (на зажимах АД) при включении и отключении БК, номер гармоники, на которой возможен резонанс.

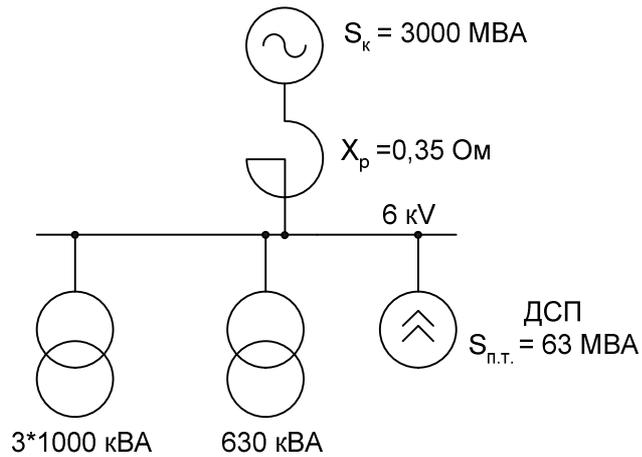
$U_{\text{ном сист}} = 110$ кВ.



№ 3.4

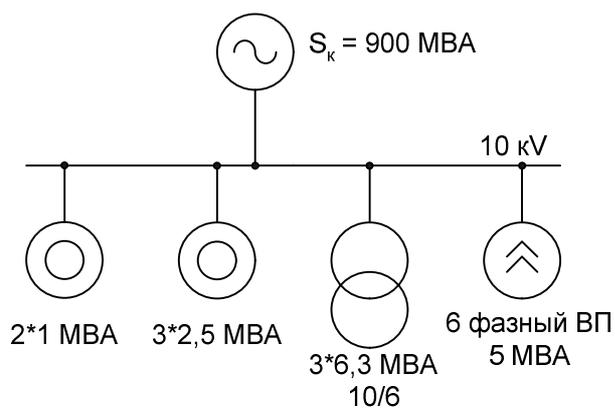
Определить напряжения гармоник и K_U на шинах 6 кВ.

$U_{\text{ном сист}} = 220$ кВ.



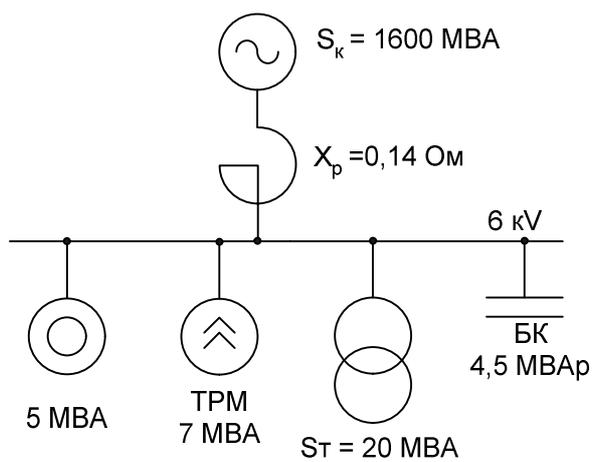
№ 3.5

Определить токи и напряжения ВГ и K_U на шинах 10 кВ.
 $U_{\text{ном сист}} = 35 \text{ кВ}$.



№ 3.6

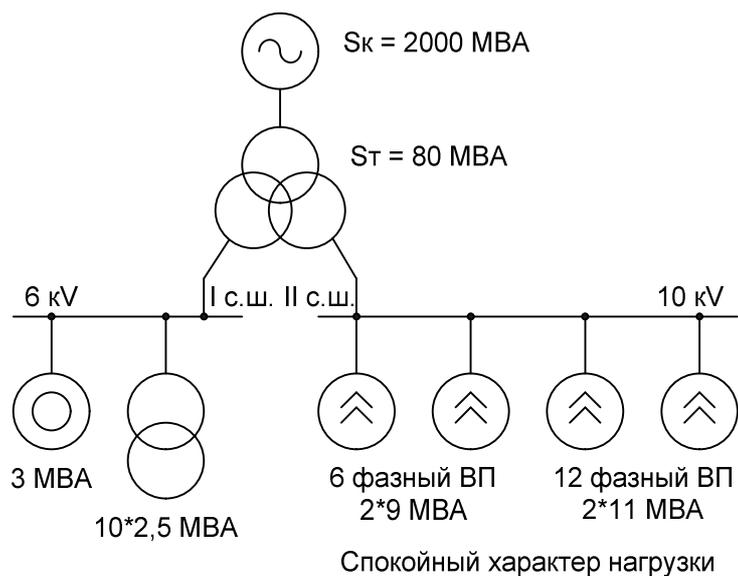
Определить K_U , перезагрузку БК по току и напряжению, номер гармоники на которой возможен резонанс.
 $U_{\text{ном сист}} = 110 \text{ кВ}$.



