


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Директор ЭЛТИ


А.П. Суржигов
« 24 » ноября 2008 г.

Н.Н. Харлов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике»
для бакалавров, обучающихся по направлениям 140200
«Электроэнергетика», 140600 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.31.01(07)

ББК 31.235я73

X21

Харлов Н.Н.

X21 Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» для бакалавров, обучающихся по направлениям 140200 «Электроэнергетика», 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Н.Н. Харлов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 64 с.

ISBN 5-98298-346-2


УДК 621.31.01(07)

ББК 31.235я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры электроэнергетических систем и высоковольтной техники ЭЛТИ

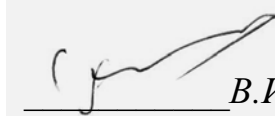
«03» ноября 2007 г.

Зав. кафедрой ЭСВТ
доктор технических наук



В.Я. Ушаков

Председатель учебно-методической
комиссии



В.И. Готман

Рецензент

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
НИИ прикладной математики и механики ТГУ

В.Н. Барашков

ISBN 5-98298-346-2

© Харлов Н.Н., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

Лабораторная работа № 1
ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ, СОЗДАВАЕМОГО УСТАНОВКАМИ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучить неблагоприятное воздействие и допустимые нормы напряженности электрического поля промышленной частоты, для персонала и населения. Ознакомиться с применением измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Измерить напряженность электрического поля в высоковольтной лаборатории.

1. Общие сведения

Электрические сети высокого напряжения оказывают неблагоприятное влияние на техно- и биосферу. Напряжения и токи в проводах линий электропередач создают электромагнитные поля в пространстве и блуждающие токи в земле. Вследствие этого могут возникнуть мешающие, и даже опасные влияния на биосферу. Электромагнитные поля отрицательно воздействуют на людей и животных. Опасное воздействие на персонал и население оказывают электрические и магнитные поля промышленной частоты (50 Гц). Воздушные линии (ВЛ) создают в окружающем пространстве электрическое поле, напряженность которого снижается по мере удаления от ВЛ. Электротехнический персонал подвергается воздействию электромагнитного поля, что может неблагоприятно сказываться на состоянии здоровья. В связи с этим нормирование и контроль воздействия электромагнитного поля являются важными задачами для обеспечения безопасности работ в электроустановках посредством технических и организационных мероприятий

2. Электрическое поле промышленной частоты. Общие сведения

Источником электрических полей промышленной частоты (ЭП ПЧ) являются токоведущие части действующих электроустановок, находящиеся под напряжением (линии электропередач, генераторы, трансформаторы и др.)

Электрическое поле вблизи действующих электроустановок может оказывать вредное воздействие на человека.

Различают следующие виды воздействия:

- непосредственное воздействие, проявляющееся при пребывании в электрическом поле. Эффект этого воздействия усиливается с увеличением напряженности поля и времени пребывания в нем. Длительное воздействие электрического поля на организм человека может вызвать нарушение функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, снижении качества выполнения рабочих операций, болях в области сердца, изменении кровяного давления и пульса;
- воздействие электрических разрядов (импульсного тока), возникающих при прикосновении человека к изолированным от земли конструкциям, корпусам машин и механизмов на пневматическом ходу и протяженным проводникам или при прикосновении человека, изолированного от земли к растениям, заземленным конструкциям и другим заземленным объектам;
- воздействие тока, проходящего через человека, находящегося в контакте с изолированными от земли объектами – крупногабаритными предметами машинами и механизмами, протяженными проводниками – тока стекания.

Кроме того, электрическое поле может стать причиной воспламенения или взрыва паров горючих материалов и смесей в результате возникновения электрических разрядов при прикосновении предметов и людей с машинами и механизмами

Степень опасности каждого из указанных факторов возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

Нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля (ЭП) на промышленной частоте для персонала установлены в ГОСТ 12.1.002 – 84:

- $E \geq 25$ кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;
- $20 < E < 25$ кВ/м – пребывание в ЭП не более 10 минут;
- при $5 < E \leq 20$ кВ/м допустимое время пребывания в ЭП вычисляют по формуле:

$$T, \text{ часов} = (50/E)^{-2};$$

- $E \leq 5$ кВ/м пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Электрические поля от линии электропередач также воздействуют и на население. Существует определенная вероятность ошибок при проектировании и расположении питающих сетей в районах массовой застройки или разводки сетей в пределах дома (как правило, первый этаж). Первый признак превышения норм по этому показателю – частые сбои при работе бытовой техники помехи на экранах телевизоров, мо-

ниторов, персональных компьютеров, радиопомехи. Для населения существуют следующие уровни воздействия электрического поля промышленной частоты (табл. 1).

Таблица 1

Допустимые уровни напряженности электрического поля промышленной частоты для населения

Е _{пду} , кВ/м	Тип местности
0,5	Внутри жилых зданий
1,0	Территория зоны жилой застройки
5,0	Населенная местность вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов
10,0	Участки пересечения ВЛ с автомобильными дорогами I–IV категории
15,0	Ненаселенная местность (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта и сельскохозяйственные угодья)
20	Труднодоступная местность (недоступная для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населению.

Предельно допустимые значения напряженности нормируются для электрического поля не искаженного присутствием человека. Поэтому напряженность электрического поля определяется на высоте 1,8 м от уровня земли, а для помещений – от уровня пола. Для обеспечения допустимых значений напряженности поля под ВЛ, ПУЭ регламентируется минимальное расстояние от провода ВЛ до земли – габариты линии (табл. 2).

Таблица 2.

Габарит линии для различного типа местности

Характеристика местности	Наименьшее расстояние от провода до земли, м, при напряжении ВЛ, кВ					
	до 35	110	150	220	330	500
Населенная местность	7	7	7,5	8	8	8
Населенная местность (расстояние до зданий и сооружений)	3	4	4	5	6	-
Ненаселенная местность	6	6	6,5	7	7,5	8
Труднодоступная местность	5	5	5,5	6	6,5	7
Пересечение с дорогой	7	7	7,5	8	8,5	9

В целях защиты населения от воздействия электрического поля ВЛ устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной является территория вдоль трассы ВЛ, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Для вновь проектируемых ВЛ, а также зданий и сооружений допускается принимать границы санитарно-защитных зон вдоль трассы ВЛ с горизонтальным расположением проводов и без средств снижения напряженности электрического поля по обе стороны от нее на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ВЛ: 20 м – для ВЛ напряжением 330 кВ; 30 м – 500 кВ; 40 м – 750 кВ; 55 м – 1150 кВ.

При этом должны быть приняты меры по снижению радиопомех до уровней, нормируемых ГОСТ 22012-82 «Радиопомехи промышленные от линии электропередачи и электрических подстанций».

В пределах санитарно защитной зоны запрещается:

- размещение жилых и общественных зданий и сооружений, площадок для стоянки и остановки всех видов транспорта, предприятий по обслуживанию автомобилей и складов нефти и нефтепродуктов;
- производство операций с горючим, выполнение ремонта машин и механизмов.

3. Меры защиты персонала от воздействия электрического поля

Если напряженность электрического поля превышает предельно допустимые уровни, должны быть приняты меры по ее снижению. В местах возможного пребывания человека напряженность электрического поля может быть уменьшена путем удаления жилой застройки от ВЛ, применением экранирующих устройств и других средств снижения напряженности электрического поля. Основными видами средств коллективной защиты от воздействия электрического поля промышленной частоты являются экранирующие устройства – составная часть электрической установки, предназначенная для защиты персонала в открытых распределительных устройствах и на воздушных линиях электропередач.

Экранирующее устройство необходимо при осмотре оборудования и при оперативных переключениях, наблюдении за производством работ. Конструктивно экранирующие устройства оформляются в виде козырьков, навесов или перегородок из металлических канатов, прутков, сеток.

Переносные экраны также используются при работах по обслуживанию электроустановок в виде съемных козырьков, навесов, перегородок, палаток и щитов

Экранирующие устройства должны иметь антикоррозионное покрытие и быть заземлены.

4. Способы ограничения напряженности поля под воздушными линиями высших классов напряжения

Наиболее простым конструктивным способом ограничения напряженности поля под линиями является установка заземленных тросов под проводами линий. Габарит до земли нормируется с учетом необходимости обеспечения безопасности перемещения под линиями различных механизмов высотой до 4–4,5 м. Поэтому, если высота троса в месте его максимального провеса не будет превышать 4–4,5 м высота подвески проводов над землей не изменится. Наведенные на заземленных тросах заряды частично компенсируют поле проводов линии и ограничивают напряженность поля. Более эффективна подвеска под каждым проводом линии двух тросов, разнесенных в горизонтальной плоскости. На заземленных тросах наводятся заряды, знак которых противоположен знаку заряда соответствующего провода.

Следует заметить, однако, что подвеска дополнительных тросов приводит к заметному удорожанию линии. Расчеты показывают, что экономически более целесообразно увеличивать высоту подвески провода. Поэтому тросовые экраны применяются только при пересечениях линией дорог. При этом они натягиваются между дополнительными железобетонными стойками.

Ограничение напряженности поля под линиями электропередачи может быть достигнуто без изменения конструкции линии при использовании растительного массива под линиями. Стволы и ветки деревьев, кустарников имеют высокую проводимость в течение всего года. Погонное сопротивление составляет 1–3,5 МОм/м при положительных температурах и 100–500 МОм/м при отрицательных температурах. В связи с этим при высоте древесно-кустарниковой растительности под проводами 4 м напряженность поля не превышает 1 кВ/м при отрицательных температурах и 0,01 кВ/м при положительных температурах. Это обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных под линиями.

5. Аппаратура для измерения

Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50 (рис. 1) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности электрического поля промышленной частоты возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения. Измеритель состоит из антенн-преобразователей (АП) ЕЗ-50 НЗ-50 и устройства отсчетного УОЗ-50. Работа прибора основана на возбуждении в АП под воздействием измеряемого поля переменного напряжения с той же час-

тотой и пропорционального напряженности поля. Переменное напряжение предварительно усиливается в АП и далее поступает на вход устройства отсчетного, где происходит его фильтрация, дальнейшее усиление, преобразование в постоянное напряжение и индикация.



Рис. 1. Измеритель напряженности поля промышленной частоты с антенн-преобразователем ЕЗ-50

АП типа ЕЗ-50 предназначена для измерения напряженности электрического поля и представляет собой симметричную дипольную антенну электрически малых размеров (полный размер диполя 100 мм). При помещении диполя в ЭП между плечами диполя возникает переменная разность потенциалов. Амплитуда этого переменного напряжения пропорциональна проекции вектора напряженности поля на ось диполя. Переменное напряжение с диполя далее передается на вход дифференциального усилителя находящегося в корпусе АП. С выхода усилителя сигнал через кабель поступает на устройство отсчетное УОЗ-50.

Устройство отсчетное типа УОЗ-50 предназначено для усиления и преобразования аналогового сигнала поступающего с АП в цифровой сигнал и отсчета напряженности ЭП в абсолютных единицах кВ/м

Для определения среднеквадратического значения модуля вектора напряженности ЭП следует измерить в выбранной точке пространства проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси E_x , E_y и E_z . После чего определить модуль вектора напряженности электрического поля E по формуле

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

6. Схема для проведения измерений электрического поля

Схема, обеспечивающая создание электрического поля, собирается в лабораторной установке путем включения соответствующих магнитных пускателей и приведена на рис. 2 и включает лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), высоковольтный трансформатор типа ЗНОМ-35, переключатели и измерительные приборы.

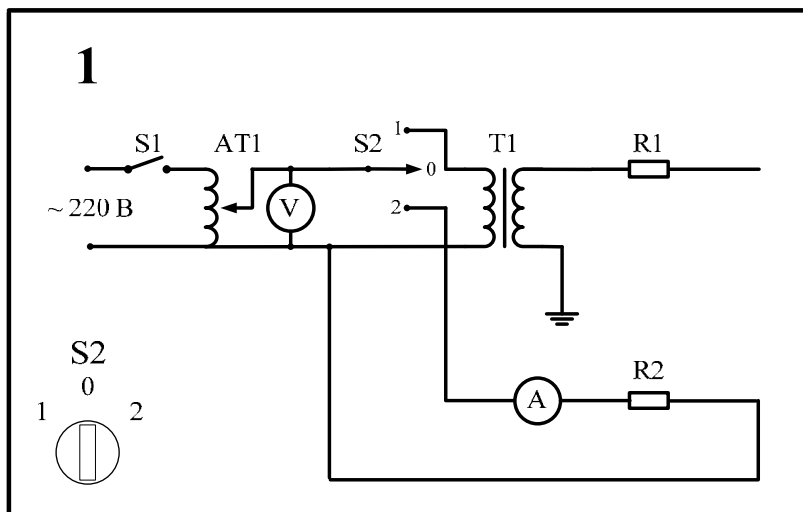


Рис. 2. Схема для создания электрического поля промышленной частоты

7. Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы ознакомьтесь с техническим описанием измерителя напряженности поля ПЗ-50, порядком проведения измерений;

2. Убедитесь, что все переключатели на главной панели лабораторной установки находятся в нейтральном положении (положение «0»). Ручка автотрансформатора должна находиться в крайнем положении при вращении против часовой стрелки;

3. При отключенной лабораторной установке измерить в заданной преподавателем точке пространства проекции вектора напряженности электрического поля (т.н. фоновые значения). Результаты измерений занести в табл. 3.

4. Переводом ключа S_1 из положения «0» в положение «1» включить лабораторную установку;

5. Переводом ключа S_2 из положения «0» в положение «1» подать напряжение на автотрансформатор;

6. Установить с помощью автотрансформатора напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора $U_1 = 10V$, что соот-

ветствует напряжению вторичной обмотки
 $U_2 = U_1 \times K_T = 10 \times 35000 / 100 = 3500 \text{ В}$

7. Измерить среднеквадратическое значение модуля вектора напряженности электрического поля. Для этого в заданной преподавателем точке пространства измеряются проекции вектора напряженности электрического поля. Результаты измерений занести в табл. 3.