№ 3.7

Определить K_U на шинах 10 кВ (6 кВ, 220 кВ).

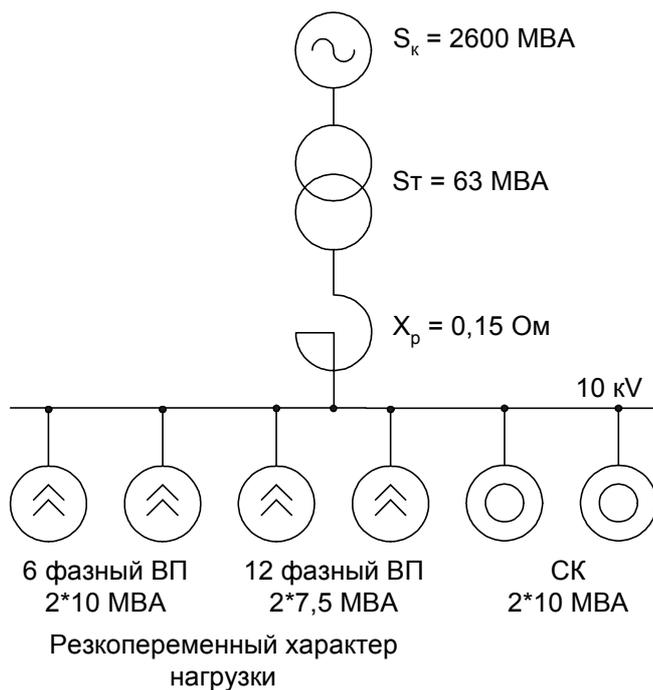
$U_{\text{ном сист}} = 220 \text{ кВ}$.



№ 3.8

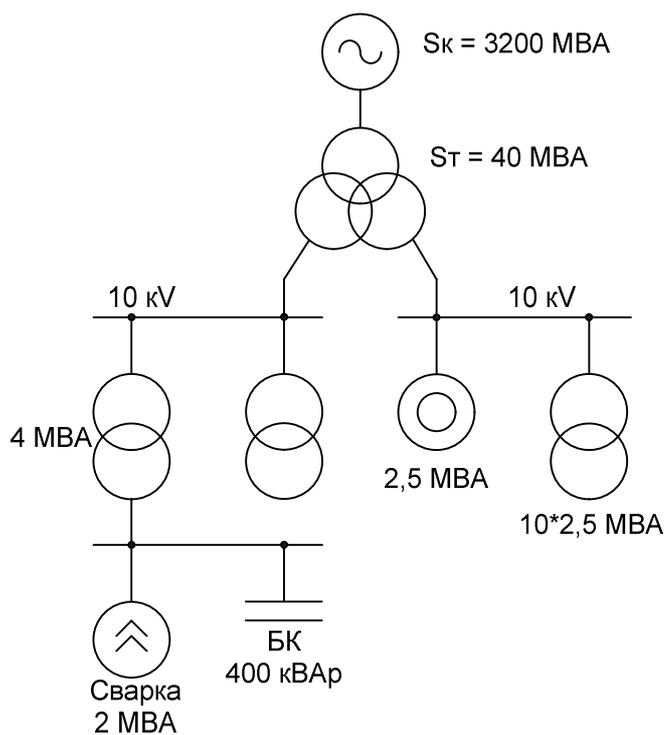
Определить K_U на шинах 10 кВ (110 кВ).

$U_{\text{ном сист}} = 110 \text{ кВ}$.



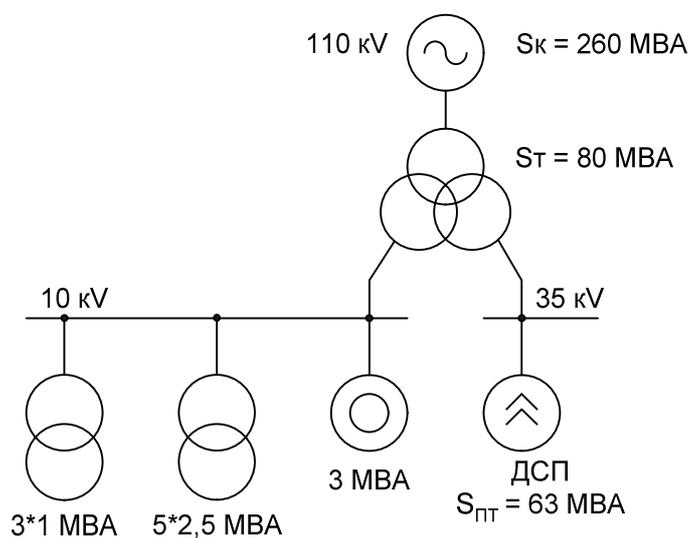
№ 3.9

Определить K_U на шинах 10 кВ (0,4 кВ, 220 кВ) и перегрузку БК.
 $U_{\text{ном сист}} = 220 \text{ кВ}$.



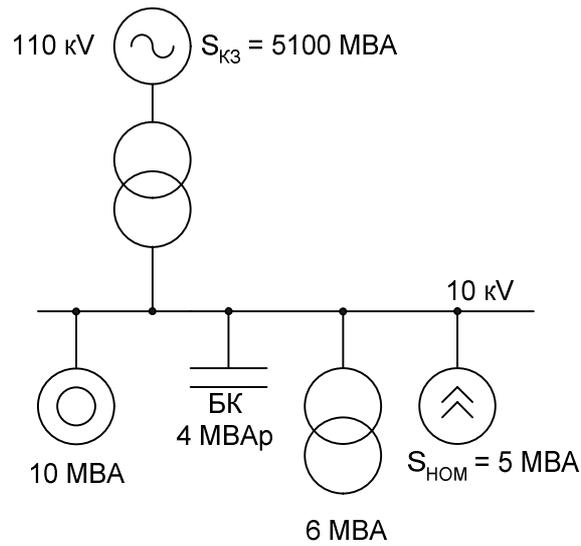
№ 3.10

Определить K_U на шинах 10 кВ (35 кВ, 110 кВ) и перегрузку БК.



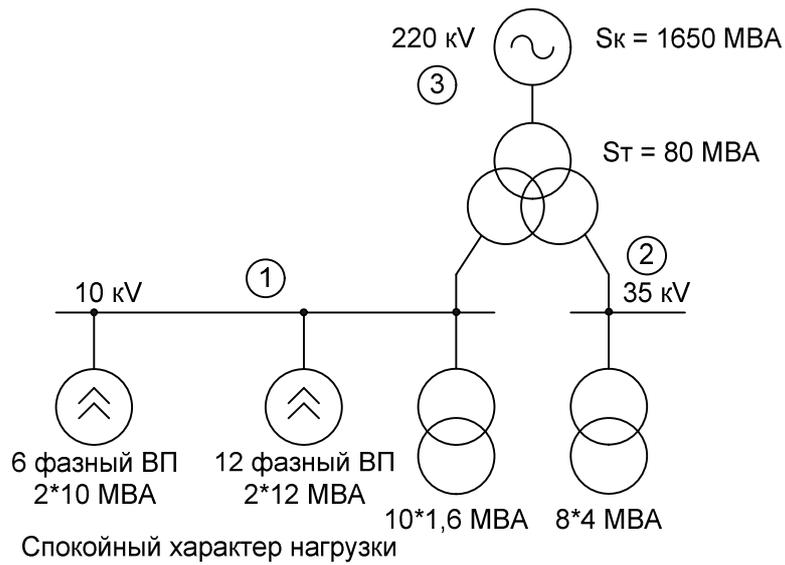
№ 3.11

Определить K_U на шинах 10 кВ (110 кВ) и перегрузку БК.