8. Повторить измерения изменяя значения напряжения на первичной обмотке высоковольтного трансформатора через 10 В и до достижения пределов регулировочного диапазона автотрансформатора. Результаты измерений занести в табл. 3.

9. Построить зависимость модуля напряженности электрического поля в зависимости от величины напряжения на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора.

10. Сравнить измеренные уровни напряженности поля с фоновыми значениями.

11. Дать объяснения полученных результатов.

12. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 3

Величина первичного/вторичного напряжения высоковольтного трансформатора, В	E_x кВ/м	E_y кВ/м	E_z кВ/м	E кВ/м	Примечание
0,0/0,0					Установка отключена
10,0/3500					Установка включена
20,0/7000					
30,0/10500					
....					

Пункты 1–10 повторить применительно к нескольким точкам пространства, заданным преподавателем.

8. Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие обязательные составные части:

1. Титульный лист, оформленный в соответствии с установленными требованиями;
2. Цели выполнения работы;
3. Краткое изложение теоретических вопросов, касательно содержания работы;
4. Термины и определения;
5. Использованные технические средства;
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению).

7. Описание основной части (краткая характеристика лабораторной установки, ее схема, результаты измерений, представленные в форме таблиц и графиков);
8. Анализ полученных результатов;
9. Отчет составляется общим на бригаду студентов.
10. Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

9. Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления электрического поля от высоковольтных устройств?
2. Какие мероприятия применяют для снижения напряженности электрического поля?
3. Перечислить факторы, влияющие на величину напряженности электрического поля под линией высокого напряжения.
4. Почему наличие растительности под ВЛ снижает напряженность электрического поля?

10. Список литературы

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ СОЗДАВАЕМОГО УСТАНОВКАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: Изучить неблагоприятное воздействие и допустимые нормы напряженности магнитного поля промышленной частоты для персонала и населения. Ознакомиться с применением измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Измерить напряженность магнитного поля, создаваемого током в высоковольтной лаборатории.

1. Общие сведения

Электроустановки электроэнергетических и промышленных предприятий, исследовательских лабораторий являются источником магнитного поля (МП) частотой 50 Гц. Магнитное поле – одна из составляющих электромагнитного поля, которая создается током, протекающим через проводник.

Магнитное поле имеет место в электроустановках всех классов напряжения. Его интенсивность выше вблизи выводов генераторов, токопроводов, блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов связи ОРУ разных напряжений (особенно на уровне разъема бака), а также ЗРУ 6 – 10 кВ и вблизи них. В помещениях вблизи КРУ, у токопроводов, вблизи электродвигателей, распределительных устройств, кабельных и воздушных линий всех напряжений интенсивность магнитного поля существенно ниже. Более сложная ситуация с системой кабельных линий здания. При появлении в кабельной линии тока утечки возникающий дисбаланс, т. е. неравенство нулю суммарного тока по кабельной линии создает в окружающем пространстве магнитное поле, медленно убывающее с увеличением расстояния от рассматриваемого кабеля. Кроме того, наличие токов утечки в системе электроснабжения здания приводит к протеканию токов по металлоконструкциям и трубопроводным системам, что также является причиной увеличения уровней МП ПЧ. На рис. 1. приведены данные по источникам, создающим магнитное поле промышленной частоты в производственных помещениях, а на рис. 2. примерные значения напряженностей магнитных полей от этих источников.

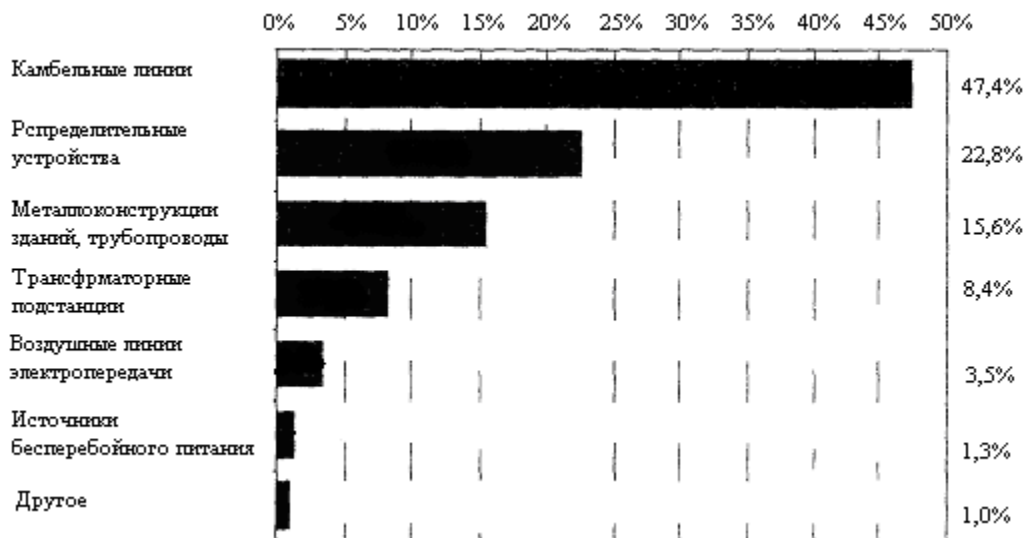


Рис. 1. Распределение источников по типам от общего числа обследованных помещений

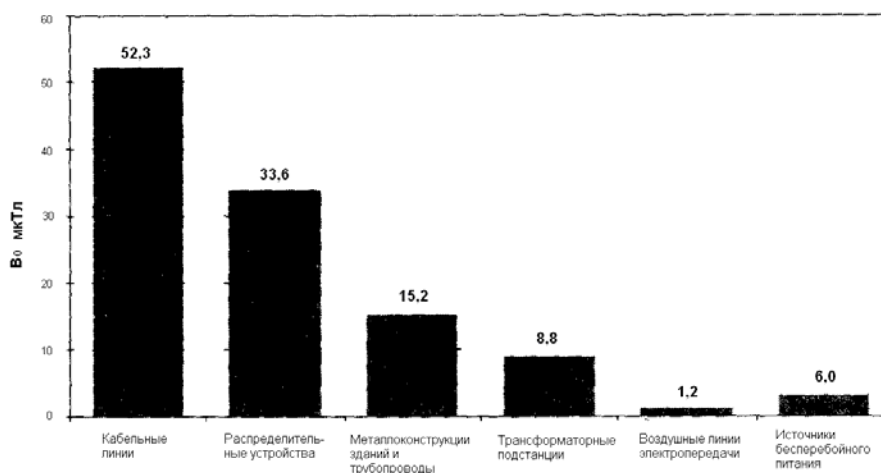


Рис. 2. Диапазоны значений МП ПЧ на рабочих местах от внешних источников по типам

Воздействие магнитного поля на персонал может быть как общим, так и преимущественно локальным (на конечности). Переменное магнитное поле индуцирует в теле человека вихревые токи. Согласно современным представлениям, индуцирование вихревых токов является основным механизмом биологического действия магнитных полей. Основным параметром его характеризующим является плотность вихревых токов. Допустимое значение плотности вихревого тока в организме положено в основу СанПиН и всех действующих в мире гигиенических регламентов магнитного поля (с разными коэффициентами гигиенического запаса).

Интенсивность воздействия МП определяется напряженностью (Н), или магнитной индукцией (В) (их эффективными значениями). Напряженность МП выражается в А/м (кратная величина – кА/м) магнитная индукция – в Тесла (Тл, дольные величины мТл мкТл нТл). Индукция и напряженность МП в воздухе связаны следующим соотношением:

$$B = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \text{ Тл}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, Н- напряженность магнитного поля, А/м.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитного поля устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 1).

Таблица 1

*Предельно допустимые уровни магнитного поля
(СанПиН 2.2.4.1191-03)*

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни МП Н(А/м)/В(мкТл) при воздействии	
	Общем	Локальном
<1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

В 2001 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в информационном сообщении “Electromagnetic fields and public health. Extremely low frequency fields and cancer” признала, что в свете современных научных представлений, магнитное поле промышленной частоты (МП ПЧ) со значениями плотности магнитного потока превышающими 0,3–0,4 мкТл в условиях продолжительного воздействия возможно является канцерогенным фактором окружающей среды. Поэтому ВОЗ рекомендует придерживаться предупредительного принципа, т. е. всеми доступными средствами ограничивать воздействие МП ПЧ на организм человека.

Биологическая эффективность МП зависит от интенсивности и продолжительности воздействия. Показана возможность неблагоприятного влияния МП на здоровье человека. Реакции организма имеют неспецифический характер. Обследование взрослого населения показало, что существует еще одна проблема лежащая в аспекте проявления отдаленных последствий у лиц, имеющих контакт с МП ПЧ и поднятая во

многих публикациях. Данная проблема заключается в возможности развития нейродегенеративных болезней и неврологических расстройств. К этой возможной патологии в настоящее время относят депрессивный синдром, прогрессирующую мышечную атрофию (боковой амиотрофический склероз), болезни Альцгеймера и Паркинсона, а также возможное учащение случаев самоубийств.

Согласно докладу рабочей группы *CIGRE* для всех людей допускается неограниченное время воздействия МП напряженностью 80 А/м. Однако, в последние годы все чаще говорят о необходимости снижения допустимого уровня МП, зачастую локально, например, около школ, площадок для игр и т. д.

В свою очередь, причиной повышенного уровня магнитного поля, как правило, являются недостатки в проектировании, монтаже и эксплуатации распределительных сетей в зданиях. Российская предельно-допустимая гигиеническая норма 10 мкТл внутри жилых помещений и 50 мкТл на территории зоны жилой застройки (СанПиН 2.1.2.1002-00). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует придерживаться в качестве безопасного уровня 0,2 мкТл, учитывая относительную неизученность отдаленных последствий воздействия этого фактора.

Магнитные поля промышленной частоты биологически значимого уровня 0,2 мкТл и выше и продолжительного периода воздействия имеют широкое распространение в условиях непрофессионального воздействия. Они фиксируются на постоянных рабочих местах не зависимо от профессиональной категории работающих, а также внутри жилых помещений (табл. 2).

Таблица 2

Уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м

Бытовой электроприбор	От, мкТл	До, мкТл
Пылесос	0,2	2,2
Дрель	2,2	5,4
Утюг	0,0	0,4
Миксер	0,5	2,2
Телевизор	0,0	2,0
Люминесцентная лампа	0,5	2,5
Кофеварка	0,0	0,2
Стиральная машина	0,0	0,3
Микроволновая печь	4,0	12,0
Электрическая плита	0,4	4,5

2. Меры защиты персонала и населения от воздействия магнитного поля

Измерение напряженности (индукции) МП должно производиться на всех рабочих местах эксплуатационного персонала электроустановок, в местах прохода персонала (в т. ч. вблизи экранированных токопроводов, под шинными мостами и т. п.), а также в производственных помещениях с постоянным пребыванием персонала расположенных на расстоянии менее 20 м от токоведущих частей электроустановок, в т. ч. отделенных от них стеной.

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния МП осуществляется путем проведения организационных и технических мероприятий.

К организационным относятся мероприятия, обеспечивающие соблюдение требований ограничения продолжительности пребывания персонала под воздействием МП (без нарушения сложившейся системы эксплуатационного обслуживания электрооборудования) и организации рабочих мест на расстояниях от токоведущих частей оборудования, обеспечивающих соблюдение ПДУ.

При проектировании электроустановок организационные мероприятия включают

- отказ от размещения производственных помещений, рассчитанных на постоянное пребывание персонала вблизи токоведущих частей электроустановок, а также под и над токоведущими частями оборудования (например, токопроводами), за исключением случаев, когда уровни МП по результатам расчета не превышают предельно допустимые;
- расположение путей передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от экранированных токопроводов и (или) шинных мостов, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- исключение расположения токоограничивающих реакторов и выключателей в соседних ячейках РУ 6–10 кВ;
- при проектировании ВЛ предпочтение должно отдаваться двухцепным ВЛ с расположением фазных проводов, обеспечивающим максимальную компенсацию МП от фазных токов обеих цепей;
- при проектировании КЛ их расположение должно обеспечивать соблюдение допустимых значений МП у поверхности земли.

При эксплуатации электроустановок организационные мероприятия включают следующее:

- зоны с уровнями МП превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала (например, камеры выводов турбогенераторов), должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками;

- осмотр электрооборудования находящегося под напряжением должен осуществляться из зон с уровнями МП удовлетворяющими нормативным требованиям; ремонт электрооборудования следует производить вне зоны влияния МП.

К техническим относятся мероприятия, снижающие уровни МП на рабочих местах путем экранирования источников МП или рабочих мест. Экранирование должно осуществляться посредством материалов с высокой относительной магнитной постоянной или активных экранов.

3. Аппаратура для измерения

Для измерения напряженности магнитного поля используется измеритель напряженности поля промышленной частоты типа ПЗ-50 (рис. 3). Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50 предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности магнитного поля промышленной частоты возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,1 до 1800 А/м.



Рис. 3. Измеритель напряженности поля промышленной частоты с антенн-преобразователем НЗ-50

Измеритель состоит из антенны-преобразователя (АП) НЗ-50 и устройства отсчетного УОЗ – 50. АП типа НЗ-50 представляет собой экранированную рамочную антенну электрически малых размеров (средний диаметр рамки 80 мм, число витков 5600). При помещении АП в МП в обмотке антенны наводится переменное напряжение пропорциональное проекции вектора напряженности поля на ось перпендикулярную плоскости рамки. Переменное напряжение далее через кабель поступает на устройство отсчетное УОЗ-50, преобразующее аналоговый сигнал, поступающий с АП в цифровой сигнал и обеспечивающее индикацию напряженности МП в абсолютных единицах А/м.