№ 3.12

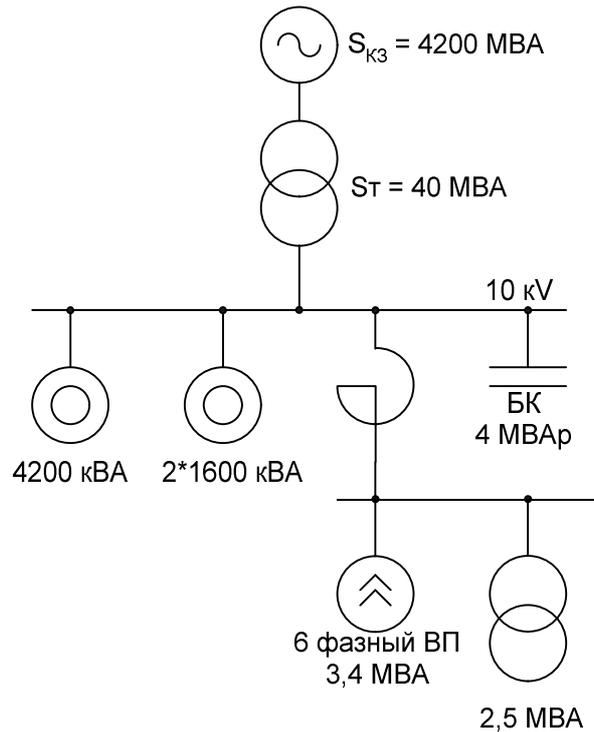
Определить K_U в точках 1, 2, 3. Характер нагрузки спокойный.



№ 3.13

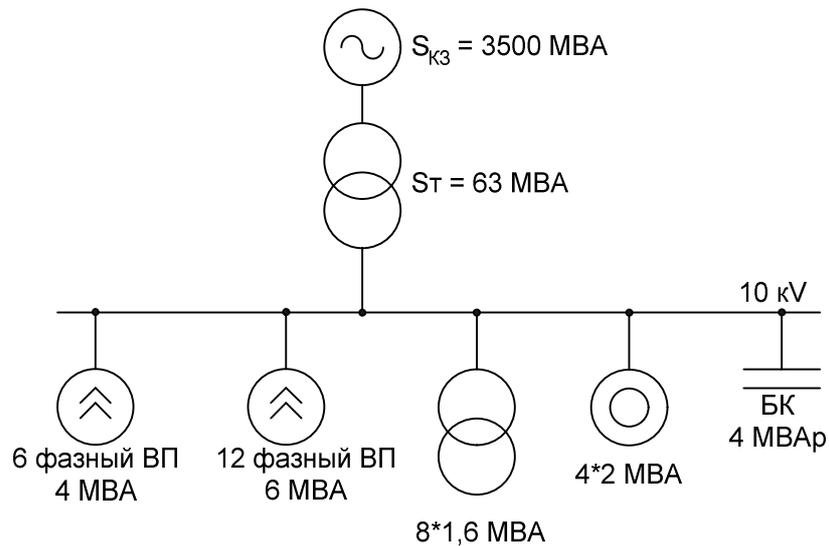
Определить K_U на шинах 10 кВ (220 кВ) и коэффициент перегрузки БК по напряжению.

$U_{\text{ном сист}} = 220 \text{ кВ}$.



№ 3.14

Определить K_U на шинах 10 кВ (110 кВ) и перегрузку БК. $U_{\text{ном сист}} = 110 \text{ кВ}$.



Задания на контрольную работу студентов заочной и сокращенной форм обучения также формируются из подобных заданий.

5. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины

При изучении дисциплины «Качество электроэнергии» целесообразно пользоваться следующими программными продуктами:

MathCad; Visio; СДО-6; RASTR; Exsel.

Все выше перечисленные ПВК широко используются в практической деятельности выпускников и изучаются ранее.

6. Методические указания по применению современных информационных технологий

Состав информационных технологий, используемых при изучении дисциплины «Качество электроэнергии»:

1. Презентации лекций, слайды, каталоги с техническими характеристиками оборудования, улучшающего качество электроэнергии – 3 компакт диска.
2. Электронные схемы Амурской энергосистемы, ОЭС Востока, г. Благовещенска.
3. Схемы, рисунки, таблицы под медиакомплекс.
4. Лазерные пленки к проектоскопу – 16 штук.
5. Комплект индивидуальных заданий по дисциплине.
6. Промышленные программно-вычислительные комплексы «СДО-6», "RASTR", пакет автоматизации математических расчетов «MathCad».
7. Комплексы результатов измерения показателей качества электроэнергии с программным обеспечением ИВК «Омск», «Ресурс» с 2001 г. по Амурской энергосистеме, заводу «Амурметалл».