В зависимости от положения переключателей при измерении напряженности МП могут быть установлены пределы измерения указанные в табл. 3.

Таблица 3

Предел измерения А/м	Положение переключателя x0,1/x1/x10	Положение переключателя 2/20/200
2000	x10	200
200	x1	200
20	x1	20
2	x1	2
0,2	x0,1	2

Для определения среднеквадратического значения модуля вектора напряженности МП следует измерить в выбранной точке пространства проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси H_x , H_y , H_z . После чего определить модуль вектора напряженности электрического поля H по формуле:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$

4. Схема для проведения измерений магнитного поля

Схема, обеспечивающая создание магнитного поля, собирается в лабораторной установке путем включения соответствующих магнитных пускателей и приведена на рис. 4.

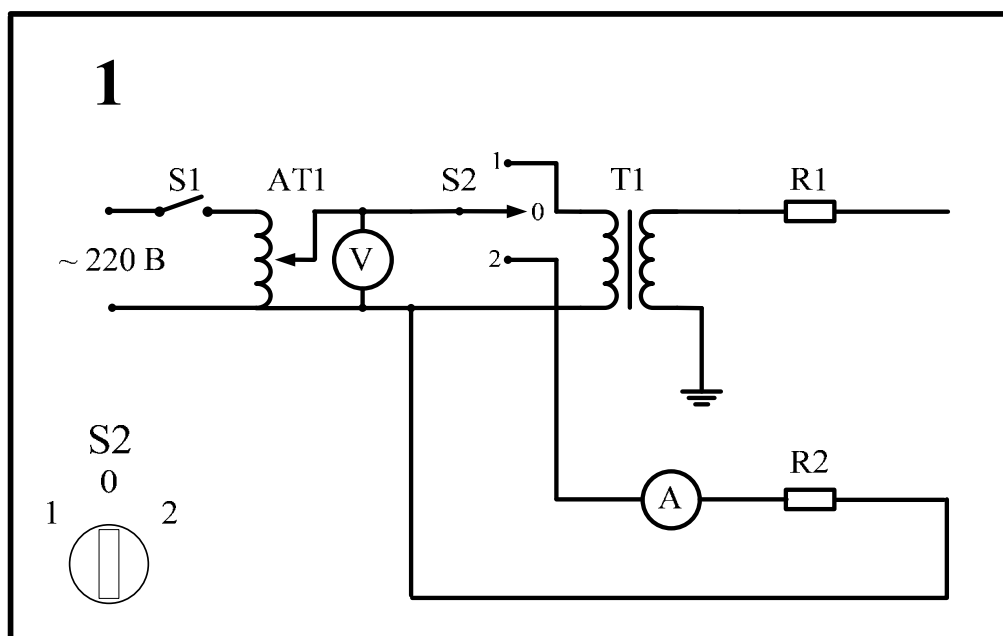


Рис. 4. Схема для создания электрического поля промышленной частоты

5. Порядок работы

1. Перед началом работы ознакомится с устройством измерителя напряженности поля ПЗ-50, порядком проведения измерений;

2. Убедиться, что все переключатели на главной панели лабораторной установки находятся в нейтральном положении (положение «0»). Ручка автотрансформатора должна находиться в крайнем положении при вращении против часовой стрелки;

3. При отключенной лабораторной установке измерить в заданной преподавателем точке пространства проекции вектора напряженности магнитного поля (т.н. фоновые значения). Результаты измерений занести в табл. 4.

4. Переводом ключа S_1 из положения «0» в положение «1» включить лабораторную установку;

5. Переводом ключа S_2 из положения «0» в положение «2» подать напряжение на автотрансформатор;

6. Установить с помощью автотрансформатора ток в проводнике $I_1 = 0,2A$.

7. Измерить среднеквадратическое значение модуля вектора напряженности магнитного поля. Для этого в заданной преподавателем точке пространства измеряются проекции вектора напряженности магнитного поля. Результаты измерений занести в табл. 4.

8. Повторить измерения изменяя значения тока в проводнике через 0,2 А в пределах регулировочного диапазона автотрансформатора. Результаты измерений занести в табл. 4.

9. Построить зависимость модуля напряженности электрического поля в зависимости от величины тока в проводнике.

10. Сравнить измеренные уровни напряженности поля с фоновыми значениями.

11. Дать объяснения полученных результатов.

12. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 4

Величина тока в проводнике, А	H_x А/м	H_y А/м	H_z А/м	H А/м	Примечание
0,0					Установка отключена
0,2					Установка включена
0,4					
0,6					
....					

Пункты 1–10 повторить применительно к нескольким точкам пространства, заданным преподавателем.

6. Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие обязательные составные части:

1. Титульный лист, оформленный в соответствии с установленными требованиями;
2. Цели выполнения работы;
3. Краткое изложение теоретических вопросов, касательно содержания работы;
4. Термины и определения;
5. Используемые технические средства;
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению).
7. Описание основной части (краткая характеристика лабораторной установки, ее схема, результаты измерений, представленные в форме таблиц и графиков);
8. Анализ полученных результатов;
9. Отчет составляется общим на бригаду студентов.
10. Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

7. Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления магнитного поля от высоковольтных устройств?
2. Какие мероприятия применяют для снижения напряженности магнитного поля на электростанциях и подстанциях?
3. Перечислить факторы, влияющие на величину напряженности магнитного поля от высоковольтных устройств.
4. Почему наличие растительности под ВЛ снижает напряженность магнитного поля?

8. Список литературы

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КАК ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Цель работы: ознакомиться с причинами появления радиопомех от высоковольтного оборудования и мерами по их ограничению, допустимыми нормами и аппаратурой для измерения.

1. Возникновения помех от короны

Радиопомехи и помехи высокочастотным каналам от линий электропередачи создаются разрядами короны на проводах, изоляторах и арматуре этих линий. В современных исследованиях помех от линий электропередачи основное внимание уделяется коронированию проводов, так как помехи от изоляторов, арматуры и оборудования подстанций практически могут быть полностью подавлены применением соответствующих экранов и при контроле за исправностью этого оборудования. Явление короны на проводе данного диаметра возникает при напряжении определенной величины, называемом «начальным напряжением короны». Помехи являются следствием распространения энергии повторяющихся импульсов электростатических разрядов, имеющих форму «кисти» или «стримера». На проводе с более или менее шероховатой поверхностью эти ряды появляются уже при 50–60 % начального напряжения короны для идеально гладкого провода. Форма разрядов короны на проводе меняется с ростом напряжения от слабого свечения («тихие разряды» или «видимая корона») до ярких «факелов» конусообразной формы, вершины которых находятся в тех точках провода, где имеются неровности поверхности или посторонние частички.

С появлением кистевых разрядов возрастает характерный потрескивающий звук от провода («слышимая корона») и резко увеличивается уровень радиопомех.

Кистевой разряд представляет собой внезапное освобождение электрического заряда. Каждый разряд длится примерно 10^{-8} сек и сопровождается освобождением заряда величиной от 10^{-9} до 10^{-8} К., что соответствует энергии порядка 0,1–1 мВт·сек. На открытую или рамочную антенну приемника, помещенного непосредственно под линией, поступает при этом мощность порядка 10^{-8} Вт, что соответствует напряженности поля порядка 1000 мкВ/м. Поле единичного разряда быстро ослабевает с увеличением расстояния как вдоль линии, так и в направлении, перпендикулярном ей. При определенных напряжениях линии интенсивность этого поля достигает предельного значения и не увеличивается

больше, так как освобождаемый заряд образует облачко, как бы экранирующее точку, где происходит разряд.

Корона на изоляторах и арматуре имеет вид светящегося потока, который тянется от арматуры к поверхности фарфора. Разряды здесь сопровождаются заметным треском.

Поле помех, создаваемых кистевыми разрядами, является суммой двух полей

- а) поля, излучающегося непосредственно в ионизированное пространство малыми поперечными токами;
- б) поля индукции, создаваемого продольными токами кистевых разрядов, протекающими по линии.

Волны непосредственного излучения имеют значительно более крутой фронт, чем волны, обусловленные распространением электромагнитной энергии вдоль линии. Поле непосредственного излучения, не играющее большой роли в общей сумме помех в нижней части радиодиапазона, может стать преобладающим на более высоких частотах, однако общее снижение уровней помех с увеличением частоты делает это явление второстепенным.

Спектр помех, принимаемых радиоприемниками, есть следствие неустановившихся кратковременных процессов, каковыми являются импульсы, создаваемые кистевыми разрядами короны.

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частотах выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками помех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей напряженности электрического поля вблизи поверхности земли (E). Уровень радиопомех, дБ, определяется величиной

$$Y = 20 \lg E$$

В качестве расчетной частоты по рекомендации Международного комитета по радиопомехам принимается 0,5 МГц. Уровень полезного сигнала при этой частоте составляет примерно 60 дБ. Радиоприем считается удовлетворительным, если полезный сигнал превышает помехи на 20 дБ. Поэтому допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что дает $E = 100$ мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля радиопомех принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции на землю крайнего провода линии электропередачи напряжением 330 кВ и выше.

2. Нормативная база на радиопомехи

Для решения задач электромагнитной совместимости линий электропередачи и радиоприемных устройств различного назначения (т. е. для обеспечения их функционирования без ухудшения качественных показателей), важное значение имеют реальные уровни напряженности поля помех, создаваемых ВЛ.

Помехи от ВЛ могут возникать не только от короны на проводах, но и вследствие частичных разрядов и короны на изоляторах, пробоя или перекрытия дефектных изоляторов, короны на линейной арматуре и распорках проводов расщепленной фазы, а также из-за искрения между элементами линейной арматуры, распорок проводов и между изоляторами.

Снижению радиопомех от ВЛ и улучшению электромагнитной обстановки вдоль трасс способствует нормирование уровней радиопомех от ВЛ. Принятие норм создает юридическую основу взаимоотношений между проектировщиками и владельцами радиоприемных средств и объектов. Нормирование радиопомех от ВЛ требует от проектировщиков и владельцев ВЛ принятия мер к тому, чтобы уровень радиопомех не превышал допустимых величин в течение заданного процента годового времени.

В большинстве стран установлены национальные нормы на величины напряженности поля помех, создаваемых воздушными линиями электропередач и высоковольтным оборудованием.

В табл. 1. приведены нормы на радиопомехи от ВЛ ряда стран. Для сравнения требований национальных норм допустимые уровни радиопомех были пересчитаны на расстояние 100 метров от ВЛ и на частоту 0,5 МГц, рекомендованную СИСПР (Международный специальный комитет по радиопомехам) в качестве базисной при расчетах.

В табл. 2 приведены критерии качества приема в зависимости от соотношений сигнал/помеха. Согласно рекомендациям Международного консультативного комитета радио величина защитного отношения сигнал/помеха составляет 26 дБ.

Таблица 1

*Сравнение норм различных стран на радиопомехи
от линий электропередачи*

№ п.п.	Страна	Частота измерения	Место измерения	Погодные условия % по времени	Нормы, Дб	Допустимые уровни радиопомех на расстоянии 100 м от проекции крайней фазы на землю. Прибор СИСПР, Дб	
						В хорошую погоду	80% времени
1.	РФ	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы 100 м	80	43,0	37,0	43,0
2.	США	1,0 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы ВЛ 362 кВ – 14 м; ВЛ>550 кВ – 20 м	80	52 (ANSI)	27,3	33,3
						29,6	35,6
3.	Канада	1,0 МГц	Под линией. N- число зданий в зоне 60 м от проекции крайней фазы	В хорошую погоду	34 (ANSI) (N>50) 40 (ANSI) (N=10-50) 43,5 (ANSI) (N<10)	7,3	26,3
						13,3	19,3
						16,8	22,8
4.	Бразилия	1,0 МГц	На границе зоны отчуждения (30 м)	В хорошую погоду	42 (ANSI)	23,3	29,3
5.	Япония	1,0 МГц	Под линией	50, дождь	53	24,9	30,9
6.	Индия	0,5 МГц	На границе зоны отчуждения 30 м 45 м	В хорошую погоду	46 46	24,7	30,7
						30,7	36,7
7.	Италия	0,5 МГц	Расстояние от проекции крайней фазы 15 м	80	60	32,3	38,3

Таблица 2

Допустимые отношения сигнал/помеха S/N, дБ, требуемые для разных градаций качества приема АМ радиовещания, полученные из разных источников

№ п.п.	Критерий качества	Канада S/N, дБ	IEEE S/N, дБ	СИГРЕ S/N, дБ	СИСПр S/N, дБ
1.	Совершенно удовлетворительно для классической музыки	39			40
2.	Удовлетворительно для обычного прослушивания	31	31	30	32
3.	Фоновая помеха весьма умеренна	26	26	24	26
4.	Фоновая помеха заметна	21	21	18	20
5.	Фоновая помеха очень заметна	15	15	12	15
6.	Трудно различить полезный сигнал	9	4	6	8

3. Аппаратура для измерений

Для проведения измерений в настоящей лабораторной работе используется измеритель напряженности поля малогабаритный ИПМ-101. В качестве индикатора наличия высокочастотных электромагнитных помех используется бытовой радиоприемник с диапазонами радиоприема ДВ, СВ, КВ и УКВ.

Измеритель ИПМ-101 (рис. 1) предназначен для измерения среднеквадратичных значений напряженности переменного электрического и магнитного поля и плотности потока энергии электромагнитного поля.