К информационной составляющей УМК относятся учебники, учебные пособия методические разработки. Т.е. их электронные издания (ИЭ). Информационная составляющая является электронным аналогом с:

возможностью использования наряду со статическими текстами и изображениями мультимедийных ресурсов (звука и видео);

наличием встроенных средств навигации, позволяющих пользователю переходить к основной странице издания, предыдущей, следующей странице издания, просмотреть оглавление всего издания или его раздела;

возможность оперативного внесения изменений после публикации.

Электронные издания существуют в различных представлениях. Возможно представление изданий в формате текстового процессора, например Word, публикация издания в переносимом формате, например Adobe PDF. Следующей формой публикации ЭИ является публикация во Всемирной паутине в формате HTML с использованием других технологий, например CSS для стилизового оформления, динамического HTML – для создания динамических документов, Macromedia Flash для анимации.

ЭИ допускает многовариантное представление с различной функциональностью для работы с помощью различных пользовательских агентов. Состав версий ЭИ обеспечивает работу с ним на персональном компьютере и распечатку его на бумаге. Электронное представление ЭИ позволяет хранить его на любых электронных носителях и доставлять через сеть.

Разница проведения практических занятий при очном и дистанционном видах обучения определяется организацией взаимодействия между обучаемым и преподавателем, а также степенью взаимодействия между обучаемыми. В очном образовании преподаватель может управлять ходом решения задач в реальном времени, направляя обучаемых, комментируя и объясняя типичные ошибки. Взаимодействие между обучаемыми позволяет

быстрее находить решения, кроме того, обучаемые получают опыт совместной работы. В заочном образовании, обучаемый получает комплект, состоящий из задачника, задания, методических указаний, примеров решения задач, справочных материалов. Участие преподавателя сводится к проверке полученных по почте решений. Дистанционный вариант проведения практических занятий отличается от заочного возможностью оперативного общения между обучаемыми и преподавателем.

Способы общения между преподавателем и обучаемыми в заочной и сокращенной заочной формах обучения:

общение по электронной почте – этот способ является предпочтительным, позволяя его участникам читать и подготавливать сообщения в удобное для них время;

общение через web-форумы, организуемые на web-серверах учебного заведения;

общение с помощью служб мгновенных сообщений и чатов.

Способ доставки учебного контента: лично; по почте; электронные средства доставки (ftp, http, E-mail); комбинированные средства доставки.

Средства взаимодействия между преподавателем и обучаемыми вынесены из состава УМК, например электронную почту, форумы, чаты целесообразно совместно использовать под несколько ЭУМК.

7. Контроль качества образования

7.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов.

В процессе изучения дисциплины используются следующие виды контроля знаний студентов:

входной контроль;

текущий контроль;

рубежный контроль;

экзаменационный (итоговый) контроль;

самоконтроль знаний.

Виды и цели контроля

Входной контроль зависит от цели обучающего курса и его специфики. Он определяет готовность студента к работе по курсу (роль допуска к обучению), выполняет диагностические функции, выявляет пробелы в знаниях, компенсируемые процессом дополнительного обучения. Обучающий курс становится адаптивным (каждый учащийся идет своим путем в зависимости от его начального уровня). Работа по тестовым заданиям настраивает студента на предметную область, вводит в терминологию, способствует актуализации знаний, становится стартовой площадкой для новой темы. Обычно входной контроль редок (вступительные экзамены, допуск к лабораторной работе), но при компьютеризации обучения его частота повышается.

Текущий контроль – диагностика знаний, умений и навыков (ЗУН) и коррекция обучения в процессе усвоения темы, позволяющая исправлять недостатки обучения и достигать необходимого уровня его усвоения.