Рис. 1. Измеритель ИПМ-101

В составе с антенной-преобразователем АП Е01 измеритель обеспечивает измерение в свободном пространстве при расстоянии от проводящих тел до точки измерения поля не менее 0,2 м следующих параметров электромагнитного поля

- среднеквадратического значения модуля вектора напряженности электрического поля (НЭП) способом направленного приема,
- плотности потока энергии (ППЭ) плоской электромагнитной волны путем пересчета измеренного значения НЭП в ППЭ

Измеритель обеспечивает измерение НЭП и ППЭ на частотах от 30 кГц до 1,2 ГГц и от 2,4 до 2,5 ГГц. Диапазон измерения НЭП зависит от частоты измеряемого поля и находится в пределах от E_{\min} до E_{\max} , где E_{\min} и E_{\max} в В/м определяются по формулам:

$$E_{\min} = K_f \cdot 1 \text{ В/м}, \quad E_{\max} = K_f \cdot 100 \text{ В/м.}$$

где K_f – частотный коэффициент АП Е01 принимается в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Частота, МГц	K_f
0,03–0,05	1,15
0,05–300	1,00
300–500	0,85
500–700	0,70
700–1000	0,50
1000–1200	0,35
2400–2500	0,50

Диапазон измерения ППЭ находится в пределах от P_{\min} до P_{\max} , где P_{\min} и P_{\max} , в мкВт/см² определяются по формулам:

$$P_{\min} = 0,265(E_{\min})^2, \quad P_{\max} = 0,265(E_{\max})^2, \quad \text{где } E_{\min} \text{ и } E_{\max} \text{ в В/м.}$$

Более подробно технические характеристики порядок подготовки к работе и порядок работы измерителя напряженности поля малогабаритного ИПМ-101 приведены в [1].

4. Схема для проведения измерений электрического поля

Схема, обеспечивающая создание электрического поля, собирается в лабораторной установке путем включения соответствующих магнитных пускателей и приведена на рис. 2.

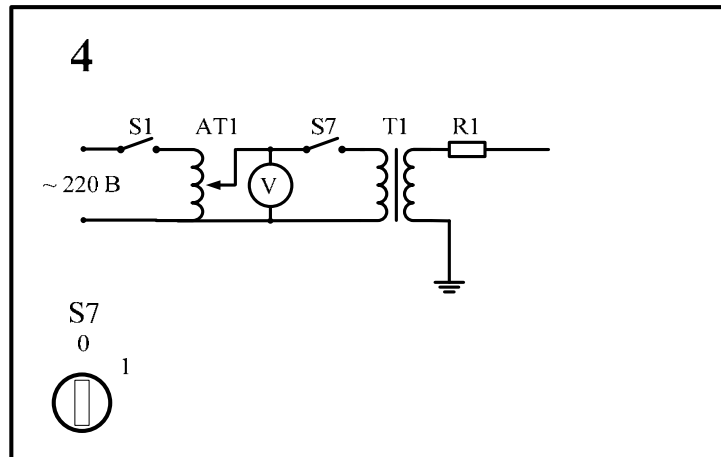


Рис. 2. Схема для создания электромагнитных помех короной переменного тока

5. Порядок работы

1. Перед началом работы ознакомится с устройством измерителя напряженности поля ИПМ-101, порядком проведения измерений;
2. Убедиться, что все переключатели на главной панели лабораторной установки находятся в нейтральном положении (положение «0»). Ручка автотрансформатора должна находиться в крайнем положении при вращении против часовой стрелки;
3. На электроде высоковольтного трансформатора повернуть пластину электрода острием к плоскому электроду, закрепленному на ограждении;
4. Переводом ключа S_1 из положения «0» в положение «1» включить лабораторную установку;
5. Переводом ключа S_7 из положения «0» в положение «1» подать напряжение на автотрансформатор;
6. Установить с помощью автотрансформатора напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора соответствующее устойчивому появлению короны между электродами;
7. С помощью радиоприемника по характерному шуму установить ориентировочный диапазон электромагнитных волн, генерируемых короной. При возникновении характерного шума в динамиках радиоприемника убедиться, что его источником является корона. Для этого плавно изменять с помощью автотрансформатора напряжение между электродами от установленного до нуля. При этом шум помехи должен снижаться.
8. Переведите последовательно ключи S_7 и S_1 в положение 0.
9. Достаньте из футляра устройство отсчетное УО-101 и АП Е01. Подключите АП Е01 к УО-101.
10. Установите переключатель **ВЫКЛ/КОНТ/ИЗМ** в положение **КОНТ** (переключатель **200/2000** может быть в произвольном положении).

нии). При этом на индикаторе УО-101 появится контрольное число, пропорциональное напряжению питания прибора. Число на индикаторе должно находиться в пределах от 75 до 100.

При свежей батарее число находится в пределах 90–100. При разряде батареи во время эксплуатации измерителя число будет уменьшаться. При полностью разряженной батарее контрольное число станет менее 75. В этом случае следует заменить элемент питания.

Элемент питания подлежит замене также при отсутствии показаний на индикаторе или появлении в левом верхнем углу индикатора символа **LO BAT**. Проведение измерений при включенном символе **LO BAT** не допускается, поскольку в этом случае погрешность измерений может выйти за допустимые пределы.

11. После прохождения времени установления рабочего режима, равного 3 мин, установить переключатель **ВЫКЛ/КОНТ/ИЗМ** в положение **ИЗМ**, а переключатель **200/2000** в положение **2000**.

Поместите АП в измеряемое поле, удерживая ее за пластмассовую рукоятку в одной руке, а устройство отсчетное УО-101 – в другой. Изменяя направление измерительной оси АП, добейтесь максимального показания на индикаторе.

Если показания на индикаторе слишком малы, переключитесь на более чувствительный предел измерения, установив переключатель **200/2000** в положение **200**. Если на индикаторе появляется символ перегрузки (цифра 1 в левом десятичном разряде индикатора при отсутствии цифр в других разрядах), то это означает, что напряженность поля в точке измерения превышает величину установленного предела. Наиболее оптимальным для проведения измерений является предел, на котором можно получить отсчет с максимальным количеством значащих цифр.

12. Измерение модуля проекции вектора напряженности электрического поля на измерительную ось АП.

12.1. Возьмите в одну руку УО-101, а в другую – АП. Внесите АП на вытянутой руке в исследуемое поле. При этом, на экране индикатора УО-101 появятся показания U_A , соответствующие проекции вектора напряженности поля на измерительную ось АП.

12.2. Поскольку поляризация измеряемого поля заранее неизвестна, измерения производятся трехортогональным способом. Для этого необходимо согласно п. 12.1. провести в выбранной точке пространства измерение трех взаимно-перпендикулярных значений, соответствующих проекции вектора напряженности электрического поля (U_{Ax} , U_{Ay} и U_{Az} – показания индикатора УО-101 для электрического поля)

12.3. Найдите среднеквадратическое значение модуля проекции вектора напряженности электрического (магнитного) поля на измерительную ось E_i в В/м по формулам:

$$E_i = K_{Ai} \cdot K_f; \quad (1)$$

$$K_{Ai} = A \cdot \left[U_{Ai} + \frac{B\sqrt{U_{Ai}}}{C + \sqrt{U_{Ai}}} \right]. \quad (2)$$

где: K_A – амплитудный коэффициент АП, В/м; K_f – частотный коэффициент АП; U_{Ai} – показания индикатора УО-101, мВ; А, В, С – коэффициенты, задающие амплитудную характеристику АП.

Значения коэффициентов А, В, С для данного измерителя напряженности поля соответственно равны: А = 0,0841; В = 79,9; С = 10,48. Значение K_f для диапазона частот от 1,0 до 300 МГц принимается равным 1,0.

12.4. После проведенных измерений и расчетов вычислить действующее значение модуля напряженности электрического поля в исследуемой точке:

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2}. \quad (3)$$

12.5. Каждое измерение из трех выполняется одинаково и отличается различным направлением измерительной оси АП в точке измерения. Единственное условие, которое необходимо выполнить – это соблюдать взаимную ортогональность трех выбранных направлений.

12.6. При проведении измерений согласно п.п. 12.5. следует оценить изменение показаний измерителя при повороте АП относительно оси ручки на 180° . Если изменение показаний превышает 20 %, необходимо проводить измерения следующим образом: при измерении согласно п.12.5. модуля проекции вектора напряженности электрического (магнитного) поля на измерительную ось АП необходимо устанавливать АП в два положения, отличающиеся поворотом относительно оси ручки на 180° . Для каждого положения АП необходимо по формулам (1), (2) и (3) определить измеренные значения напряженности поля E^0 и E^{180} . Затем вычислить напряженность E электрического поля по формуле:

$$E = \sqrt{E^0 \cdot E^{180}}. \quad (4)$$

12.7. Занести фоновое значение напряженности электрического поля в табл. 4.

12.8. Определить фоновое значение плотности потока энергии (ППЭ) по формуле:

$$P = 0,265 \times E^2,$$

где Р – ППЭ электромагнитного поля в мкВт/см²; Е – напряженность электрического поля в В/м. Результаты расчетов также занести в табл. 4.

13. Переведите последовательно ключи S_1 и S_7 в положение 1.
14. Установите напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора равное 10 В.
15. Выполните измерения и расчеты в соответствии с п. 12. Результаты измерений занести в табл. 4.
16. Повторите измерения и расчеты, изменяя напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора через 10 В. Результаты занесите в табл. 4.
17. Переведите последовательно ключи S_7 и S_1 в положение 0.
18. Повторить измерения по п. 12-17 удаляясь от ограждения на 2 и 4 метра.
19. Построить зависимости среднеквадратического значения модуля НЭП и ППЭ в зависимости от величины напряжения на первичной и вторичной обмотке высоковольтного трансформатора и места проведения измерения.
20. Объяснить полученные зависимости НЭП и ППЭ
21. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 4

*Результаты измерения напряженности поля создаваемого
коронной переменного тока*

Величина первичного/вторичного напряжения высоковольтного трансформатора, В	U_{Ax}	U_{Ay}	U_{Az}	Е кВ/м	ППЭ мкВт/см ²	Примечание
Непосредственно у установки						
0,0/0,0						Установка отключена
10,0/3500						Установка включена
20,0/7000						
30,0/10500						
....						
Расстояние от установки 2 м						
0,0/0,0						Установка отключена
10,0/3500						Установка включена
20,0/7000						
30,0/10500						
....						
Расстояние от установки 4 м						
0,0/0,0						Установка отключена
10,0/3500						Установка включена
20,0/7000						
30,0/10500						
....						

6. Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие обязательные составные части:

1. Титульный лист, оформленный в соответствии с установленными требованиями;
2. Цели выполнения работы;
3. Краткое изложение теоретических вопросов, касательно содержания работы;
4. Термины и определения;
5. Используемые технические средства;
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе ЛР)
7. Описание основной части (краткая характеристика лабораторной установки, ее схема, результаты измерений, представленные в форме таблиц и графиков);
8. Анализ полученных результатов;
9. Отчет составляется общим на бригаду студентов.
10. Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

7. Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы являются причиной возникновения электромагнитных помех при коронировании?
2. Назовите приблизительные границы спектра электромагнитных помех, создаваемого линиями электропередач при коронировании.
3. Как определяется относительный логарифмический уровень помех, создаваемых короной переменного тока?
4. Как на основе измерений определяется НЭП электромагнитных помех, создаваемых короной переменного тока?
5. Как на основе измерений определяется ППЭ электромагнитных помех, создаваемых короной переменного тока?
6. Как зависят измеренные значения НЭП и ППЭ от величины первичного и вторичного напряжения высоковольтного трансформатора и от места проведения измерений?

8. Список литературы

1. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
2. Кафиева К.Я. Помехи от короны на проводах линий электропередачи. – М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 145 с.
3. Левитов В.И. Корона переменного тока. – М.: Энергия, 1969. – 272 с.

Лабораторная работа № 4
ИЗУЧЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ И УЗКОПОЛОСНЫХ СПЕКТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ СОЗДАВАЕМЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ

Цель работы: изучить качественные и количественные характеристики спектров некоторых типов электромагнитных помех, ознакомиться с применением цифровых запоминающих двухканальных осциллографов типа АСК – 3106, научиться работать с профессиональной версией программного обеспечения. Измерить спектры конкретных типов электромагнитных помех в высоковольтной лаборатории.

1. Общие сведения

Спектральные методы анализа находят все более широкое применение при изучении проблемы электромагнитной совместимости технических средств. Основным преимуществом применения спектральных методов по сравнению с традиционными методами анализа во временной области является возможность значительного упрощения задачи, поскольку вместо применения методов дифференциального и интегрального исчисления и численного интегрирования систем интегродифференциальных уравнений задача сводится к операциям перемножения спектров сигналов и амплитудно-фазовых характеристик каналов их передачи.

Источники электромагнитных помех классифицируются в основном по картине их проявления в диапазоне частот или иными словами по свойствам создаваемого ими высокочастотного спектра. В соответствии с этими свойствами различают широкополосные и узкополосные источники. Помеха считается узкополосной, если ее спектр сосредоточен в основном в относительно узкой полосе частот около некоторой фиксированной частоты ω_0 и широкополосной, если это условие не выполняется. Источники узкополосных электромагнитных помех, как правило являются искусственно созданными человеком (радиопередатчики, устройства, вызывающие появление высших гармоник и пр.) Такие источники обычно имеют линейчатый спектр. Широкополосные помехи обладают спектром с очень близко или даже бесконечно близко расположенными друг к другу спектральными линиями (непрерывный спектр или плотность распределения амплитуд). Как правило, это естественные помехи: разряды молнии, переходные процессы в электроустановках и пр.

2. Ряд и интеграл Фурье

Понятие о разложении периодических функций в ряд Фурье можно считать общеизвестным. Поэтому здесь напомним лишь основные соотношения и определения.

Всякая периодическая функция может быть представлена в виде разложения по тригонометрическим функциям:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos\left(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k\right) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}\right)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt,$$

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = b_k / a_k.$$

Величина c_0 выражает среднее значение функции за период и часто называется постоянной составляющей:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt.$$

Ряд Фурье может также быть записан в комплексной форме:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{j2\pi k \frac{t}{T}}$$

Здесь $2C_k = c_k e^{-j\varphi_k} = a_k - jb_k$; $c_k = 2|C_k|$, $c_0 = C_0$

В приведенных формулах коэффициенты разложения имеют размерность исходной функции.

Для непериодических, абсолютно интегрируемых функций также применяя разложение по Фурье, устремив период T к бесконечности и осуществив предельный переход от суммы к интегралу получаем:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{S}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Здесь $\dot{S}(\omega)$ выражает не непосредственно амплитуду, а так называемую спектральную плотность или, как обычно называют комплексный спектр непериодической функции, а ее абсолютное значение – просто спектром:

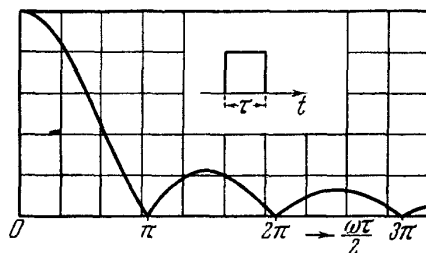
$$\Phi(\omega) = |\dot{S}(\omega)|$$

В заключение следует сказать, что размерность, как комплексного спектра, так и просто спектра равна размерности исходной функции поделенной на Гц.

3. Спектры некоторых периодических и непериодических функций

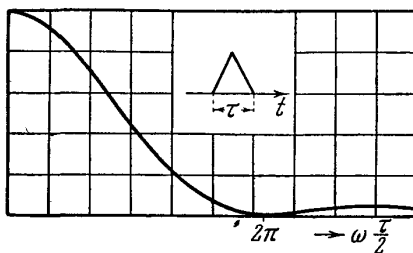
Спектральная плотность прямоугольного импульса определяется формулой:

$$S(\omega) = h \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j\omega t} dt = q \frac{\sin \omega \frac{\tau}{2}}{\omega \frac{\tau}{2}}, \text{ где } q = h\tau \text{ — площадь импульса.}$$



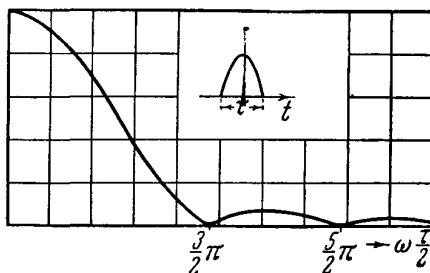
Спектральная плотность треугольного импульса

$$S(\omega) = q \frac{1 - \cos \omega \frac{\tau}{2}}{\frac{1}{2}(\omega \frac{\tau}{2})^2}, \text{ где } q = \frac{1}{2}h\tau \text{ — площадь импульса}$$



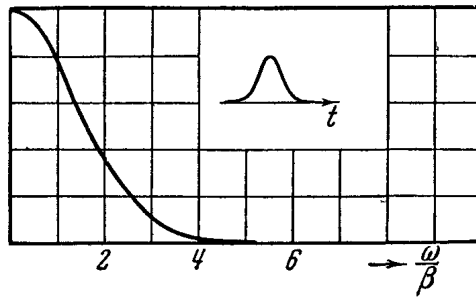
Спектральная плотность косинусоидального импульса

$$S(\omega) = q \frac{\cos \omega \frac{\tau}{2}}{1 - (\frac{2}{\pi} \omega \frac{\tau}{2})^2}, \text{ где } q = \frac{2}{\pi}h\tau \text{ — площадь импульса.}$$



Спектральная плотность колокольного импульса $f(t) = e^{-\beta^2 t^2}$

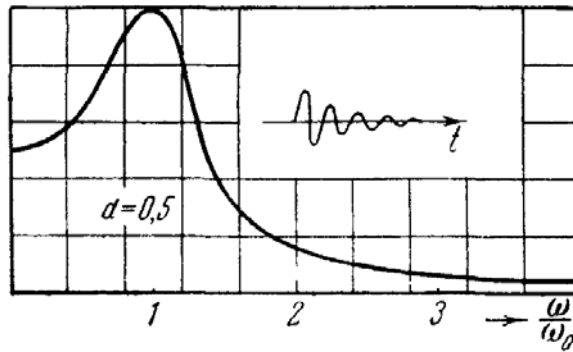
$$S(\omega) = \frac{\sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\frac{\omega^2}{4\beta^2}}$$



Спектральные плотности всех вышеперечисленных импульсов являются действительными функциями.

Спектр затухающей синусоиды $f(t) = \sigma(t)e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t$

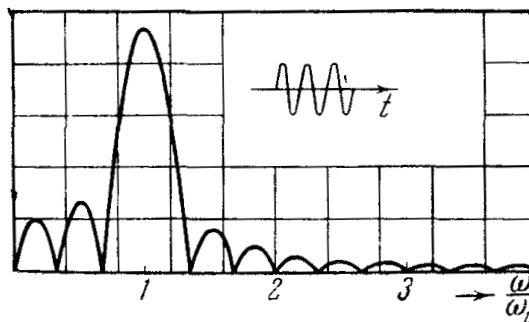
$$\dot{S}(\omega) = \frac{\omega_0}{\alpha^2 - \omega^2 + \omega_0^2 + 2j\alpha\omega}$$



Спектр импульса в форме отрезка синусоиды, состоящего из целого числа периодов n :

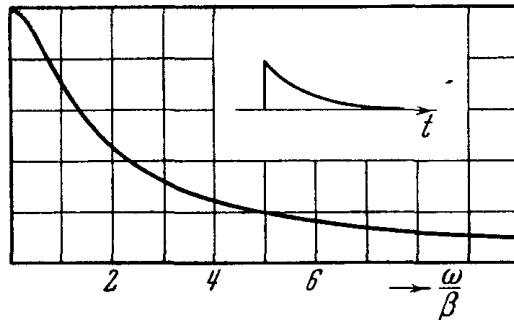
$$f(t) = [(\sigma(t+nT/2) - \sigma(t-nT/2))] \sin \omega_0 t$$

$$\dot{S}(\omega) = \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} (-1)^n \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$$



Спектр экспоненциального импульса $f(t) = \sigma(t)e^{-\beta t}$

$$\dot{S}(\omega) = \frac{1}{\beta + j\omega}$$



Очень часто импульсы определенной формы периодически повторяются. Установим связь между спектрами одиночного импульса и периодической последовательности таких же импульсов. Наперед ясно одно: спектр одиночного импульса есть спектр сплошной, так как импульс есть непериодическая функция. Если же импульс какой угодно формы периодически повторять, то мы получим периодическую функцию, обладающую дискретным гармоническим спектром.

Пусть спектр одиночного импульса есть

$$S_0(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega t} f(t) dt$$

Если такой импульс повторять через промежутки времени T , то получится периодическая функция с периодом T . Коэффициенты линейчатого спектра этой функции могут быть получены по формуле

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} f(t) dt$$

Сопоставляя эти формулы мы видим, что значения непрерывной функции S_0 совпадают со значениями C_k (с точностью до постоянного множителя $1/T$ при определенных значениях аргумента, а именно при

$$\omega_1 = 2\pi \frac{k}{T} = k\omega_1$$

Таким образом, совокупность точек TC_k , определяющих дискретный спектр периодической последовательности импульсов, лежит на кривой $S_0(\omega)$, определяющей спектр одиночного импульса.

Можно еще сказать, что линейчатый спектр периодической последовательности импульсов вписывается в кривую сплошного спектра одиночного импульса.

На этом примере легко проследить предельный переход от ряда к интегралу Фурье: если период повторения возрастает, т. е. если импульсы повторяются все реже и реже, то точки, изображающие линейчатый спектр, оставаясь на кривой S_0 , располагаются на ней все теснее, пока не образуют непрерывную последовательность, т. е. кривую, совпадающую с S_0 .

4. Аппаратура для получения процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи

Схема установки, обеспечивающая получение процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи приведена на рис. 1. Данная схема обеспечивает получение на сопротивлении R_1 следующих процессов:

- переменного несинусоидального напряжения, создаваемого нелинейными нагрузками (в основном люминисцентными лампами) учебного корпуса (в первом положении переключателя S_3);
- выпрямленного однополупериодного напряжения (во втором положении переключателя S_3).

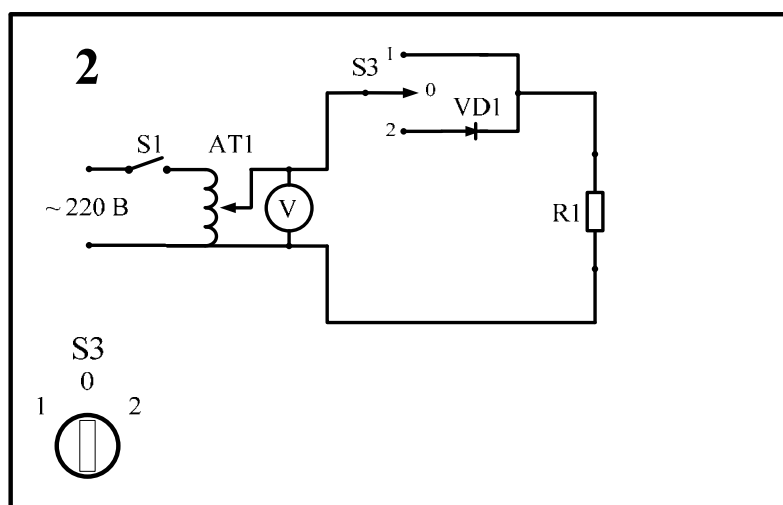


Рис. 1. Схема установки, обеспечивающая получение процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи

5. Аппаратура для измерений

В качестве основного прибора, предназначенного для проведения измерений параметров и формы процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи принят осциллограф цифровой, запоминающий двухканальный типа АСК – 3106 (рис. 2). Данный прибор предназначен работать совместно с компьютером и укомплектован программным обеспечением двух типов:

- стандартная версия (АСК-3106-PO1);
- профессиональная версия (АСК-3106-PO5).

При выполнении данной работы использована профессиональная версия. Для ознакомления с порядком работы данного осциллографа необходимо ознакомиться с руководством по эксплуатации.



Рис. 2. Общий вид осциллографа цифрового, запоминающего двухканального типа АСК – 3106

6. Порядок выполнения работы.

1. Подключить кабель *USB* осциллографа к компьютеру.
2. Включить осциллограф.
3. Включить компьютер.
4. С помощью ярлыка на рабочем столе компьютера запустить программу математического обеспечения осциллографа.
5. В разделе меню «Панели» открыть панели Управления, Измерений, Спектрального анализа.
6. На панели управления установить:
 - канал А – разрешить отображение (установить птичку в окошке);
 - входной диапазон сигнала по каналу А – 10 В/дел.
 - установить нулевое смещение через меню Настройки-калибровка смещений;
 - тип входа канала А – DC;
 - канал В – запретить отображение (убрать птичку в окошке);
 - в окне Запуск убрать птичку;
 - в окне «режим» – однократный;
 - в окнах «источник» – А, восход;
 - в окне «выборки» – 1 кГц.
7. Убедиться, что все переключатели на главной панели лабораторной установки находятся в нейтральном положении (положение «0»). Ручка автотрансформатора должна находиться в крайнем положении при вращении против часовой стрелки.
8. Переводом ключа S_1 из положения «0» в положение «1» включить лабораторную установку;
9. Переводом ключа S_3 из положения «0» в положение «1» подать напряжение на автотрансформатор.

10. К клеммам измерения напряжения автотрансформатора подключить мультиметр установленный на измерение переменного напряжения.

11. Установить с помощью автотрансформатора напряжение на его вторичной обмотке $U_2 = 20V$.

12. Нажать кнопку «Запуск» на панели управления осциллографа на экране компьютера после чего на экране главной панели осциллографа появится изображение сигнала.

13. Выделяя на обзорном графике последовательно один, два и т. д. до 10 периодов с помощью панели спектрального анализа получить спектрограммы выделенных участков процесса.

На вкладке «Настройки» установить в окне «Отображать» – 50; в окне Мин. Индекс –0

Записать значения Основной частоты, Основного уровня, Постоянного уровня, коэффициента нелинейных искажений. Результаты занести в таблицу.

14. Снизить напряжение на автотрансформаторе до нуля.

15. Переводом ключа S_3 из положения «1» в положение «2» и подать напряжение на автотрансформатор;

16. Повторить пункты 12-14 применительно к сигналу однополупериодного выпрямления. Результаты измерений занести в таблицу.

Результаты спектрального анализа импульсной синусоидальной (пульсирующей) помехи

Количество периодов	Основная частота	Основной уровень	Постоянный уровень	Коэффициент нелинейных искажений
1				
2				
3				
...				

7. Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие обязательные составные части:

1. Титульный лист, оформленный в соответствии с установленными требованиями.
2. Цели выполнения работы.
3. Краткое изложение теоретических вопросов, касательно содержания работы.
4. Термины и определения.

5. Используемые технические средства.
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе ЛР).
7. Описание основной части (краткая характеристика лабораторной установки, ее схема, результаты измерений, представленные в форме таблиц и графиков).
8. Анализ полученных результатов.
9. Отчет составляется общим на бригаду студентов.
10. Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

8. Контрольные вопросы

1. Пояснить математическую основу преобразования периодической функции из временной области в частотную область?
2. Пояснить математическую основу преобразования импульсной функции из временной области в частотную область?
3. Для чего при исследовании передачи электромагнитных помех используется преобразование сигналов помех из временной области в частотную область?
4. Какие качественные и количественные закономерности изменения спектрального состава последовательностей импульсов установлены в ходе выполнения работы?