Рубежный контроль – это проверка уровня усвоения очередного раздела курса. Студенту предлагается творческая задача, задача повышенной сложности или задача, предусматривающая перенос усвоенных знаний на другой материал. Успешное решение задачи показывает, что учащийся овладел всей системой знаний и действий, предусмотренных целями обучения по данной теме. Рубежная проверка позволяет

обучаемому запрашивать необходимый справочный или информационный материал, советы, разъяснения ошибок, наводящие вопросы. Задания должны быть адекватны этапу познавательной деятельности, элементу которого соответствует серия нескольких заданий. Рубежный контроль может быть входным для изучения последующего материала и поддержки уровня знаний при перерывах в обучении, что характерно для студентов заочной и сокращенной заочной форм. Итогом рубежного контроля являются результаты контрольных точек.

Экзаменационный (итоговый) контроль. Если проверка исходного уровня – «входной» контроль, то заключительный контроль показывает полученные результаты «на выходе». Он представляет собой серию заданий по всему материалу, которую обучаемый должен решить самостоятельно. По результатам экзаменационного контроля учащийся получает отметку.

Самоконтроль знаний – наиболее простой вид. Обычно это вопросы и задачи, на которые учащийся пытается ответить самостоятельно. При затруднении он может обратиться к учебнику и найти в нем ответы. Основная цель самоконтроля – самоутверждение, достижение уверенности в усвоении учебного материала, хотя это может и не соответствовать действительности.

Таким образом, основные цели разных видов контроля следующие: самоутверждение; готовность к изучению нового материала; проверка уровня усвоения; поддержка адаптивного обучения и уровня знаний; формирование базы оценок для определения рейтинга обучаемых. Программные средства контроля знаний должны обеспечивать все стадии его проведения: от идентификации до выдачи результатов.

Контроль (диагностика) знаний, умений, навыков (ЗУН) включает в себя выполнение некоторого множества заданий, характеризующихся трудностью и сложностью. Трудность задания определяется уровнем усвоения, на диагностику которого оно направлено. Сложность характеризуется числом существенных операций в нем, в т.ч. и свернутых.

Педагогически корректное задание для контроля знаний студентов должно быть: содержательно валидным (построенным на содержании предшествующего обучения); функционально валидным (проверка того, для чего его используют); объективным; однозначным; специфичным (требующим конкретных ЗУН, а не общей эрудиции); способным разделить учащихся на знающих и незнающих.

Подбор заданий в группу основан на репрезентативности (полноте охвата дисциплины или ее раздела ограниченной выборкой); однородности (равноценности содержания и трудности наборов заданий); рандомизации (гарантии не предъявления одного и того же набор заданий).

Входной контроль выполняется в виде тестовых заданий. Формами текущего контроля являются блиц-опрос студентов на каждой лекции по пройденному материалу (5-7 минут), опрос на практических занятиях, защита индивидуальных домашних заданий, рефераты.

Рубежный контроль предусматривает выполнение контрольных работ, комплексных заданий, направленных на проверку эвристических способностей студентов, углубленного изучения материала, коллоквиум.

Итоговый контроль – это экзамен по дисциплине. Экзаменационный билет должен включать два теоретических вопроса и задачу. Предусмотрено три типа сложности задач: простой, средней и повышенной сложности. Студенту предлагается выбор задачи по сложности в зависимости от того, на какую оценку он претендует. Если студент не справляется с задачей средней или повышенной сложности, то предлагается простая задача, отсутствие решения которой приводит к неудовлетворительной оценке на экзамене.

Рекомендуется при оценке знаний студентов на экзамене учитывать его работу в семестре.

7.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний по дисциплине.

Входной контроль

Для входного контроля предусмотрен комплект тестов, варианты из которого формируются с помощью генератора случайных чисел. Ниже приведен пример теста входного контроля.

Тест №1

1. Электрическая сеть – это ... (дополнить)
2. В двухобмоточном трансформаторе:
 - а) устройство РПН расположено в обмотке ВН, а регулируется напряжение на стороне НН
 - б) устройство РПН расположено в обмотке НН и регулируется напряжение на стороне НН
 - в) устройство РПН расположено в обмотке НН и регулируется напряжение на стороне ВН(выбрать правильный ответ)
3. Потеря напряжения – это
 - а) алгебраическая разность между напряжениями начала и конца ветви
 - б) геометрическая разность между напряжениями начала и конца ветви
 - в) алгебраическая разность между напряжениями начала ветви и номинальным напряжением(выбрать правильный ответ)
4. Система бесконечной мощности – это ... (дополнить)
5. Разложение в ряд Фурье предусматривает выделение в кривой напряжения (тока) ... (продолжить)

Критерии оценки

Если правильно отвечено на все вопросы – отлично, на четыре вопроса – хорошо, три вопроса – удовлетворительно, менее трех вопросов – неудовлетворительно.