Лабораторная работа № 5
ИЗУЧЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ И УЗКОПОЛОСНЫХ СПЕКТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ, СОЗДАВАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ
ПРОЦЕССАМИ

Цель работы: изучить качественные и количественные характеристики спектров некоторых типов электромагнитных помех, ознакомиться с применением цифровых запоминающих двухканальных осциллографов типа АСК – 3106, научиться работать с профессиональной версией программного обеспечения. Измерить спектры конкретных типов электромагнитных помех в высоковольтной лаборатории.

Лабораторная работа № 6
ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ, СОДЕРЖАЩИХ МОЩНЫЕ
СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы: познакомиться с проблемой электромагнитной совместимости технических средств в узлах нагрузки электрических сетей, изучить методы расчета уровня несинусоидальности в узле нагрузки, содержащем мощные статические преобразователи и способы ограничения уровней гармоник напряжений и токов.

Введение

В идеальной электроэнергетической системе (ЭЭС) энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, изменяющихся во времени по синусоидальному закону. В реальных энергосистемах эти условия не выполняются вследствие того, что многие потребители электроэнергии имеют нелинейные вольт-амперные характеристики нагрузки (вентильные преобразователи, силовая электронная преобразовательная техника, электродуговые сталеплавильные печи на металлургических заводах и предприятиях других отраслей промышленности).

Проблема искажения синусоидальной формы кривых тока и напряжения изучается в настоящей лабораторной работе.

Возросший интерес к этой проблеме связан с увеличением числа и единичной мощности нелинейных электронных устройств, используемых для управления силовыми установками и системами.

Отклонения форм кривых тока и напряжения от правильной синусоиды обычно представляют с помощью гармонических составляющих.

Гармоника определяется как значение сигнала с частотой, кратной фактической частоте сети, например основной частоте сигнала, производимого генератором. Следует различать гармоники в установившихся режимах, когда форма кривой не изменяется, и гармоники в переходных режимах, когда форма кривой существенно меняется от цикла к циклу.

Существенной характеристикой, определяющей форму кривой, является фазовый угол (угол сдвига) гармоники по отношению к основной частоте. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их относительного положения.

Как и многие другие формы искажений, гармоники воздействуют на все виды электрического оборудования, находящегося на довольно большом расстоянии от места генерации гармоник.

Наиболее ясно ощущается влияние гармоник, возникающих в силовых цепях, на качество звука телефонной связи, снижающегося из-за наводимого силовыми гармониками гармонического шума. Однако существуют и другие, менее слышимые, но зачастую более опасные воздействия, выражающиеся в ложных срабатываниях ответственной управляющей и защитной аппаратуры, перегрузке силовых аппаратов и систем. Очень часто длительное существование искаженной кривой напряжения приводит к разрушению силовых конденсаторов. Кроме того, при неблагоприятном состоянии электрической сети придется чаще ремонтировать или заменять выходящие из строя элементы. В этом случае применение даже элементарных мер защиты оборудования в виде фильтров, устанавливаемых у потребителя, приводит к существенному улучшению кривой напряжения.

Большое развитие получили технологии, основанные на использовании управляемых выпрямителей, что привело к увеличению уровня гармоник тока в сетях. Вместе с тем при разработке такого оборудования обычно предполагают, что напряжение в точке присоединения синусоидально. Это возможно лишь в случае, если энергетическая система, питающая оборудование, имеет малое гармоническое сопротивление. Следовательно, мелкие потребители, питающиеся от такой сети, подвергаются дополнительным опасностям, связанным с влиянием гармоник на управляющее оборудование, установленное в их сетях.

1. Статический преобразователь как источник гармоник и другие источники гармоник

Нелинейные элементы электрических цепей синусоидального тока могут быть представлены схемой замещения с источником тока v -й гармоники I_v внутренней индуктивной проводимостью b_v (рис. 1, а) либо схемой замещения с источником э. д. с. E_v и внутренним индуктивным сопротивлением x_v (рис. 1, б), нагрузкой является сопротивление контура коммутации x_{kv} (проводимость b_{kv}).

Наибольшее распространение получила схема замещения с источником тока, мощность которого принимается неограниченной ($b_v = 0$).

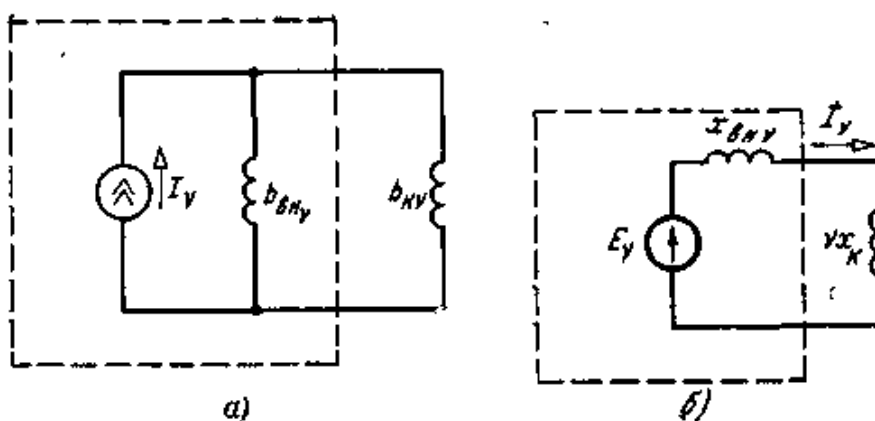


Рис. 1. Схемы замещения вентильных преобразователей

Если принять, что э.д.с. питающей энергосистемы синусоидальна и система импульсно-фазового управления вентильным преобразователем симметрична, т. е. интервалы между импульсами одинаковы, то порядок гармоник в кривых первичных токов преобразователя будет определяться выражением $\nu = kp \pm 1$, где p — число фаз преобразователя; $k = 1, 2, 3, \dots$

Данная формула справедлива как для управляемых, так и для неуправляемых преобразователей.

На промышленных предприятиях применяются в большинстве случаев шестифазные преобразователи, которые генерируют в питающую сеть гармоники 5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25-го и более высоких порядков и 12-фазные преобразователи, которые генерируют гармоники 11; 13; 23; 25...-го порядков. Однофазная (эквивалентная шестифазная) схема, изображенная на рис. 2, а, а также двухфазная (эквивалентная двенадцатифазная схема), показанная на рис. 2, б.

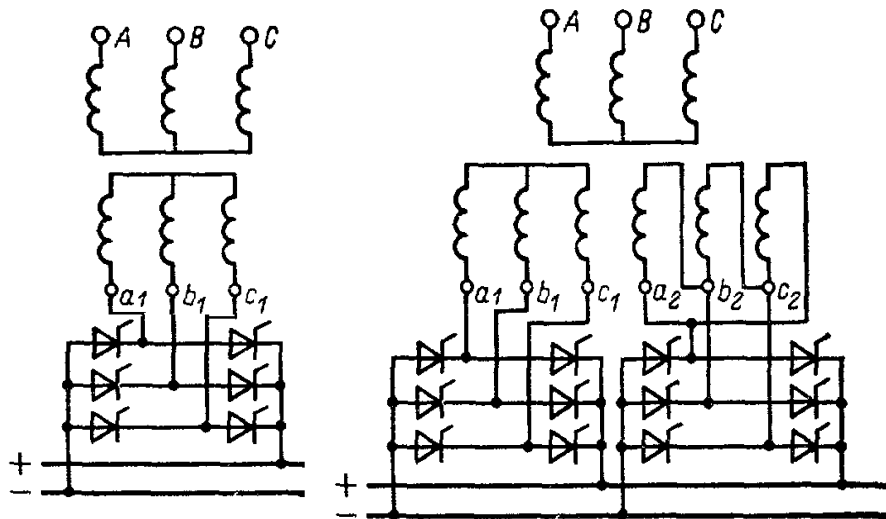


Рис. 2. Однофазовая (а) и двухфазовая (б) схемы статических преобразователей

При увеличении числа фаз преобразователя искажение кривой первичного тока его уменьшается; уменьшается также содержание гармоник в кривой напряжения питающей сети.

Форма кривой первичного тока преобразователя для семы, изображенной на рис. 2, а (рис. 3) зависит от индуктивности контура коммутации, включающей в себя индуктивности питающей сети преобразовательного трансформатора, и угла управления преобразователем.

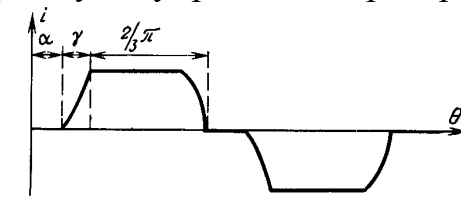


Рис. 3. Кривая первичного тока однофазового преобразователя $\Theta = \omega t$

Каждый полупериод кривой тока состоит из двух коммутационных участков длительностью γ , соответствующих одновременному горению погасающего и вступающего в работу вентиля, и внекоммутационного участка. На коммутационных участках кривая тока изменяется по косинусоиде с частотой, равной частоте первой гармоники напряжения сети. На внекоммутационных участках величина тока принимается неизменной, что справедливо при достаточно большой индуктивности цепи выпрямленного тока.

В управляемых вентильных электроприводах обычно не достигается идеального сглаживания тока, так как увеличение индуктивности цепи выпрямленного тока лимитируется повышением инерционности системы автоматического управления электроприводом. Для вентильных

электроприводов прокатных станов отношение катодной и анодной индуктивностей находится обычно в пределах 10—13; в этом случае без большой погрешности можно принимать индуктивность цепи выпрямленного тока бесконечно большой. В равной мере это относится к вентильным электроприводам, применяемым в других отраслях промышленности.

Вентильные преобразователи, работающие на электролитические ванны, крановую нагрузку и т.п., оборудуются на стороне выпрямленного напряжения сглаживающими дросселями, индуктивность которых значительно превосходит индуктивность контура коммутации и может быть принята также бесконечно большой. Таким образом, при анализе гармоник тока, генерируемых вентильными преобразователями в системах электроснабжения промышленных предприятий, индуктивность цепи выпрямленного тока можно считать равной бесконечности.

Амплитуда ν -й гармоники первичного тока $I_{\nu m}$ определяется по формуле:

$$I_{\nu m} = \sqrt{a_{\nu}^2 + b_{\nu}^2},$$

Где a_{ν} и b_{ν} — коэффициенты разложения кривой первичного тока (рис. 3) в ряд Фурье.

Выражения для этих коэффициентов имеют вид:

$$a_{\nu} = \frac{2\sqrt{3}E_m \sin \frac{\nu\pi}{3}}{\nu\pi x_k} \left[\frac{1}{\nu+1} \sin(\nu+1) \frac{\gamma}{2} \sin(\nu+1)\psi - \frac{1}{\nu-1} \sin(\nu-1) \frac{\gamma}{2} \sin(\nu-1)\psi \right];$$

$$b_{\nu} = \frac{2\sqrt{3}E_m \sin \frac{\nu\pi}{3}}{\nu\pi x_k} \left[-\frac{1}{\nu+1} \sin(\nu+1) \frac{\gamma}{2} \cos(\nu+1)\psi + \frac{1}{\nu-1} \sin(\nu-1) \frac{\gamma}{2} \cos(\nu-1)\psi \right].$$

Здесь E_m — амплитуда фазной э.д.с. питающей энергосистемы; $\psi = \alpha + \gamma/2$; α и γ — углы управления и коммутации.

Для основной гармоники коэффициенты разложения представляются более простыми формулами:

$$a_1 = \frac{3E_m}{2\pi x_k} \sin \gamma \sin 2\psi;$$

$$b_1 = \frac{3E_m}{2\pi x_k} (\gamma - \sin \gamma \cos 2\psi).$$

Основными источниками гармоник тока в настоящее время являются выпрямители и инверторы. Все они могут быть разделены на три большие группы: 1 — преобразователи большой мощности, используемые, например, в металлургии и в передачах постоянного тока высокого напряжения; 2 — преобразователи средней мощности, подобные исполь-

зубым в промышленности для управления электромоторами и на железной дороге; 3 – маломощные преобразователи однофазных устройств, таких, как телевизоры и устройства подзарядки аккумуляторных батарей.

Формы кривых напряжений и токов преобразователей первой группы близки к идеальным (рис. 3) и могут быть приняты за основу для получения характеристик гармоник стандартных схем преобразователей. На эти данные обычно ссылаются при оценке гармоник в кривых, отличающихся от идеальной.

До появления статических преобразователей наличие гармонических искажений в энергосистемах ассоциировалось, в первую очередь, с работой электрических машин и трансформаторов. Действительно, основными источниками гармоник, существовавшими ранее в электрических системах, были намагничивающие токи силовых трансформаторов.

После того как выполнение требований по конструированию экономичных генераторов привело к искажению формы кривой напряжения, генераторы электрических станций стали вторым основным источником гармоник.

Современные трансформаторы и вращающиеся машины в нормальных условиях работы не вносят существенных искажений в сеть. Однако в переходных процессах и в условиях работы, отличных от проектируемых, эти искажения могут сильно увеличиться.

Кроме статических преобразователей, существует еще два вида нелинейных нагрузок, чье влияние на формы кривых напряжения и тока оказывается значительным, – это дуговые печи и флюоресцентные лампы.

2. Влияние гармоник на элементы системы электроснабжения

2.1. Силовые конденсаторы

После того как выявлены источники гармоник и определены их уровни, необходимо выяснить характер влияния гармоник на работу электрооборудования. Все элементы систем электроснабжения должны быть рассмотрены с точки зрения их чувствительности к гармоникам. На основе этого рассмотрения затем вырабатываются рекомендации по допустимым уровням гармоник в сетях.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются: увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов; снижение эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии; старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы; ложная работа оборудования.

Резонансы. Наличие в сетях конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и выход их из строя.

Параллельный резонанс возникает вследствие высокого сопротивления гармоникам тока на резонансной частоте. Так как большинство гармоник генерируется источниками близкими по своим свойствам к источникам тока, то это вызывает увеличение напряжения гармоник и большие их токи в каждой из параллельных ветвей.

Параллельные резонансы могут возникать в различных условиях, простейшие из них соответствуют случаю присоединения конденсаторов к тем же шинам, к каким присоединен источник гармоник. Резонанс в этом случае возникает между источником гармоник и конденсатором.

Предполагая сопротивление источника полностью индуктивным, резонансную частоту определим по формуле

$$f_p = f \sqrt{S_{K3} / Q_K}$$

где Q_K — мощность конденсаторов, S_{K3} — мощность короткого замыкания в точке общего присоединения.

Другая возможность возникновения параллельного резонанса иллюстрируется рис. 4. Ток гармоник, идущий от их источника, встречает большое сопротивление нагрузок на шинах. Это может привести к резонансу между индуктивностью системы L_S и емкостью либо системы C_S , либо конденсаторов нагрузки C_L .

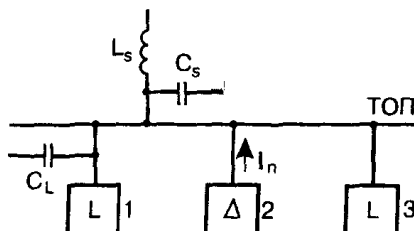


Рис. 4. Параллельный резонанс:

1,3 – нагрузки; 2 – источник гармоник; ТОП – точка общего присоединения

Для того чтобы определить условия резонанса в конкретном случае, необходимо измерить токи гармоник в ветвях каждой нагрузки и ветви питания, а также напряжение гармоник на шинах. Если ток, текущий от шин в энергосистему, мал, а напряжение велико, это говорит о наличии резонанса между L_S и C_S . Если же значителен ток гармоники в ветви нагрузки 1 при большом напряжении гармоники на шинах, резонанс происходит между L_S и C_L .

Последовательный резонанс иллюстрируется рис. 5. На высоких частотах сопротивление нагрузки может не учитываться, в то время как сопротивление конденсаторов резко снижается. Резонансную частоту этой цепи определяют по формуле

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_T}{Q_K e_{K3}} 100 - \frac{P_H^2}{Q_K^2}}$$

где P_H - мощность нагрузки; S_T мощность трансформатора; e_{K3} напряжение короткого замыкания, %.

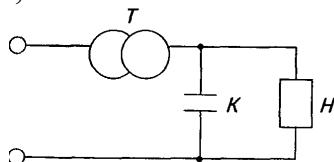


Рис. 5. Схема последовательного резонанса:

K – конденсатор; T – трансформатор; H – активная нагрузка

При последовательном резонансе большой ток гармоники может течь через конденсатор при относительно небольшом напряжении гармоники. Фактическое значение тока определяется добротностью контура. Обычно она составляет порядка 5 на частоте 500 Гц.

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

Другой областью, где резонансы могут приводить к выходу из строя элементов оборудования, являются системы управления нагрузкой с помощью тональных частот. Для того чтобы предотвратить поглощение сигналов силовыми конденсаторами, их цепи разделяются настроенными последовательными фильтрами (фильтр-пробка) (рис. 6). В случае местного резонанса гармоники тока в цепи силового конденсатора резко возрастают, что приводит к выходу из строя настроенного конденсатора последовательного фильтра.

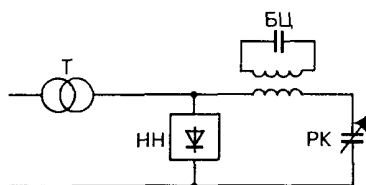


Рис. 6. Настроенная цепь с фильтром-пробкой для управляющего сигнала:

T – Трансформатор; $БЦ$ – блокирующая цепь; $НН$ – нелинейная нагрузка; $РК$ – регулирующий конденсатор

2.2. Вращающиеся машины

Потери электроэнергии. Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводниках статора и ротора при этом больше из-за вихревых токов и поверхностного эффекта, чем определяемые омическим сопротивлением. Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, приводят к дополнительным потерям.

В случае асинхронного двигателя с ротором со скошенными пазами и пульсирующими магнитными потоками в статоре и роторе высшие гармоники вызывают дополнительные потери в стали. Значение этих потерь зависит от угла скоса пазов и характеристик магнитопровода.

Влияние формы кривой напряжения на потери в асинхронном двигателе было показано на примере двигателя мощностью 16 кВт, работающего с полной нагрузкой при частоте сети 60 Гц и номинальном напряжении. При синусоидальной форме кривой напряжения полные потери составили 1,3 кВт, а при квазипрямоугольной форме – 1,6 кВт.

Среднее распределение потерь от высших гармоник в двигателе постоянного тока, питающегося от выпрямителя, составляет: обмотки статора 14,2%, цепи ротора 41,2%, торцевые зоны 18,8 %; потоки в пазах 25,8%.

За исключением последней составляющей потерь, их распределение в синхронных машинах приблизительно аналогично. Следует отметить, что соседние нечетные гармоники в статоре синхронной машины вызывают в роторе гармонику одинаковой частоты. Например, 5-я и 7-я гармоники в статоре вызывают в роторе гармоники тока 6-го порядка, вращающиеся в разные стороны. Для линейных систем средняя плотность потерь на поверхности ротора пропорциональна $(I_5^2 + I_7^2)$, однако из-за разного направления вращения плотность потерь в некоторых точках пропорциональна $(I_5^2 + I_7^2)^2$.

Дополнительные потери наиболее серьезный эффект, вызываемый гармониками во вращающихся машинах. Они приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с ротором типа «беличья клетка» допускают более высокие потери и температуру, если это не приводит к недопустимой температуре статора; поэтому двигатели с фазным ротором оказываются более чувствительными к гармоникам. Некоторые технические руководства ограничивают допустимый уровень тока обратной последовательности в генераторе 10%, а уровень напряжения обратной последовательности на вводах асинхронных двигателей – 2 %. Допус-

тимось гармоник определяют по тому, какие уровни напряжений и токов обратной последовательности они создают.

Моменты вращения, создаваемые гармониками.

Ток гармоники в статоре машины вызывает движущую силу, приводящую к появлению на валу вращающихся моментов в направлении вращения магнитного поля гармоники. Поэтому вращающиеся моменты, создаваемые гармониками, образующими прямую последовательность, совпадают с направлением вращения ротора, а образующими обратную последовательность направлены противоположно.

Так как значение скольжения для токов всех гармоник достаточно велико по сравнению со скольжением для тока основной гармоники, относительные вращающиеся моменты весьма малы, к тому же они частично компенсируются вследствие различного направления. Поэтому влияние их на средний момент пренебрежимо мало. Вместе с тем они могут привести к значительной вибрации вала.

2.3. Устройства релейной защиты в энергосистемах

Гармоники могут нарушать работу устройств защиты или ухудшать их характеристики. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства. Цифровые реле и алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или точки пересечения нуля, особенно чувствительны к гармоникам.

В большинстве случаев изменения характеристик незначительны. Испытания показали, что большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20 %. Однако увеличение доли мощных преобразователей в сетях может в будущем изменить ситуацию.

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

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

Более существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, основанной на измерении сопротивлений. Дистанционная защита, основанная на измерении сопротивлений на основной частоте, может давать существенные ошибки в случае наличия в токе КЗ высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток КЗ течет через землю (сопротивление

земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма велика.

В случае металлического КЗ в токе и напряжении преобладает основная частота. Однако в связи с насыщением трансформатора тока возникает вторичное искажение кривой, особенно в случае большой апериодической составляющей в первичном токе. В этих случаях также возникают проблемы обеспечения нормальной работы защиты.

В установившихся режимах работы нелинейность, связанная с перевозбуждением трансформатора тока, вызывает только гармоники нечетного порядка. В переходных режимах могут возникнуть любые гармоники, наибольшие амплитуды имеют обычно вторая и третья.

Однако, все эти проблемы являются проблемами правильного проектирования. Правильный выбор оборудования устраняет множество трудностей, связанных с измерительными трансформаторами.

Фильтрация гармоник, особенно в цифровых защитах, наиболее важна для дистанционных защит. Ряд работ, выполненных в области цифровых способов фильтрации, показал, что хотя алгоритмы такой фильтрации частот достаточно сложны, получение нужного результата не представляет особых трудностей.

Влияние гармоник на системы защиты в нормальных режимах работы электрических сетей Низкая чувствительность устройств защиты к параметрам режима в нормальных условиях обуславливает практическое отсутствие проблем, связанных с гармониками в этих режимах. Исключение составляет проблема, обусловленная включением в сеть мощных трансформаторов, сопровождающимся броском намагничивающего тока. На практике высокое содержание высших гармоник в намагничивающем токе трансформатора в большинстве случаев используется для блокировки отключения выключателей высокого напряжения защитой трансформатора, несмотря на исключительно высокий пик намагничивающего тока.

Амплитуда тока зависит от индуктивности трансформатора, сопротивления обмотки и момента времени, в который происходит включение. Остаточный поток в воздушном зазоре в момент перед включением несколько увеличивает или уменьшает трудности в зависимости от полярности потока по отношению к начальному значению мгновенного напряжения. Так как ток на вторичной стороне во время намагничивания отсутствует, большой первичный ток может вызвать ложное срабатывание дифференциальной защиты.

Наиболее простым способом является использование задержки времени, однако это может привести к серьезному повреждению трансформатора, если авария произойдет во время его включения. На практи-

ке нехарактерную для сетей вторую гармонику, присутствующую в токе включения, используют для блокировки защиты, хотя защита остается достаточно чувствительной к внутренним повреждениям трансформатора во время включения.

2.4. Оборудование потребителей

Телевизоры. Гармоники, увеличивающие пик напряжения, могут вызвать искажения изображения и изменение яркости.

Флюоресцентные и ртутные лампы. Балластные устройства этих ламп иногда содержат конденсаторы, и при определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

Компьютеры. Существуют пределы на допустимые уровни искажений в сетях, питающих компьютеры и системы обработки данных. В некоторых случаях они выражаются в процентах от номинального напряжения (например, для компьютера Honeywell DEC – 3 %, IBM – 5 %) либо в виде отношения пика напряжения к действующему значению.

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

Оборудование с регулируемой тиристорами частотой вращения. Теоретически гармоники могут влиять на такое оборудование несколькими способами: провалы на синусоиде напряжения вызывают неправильную работу из-за пропусков зажигания тиристором; гармоники напряжения могут вызвать зажигание не в требуемый момент; резонанс между различными типами оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин.

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

2.5. Влияние гармоник на измерение мощности и энергии

Измерительные приборы калибруются при чисто синусоидальных токе и напряжении, поэтому при их использовании для измерения мощности при искаженных токах и напряжениях они могут давать погрешности сверх нормированных.

Значение и направление гармонических искажений (вторичной мощности) важны для коммерческих расчетов за электроэнергию, так как знак погрешности определяется направлением вторичной мощности. Исследования показали, что погрешности измерений, вызванной высшими гармониками, варьируется в широких пределах и возможны как положительные, так и отрицательные погрешности.

Наиболее распространенным прибором для измерения энергии является индукционный счетчик электромагнитной системы, вращающие и тормозящие магнитные потоки которой действуют на ротор счетчика, создавая результирующий момент вращения. В счетчике предусмотрены специальные элементы, создающие вторичные потоки и позволяющие увеличить точность измерения и скомпенсировать момент трения регистрирующего механизма. Эти элементы, создающие первичный и вторичный моменты, обычно нелинейны по отношению как к амплитуде, так и к частоте. Нелинейные элементы включают в себя токовые и напряженческие части, перегрузочные магнитные шунты и частотно-чувствительные элементы, такие, как диск, квадратурный и антифрикционный контуры.

Исследования показали, что обычно индукционные счетчики завышают мощность, потребляемую преобразователями, на несколько процентов (были отмечены случаи до 6 %) в основном вследствие слабого демпфирования в интервалы отсутствия тока. Такие потребители оказываются автоматически наказанными за внесение искажений в сеть, поэтому в их собственных интересах установка соответствующих средств для подавления гармоник. Повышенные показания счетчиков хорошо компенсируют добавочные потери мощности в сети энергосистемы, вызываемые гармониками.

Количественных данных о влиянии гармоник на точность измерения максимума нагрузки нет, однако предположительно оно такое же, как и на точность измерения энергии. Точное измерение энергии независимо от формы кривых тока и напряжения обеспечивается электронными счетчиками, имеющими более высокую стоимость.

Гармоники оказывают воздействие и на точность измерения реактивной мощности, которая точно определена лишь для случая синусоидальных токов и напряжений, и на точность измерения коэффициента мощности.

Редко упоминается влияние гармоник на точность поверки и калибровки приборов в лабораториях, хотя эта сторона вопроса также важна.

2.6. Влияние гармоник на коэффициент мощности

Компенсация реактивной мощности при искаженной форме кривых тока и напряжения встречает затруднения. Целью компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов является улучшение коэффициента мощности в случае синусоидального напряжения. Улучшение его при наличии гармоник может быть проведено с помощью фильтров высших гармоник, увеличением пульсности преобразователей и пр.