Полный комплект тестов входного контроля находится на кафедре у лектора.

Текущий контроль

Тестовое задание №1

1. Задачи эксплуатационного контроля КЭ
2. Определение возможного диапазона изменения напряжения у потребителя

Тестовое задание №2

1. Влияние низкого КЭ на работу асинхронного двигателя
2. Определение совместимости требуемых отклонений напряжения в характерных режимах (по предельно допустимым отклонениям напряжения)

Расчетное задание №1

Рассчитайте параметры ненастроенного фильтра, если $K_U = 6\%$; $U_{11} = 10\%$; $U_{13} = 8\%$; $S_{НЛ} = 8\text{МВА}$; $S_{КЗ} = 250\text{МВА}$.

Расчетное задание №2

Определить коэффициент обратной последовательности для сети, к которой подключены печи ЭСП мощностью 4 МВА, $\cos\varphi=0.8$.

На «АВ» - 2 печи; «ВС» - 1 печь; «СА» - 2 печи. $S_{КЗ} = 200\text{МВА}$.

Расчетное задание №3

Проверить выполнение требований ГОСТ 13109-97 по несимметрии напряжения, если при равномерном законе вероятностей:

$K_{0U} = 0,8\%$; $K_{2U} = 1,4\%$; $S(K_{0U}) = 1\%$; $S(K_{2U}) = 0,6\%$.

Расчетное задание №4

К шинам ТП 10/0,4 кВ подключены машины контактной электросварки:

$5 \times 700\text{кВА}$; $3 \times 400\text{кВА}$; $10 \times 200\text{кВА}$. $k_3 = 0,8$; $\text{tg}\varphi = 0,5$.

Длина кабеля, питающего сварку от ТП равна 800 м. Определить искажение качества электроэнергии на шинах ТП и сделать вывод о возможности подключения осветительной нагрузки.

Полный комплект тестовых и расчетных заданий хранится на кафедре.

Рубежный контроль

Контрольная работа №1 на тему «Нормативно-правовое обеспечение КЭ».

Контрольная работа №2 на тему «Расчет показателей КЭ».

Коллоквиум по материалу, вынесенному на самостоятельную работу «Экономические аспекты качества электроэнергии».

7.3. Экзаменационный контроль.

Вопросы к экзамену

1. Понятие качества электроэнергии. Сущность проблемы качества электроснабжения.
2. Номенклатура ПКЭ.
3. Нормирование отклонений и колебаний напряжения.
4. Нормирование несинусоидальности и несимметрии напряжения.
5. Основные определения качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
6. Правовое и методическое обеспечение проблемы качества электроэнергии.
7. Нормирование электромагнитных помех.
8. Вспомогательные показатели качества электроэнергии.
9. Влияние отклонений напряжения на работу эл. сетей и электроприемников, технологических процессов.

10. Влияние колебаний напряжения на работу силовых элементов и автоматических устройств, технологических установок.
11. Влияние несинусоидальности напряжения на работу эл. сетей, электроприемников, технологических устройств.
12. Влияние несимметрии напряжения на работу эл. сетей, электроприемников, технологических устройств.
13. Влияние электромагнитных помех на эл. сети и электроприемники.
14. Источники искажения качества электроэнергии.
15. Характеристика качества эл. энергии в энергосистемах и на предприятиях.
16. Определение ущербов от некачественной электроэнергии.
17. Измерение отклонений напряжения.
18. Измерение колебаний напряжения.
19. Измерение несинусоидальности напряжения.
20. Измерение несимметрии напряжения.
21. Обработка результатов измерения ПКЭ. погрешности оценки значений ПКЭ.
22. Эксплуатационный контроль качества электроэнергии.
23. Оценка соответствия качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.
24. Методы расчета отклонений напряжения.
25. Средства улучшения отклонений напряжения. Построение закона регулирования напряжения.
26. Централизованное регулирование напряжения.
27. Местные средства регулирования напряжения и алгоритм определения добавок напряжения от сети.
28. Методы определения несинусоидальности напряжения.
29. Высшие гармоники, генерируемые различными источниками искажения качества электроэнергии. Эквивалентирование токов высших гармоник.
30. Оценка сопротивлений элементов току высших гармоник.
31. Определение коэффициента искажения синусоидальности напряжения в различных токах сети. Резонансные явления.
32. Методы определения колебаний напряжения.
33. Расчет колебаний напряжения в сетях с ДСП.
34. Расчет колебаний напряжения в сетях со сварочной нагрузкой.
35. Расчет колебаний напряжения в сетях с прокатными станами.
36. Расчет колебаний напряжения в сетях с тягой переменного тока.
37. Методы определения несимметрии напряжения.
38. Расчет тока обратной последовательности при однофазной и двухфазной несимметрии.
39. Определение сопротивлений обратной последовательности элементов сети.
40. Определение коэффициентов обратной и нулевой последовательности в различных точках сети.
41. Схемные решения по снижению несинусоидальности напряжения.
42. Технические средства для снижения несинусоидальности напряжения. Их схемы.
43. Выбор силовых резонансных фильтров.
44. Выбор фильтросимметрирующих устройств.
45. Схемные решения по снижению несимметрии в сети.
46. Выбор параметров симметрирующих устройств.
47. Схемные решения по снижению колебаний напряжения.
48. Технические средства по снижению колебаний напряжения и их выбор.

Пример билета на экзамен

Билет №1

1. Обработка результатов измерения ПКЭ. Погрешности оценки значений ПКЭ.
2. Расчет тока обратной последовательности при однофазной и двухфазной несимметрии.
3. Задача.

Задача.

В точке общего присоединения по графикам активной и реактивной мощностей получены следующие размахи мощности: $\delta P_{l_{эке}} = 70 \text{ МВт}$; $\delta Q_{l_{эке}} = 93 \text{ Мвар}$ при работе прокатного стана. Частота повторения периодических колебаний $11 \frac{1}{\text{мин}}$.

Можно ли к этой точке подключить осветительную нагрузку?

Мощность КЗ равна 150 МВА.

Период, в течение которого определялись размахи равен 10 мин.

Полный комплект экзаменационных билетов хранится на кафедре.

8. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава

Лекции	Практические занятия	Контроль за качеством знаний студентов	Экзамен
Зав. каф. энергетики, проф. Савина Н.В.	асс. Бодруг Н.С., асс. Козлова Е.В.	проф. Савина Н.В., асс. Бодруг Н.С., асс. Козлова Е.В.	проф. Савина Н.В.

9. Список использованных источников

1. Савина Н.В. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – 120 с.
2. Савина Н.В. Применение теории вероятностей и методов оптимизации в системах электроснабжения. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2007. – 271 с.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат. 2000. – 252 с.
4. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 120 с.
5. Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 320 с.
6. Суднова В.В. Качество электроэнергии. – М.: Энергосервис, 2000. – 86 с.
7. Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. – Братск: БрГТУ, 1999. – 220 с.
8. Курбацкий В.Г., Саламатов Г.П. Измерение и контроль качества электроэнергии в электрических сетях: Лабораторный практикум – Братск: БрГТУ, 1999. – 48 с.
9. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 2000. – 331 с.
10. Висящев А.Н. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах: в 2-х частях. – Иркутск, 1997. – ч.1 – 91 с., ч.2 – 92 с.
11. ГОСТ 13109–97. Требования к качеству эл. энергии в эл. сетях общего назначения. М.: Изд. стандартов. 1998.
12. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат. 1986. – 168 с.
13. Жежеленко И.В., Божко В.М., Рабинович М.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. К.: Техника. 1981. – 160 с.
14. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 1994. – 272 с.
15. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987. – 336 с.
16. Борисов В.П., Вагин Г.Я., Электроснабжение электротехнологических установок. К.: Наукова думка, 1985. – 184 с.
17. Повышение эффективности ДСП /под ред. Минеева Р.В. М.: Энергоатомиздат. 1990. -112 с.
18. Смелянский М.Я. Влияние ДСП на системы электроснабжения. М.: Энергия. 1975.– 193 с.

Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАЦ
10. Энергетика

Интернет-сайты

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>.
4. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
5. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО" <http://www.dalenergo.org/>
6. ОАО "Зейская ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
7. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>