3. Алгоритм расчета уровня несинусоидальности в узле нагрузки

В основе используемого при выполнении настоящей лабораторной работы алгоритма расчета уровня несинусоидальности лежит т. н. метода гармонического баланса, обеспечивающий баланс гармонических составляющих токов во всех узлах схемы. В составе используемых математических моделей, реализованных данным алгоритмом присутствуют математические модели преобразователей, обеспечивающие учет искажений напряжений на зажимах преобразовательного трансформатора, математические модели других электроприемников и математические модели электрической сети переменного тока. Расчет проводится по методу последовательных приближений. На первом этапе задаются начальные приближения гармонического состава напряжений в узлах электрической сети. На основании этих начальных приближений проводится расчет гармонического состава переменного тока преобразователей, присутствующих в схеме, а также гармонический состав токов других нагрузок. На втором этапе проводится расчет гармонических составляющих токов и напряжений в электрической сети переменного тока. Эти этапы повторяются необходимое количество раз до достижения требуемой точности расчета.

В качестве исходных данных по преобразователям задаются параметры преобразовательных трансформаторов и сглаживающих реакторов, а также так называемые независимые параметры их режима (два значения). Такими независимыми параметрами могут быть следующие сочетания: значения угла управления и угла коммутации; значения постоянных составляющих выпрямленного напряжения и тока; значения угла управления и постоянной составляющей выпрямленного напряжения или тока и др. Конкретный состав этих параметров определяется постановкой задачи расчета.

4. Постановка задачи расчета

Схема исследуемого узла нагрузки приведена на рис. 8, а варианты значений параметров схемы и заданные значения постоянных составляющих выпрямленных напряжений и токов в табл. 1.

Для данной схемы необходимо провести расчет несинусоидальности в узле нагрузки для двух значений постоянных составляющих выпрямленных напряжений и токов для следующих вариантов:

1. В работе находится один преобразователь с группой соединения преобразовательного трансформатора звезда-звезда;

2. В работе находится один преобразователь с группой соединения обмоток преобразовательного трансформатора звезда-звезда. Для компенсации реактивной мощности и снижения уровня несинусоидальности в узле нагрузки к шинам 10 кВ подключены силовые резонансные фильтры, настроенные на частоту 5 и 7 гармоник;

3. В работе находятся два преобразователя с группой соединения преобразовательного трансформатора звезда-звезда и звезда-треугольник;

4. В работе находятся два преобразователя с группой соединения преобразовательного трансформатора звезда-звезда и звезда-треугольник. Для компенсации реактивной мощности и снижения уровня несинусоидальности в узле нагрузки к шинам 10 кВ подключены силовые резонансные фильтры, настроенные на частоту 11 и 13 гармоник;

5. Подготовка исходных данных

5.1. Подготовительная работа

На основании однолинейной схемы узла нагрузки (рис. 7) составляется его схема замещения (рис. 8). Для данной схемы замещения определяются сопротивления ветвей по формулам:

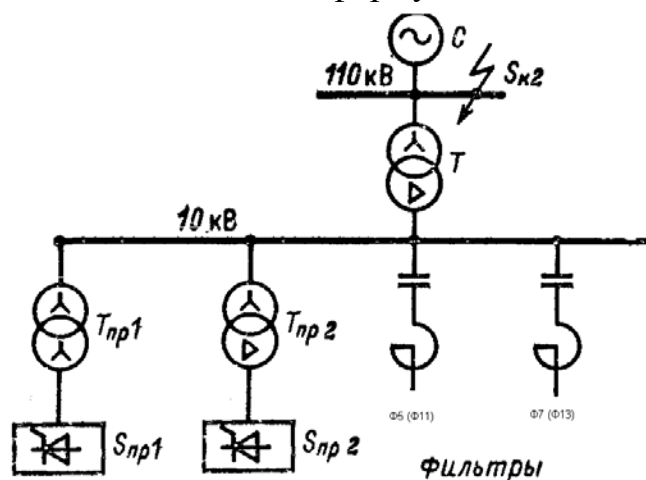


Рис. 7. Однолинейная схема узла нагрузки

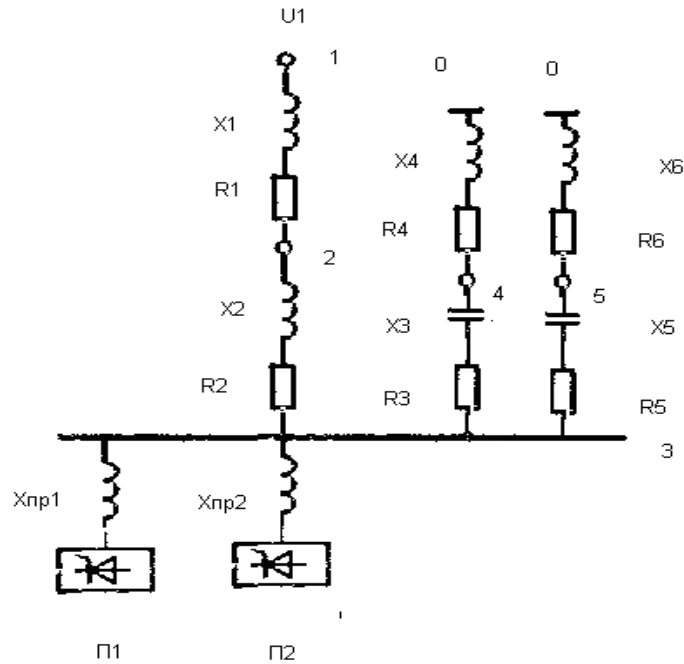


Рис. 8. Однолинейная схема замещения узла нагрузки

- индуктивное сопротивление питающей системы
- активное сопротивление питающей системы определяется с учетом добротности ее элементов (порядка 30-50):

$$X_1 = 10,5^2 (KB) / S_{K2} (MBA) \text{ Ом};$$

$$R_1 = X_1 / 30 \text{ Ом};$$

- индуктивное сопротивление трансформатора ГПП

$$X_2 = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{10,5^2 (KB)}{S_{HT1} (MBA)} \text{ Ом};$$

- активное сопротивление трансформатора ГПП

$$R_2 = \Delta P_k (кВт) \times \frac{10,5^2 (KB)}{S_{HT1}^2 (MBA)} \times 10^{-3} \text{ Ом}.$$

В случае включения в схеме одного преобразователя определяются параметры фильтров 5 и 7 гармоник:

- реактивное сопротивление конденсатора фильтра пятой гармоники

$$X_3 = Q_5 (MBAp) / 10,5^2 (KB) ;$$

где Q_5 – номинальная мощность конденсаторов фильтра пятой гармоники, принимаемая равной половине реактивной мощности однофазного преобразователя;

- активное сопротивление конденсатора фильтра пятой гармоники

$$R_3 = X_3 \times \text{tg} \delta ;$$

где $\text{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции конденсатора (принимается равным 0,003);

- реактивное сопротивление реактора фильтра пятой гармоники

$$X_4 = X_3 / 25;$$

- активное сопротивление реактора фильтра пятой гармоники

$$R_4 = X_4 \times q;$$

где q – добротность силовых реакторов (принимается усреднено равной 0,075);

- реактивное сопротивление конденсатора фильтра седьмой гармоники

$$X_5 = Q_7(MBAr) / 10,5^2(KB);$$

где Q_7 – номинальная мощность конденсаторов фильтра пятой гармоники, принимаемая равной половине реактивной мощности однофазного преобразователя;

- активное сопротивление конденсатора фильтра седьмой гармоники

$$R_6 = X_5 \times \operatorname{tg} \delta;$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции конденсатора (принимается равным 0,003);

- реактивное сопротивление реактора фильтра седьмой гармоники

$$X_7 = X_5 / 49;$$

- активное сопротивление реактора фильтра седьмой гармоники

$$R_8 = X_7 \times q;$$

где q – добротность силовых реакторов (принимается усреднено равной 0,075)

В случае включения в схеме двух преобразователей определяются параметры фильтров 11 и 13 гармоник:

- реактивное сопротивление конденсатора фильтра одиннадцатой гармоники

$$X_3 = Q_{11}(MBAp) / 10,5^2(KB);$$

где Q_{11} – номинальная мощность конденсаторов фильтра одиннадцатой гармоники, принимаемая равной половине реактивной мощности двухфазного преобразователя;

- активное сопротивление конденсатора фильтра одиннадцатой гармоники

$$R_3 = X_3 \times \operatorname{tg} \delta;$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции конденсатора (принимается равным 0,003);

- реактивное сопротивление реактора фильтра одиннадцатой гармоники

$$X_4 = X_3 / 121;$$

- активное сопротивление реактора фильтра одиннадцатой гармоники

$$R_4 = X_4 \times q;$$

где q – добротность силовых реакторов (принимается усреднено равной 0,075);

- реактивное сопротивление конденсатора фильтра тринадцатой гармоники

$$X_5 = Q_{13} (MBAp) / 10,5^2 (KB);$$

где Q_{13} – номинальная мощность конденсаторов фильтра тринадцатой гармоники, принимаемая равной половине реактивной мощности двухмостового преобразователя;

- активное сопротивление конденсатора фильтра тринадцатой гармоники

$$R_6 = X_5 \times tg\delta;$$

где $tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь изоляции конденсатора (принимается равным 0,003);

- реактивное сопротивление реактора фильтра тринадцатой гармоники

$$X_7 = X_5 / 169;$$

- активное сопротивление реактора фильтра тринадцатой гармоники

$$R_8 = X_7 \times q;$$

где q – добротность силовых реакторов (принимается усреднено равной 0,075).

- реактивное сопротивление преобразовательных трансформаторов одинаково и равно

$$X_{np1} = X_{np2} = \frac{U_K \%}{100} \times \frac{10,5^2 (KB)}{S_{HTnp} (MBA)}.$$

Процесс подготовки исходных данных состоит в определении значений параметров схемы и режима и в занесении их в файл исходных данных UNRijk, где i – номер варианта по табл.1; j – номер варианта по табл. 2; k – номер расчетной схемы. Данный файл находится в директории C:\UNRij .

В этой же директории находится программный модуль UNR.EXE

Поскольку файл UNRijk содержит значительное количество исходных данных, задаваемых заранее для управления вычислительным процессом, а также значительное количество таблиц данных не используемых в настоящем расчете, то здесь определяется порядок подготовки только тех данных, которые необходимо внести студентам. Остальные значения, занесенные заранее следует оставить без изменения.

Таблица 1: «Общие исходные данные». Заносятся: значение В – количество ветвей в схеме сети переменного тока; С – количество узлов в сети переменного тока; Р – количество преобразователей.

Таблица 2: «Сведения о конфигурации сети и параметрах ветвей». Заносятся: значение NH – номер узла начала ветви; NK – номер узла окончания ветви; PR1 – признак, задающий характер ветви. Если активно-индуктивный, то 0; если активно-емкостный, то 1; X – реактивное сопротивление ветви на частоте 50 Гц приведенное к ступени напряжения

10 кВ (Ом). Для активно-индуктивной ветви – положительная величина, для активно-емкостной ветви – отрицательная величина (Ом). R – Активное сопротивление ветви, приведенное к ступени напряжения 10 кВ (Ом).

Таблица 3: «Параметры эквивалентных ветвей» – пропускается.

Таблица 4: «Сведения о преобразователях». Заносятся: XT – индуктивное сопротивление на частоте 50 Гц преобразовательного трансформатора приведенное к ступени напряжения 10 кВ (Ом); XD – индуктивное сопротивление на частоте 50 Гц сглаживающего дросселя, приведенное к ступени напряжения 10 кВ (Ом); PR – признак, задающий группу соединения обмоток преобразовательного трансформатора. Если 1, то звезда-звезда; если 2, то звезда – треугольник. Y1 – номер узла сети переменного тока в котором подключен преобразователь.

Таблица 5: «Частотные характеристики сопротивлений цепей выпрямленного тока» – пропускается.

Таблица 6: «Модули гармонических составляющих эдс источников питания». Заносится амплитудное значение фазного напряжения на шинах питающей системы (узел 1), приведенное к ступени напряжения 10 кВ (В). Для напряжения 10,5 кВ соответственно равно 8572 В.

Таблица 7: «Фазы гармонических составляющих эдс источников питания». Заносится фаза напряжения основной гармоники на шинах питающей системы (принимается равной нулю).

Таблица 8: «Массив управления печатью» – пропускается.

5.2. Варианты исходных данных для расчета

Таблица 1

Параметры схемы

Вариант	$S_{K2, MBA}$	$S_{HT1, MBA}$	$U_{KT1, \%}$	$\Delta P_{KT1, кВт}$	$S_{HTnp, MBA}$	$U_{KTnp, \%}$
1	800	4	10	28,0	1,0	6
2	900	6,3	10,5	33,5	1,6	7
3	1000	10	11	60,0	2,5	8
4	750	4	11	65,0	1,0	8
5	850	6,3	10,5	35,0	1,6	7
6	950	10	10	25,0	2,5	6
7	700	4	10,5	30,0	1,0	7
8	800	6,3	11	37,0	1,6	8
9	900	10	10	55,0	2,5	6

Представленные в табл. 2 относительные значения постоянных составляющих выпрямленных токов и напряжений преобразователей должны быть умножены на базисные величины: $I_{\sigma} = \sqrt{2} \times 10,5(KB) / (2 \times (X_1 + X_2 + X_{Tnp})) \times 1000$; $U_{\sigma} = \sqrt{2} \times 10,5(KB) \times 1000$ и занесены в таблицу 9 файла исходных данных «Независимые параметры режима преобразователей» для каждого подключенного преобразователя.

Таблица 2

*Постоянные составляющие выпрямленных токов
и напряжений преобразователей*

Вариант	I_d (о.е.)	U_d (о.е.)
1	0,05	0,850
2	0,06	0,825
3	0,07	0,800
4	0,08	0,775
5	0,09	0,750
6	0,1	0,725
7	0,11	0,700
8	0,12	0,675
9	0,13	0,650
10	0,14	0,625
11	0,15	0,600

5.3. Расчет несинусоидального режима узла нагрузки

Расчет несинусоидального режима узла нагрузки производится запуском программного модуля UNR.EXE, после чего программа делает запрос «Введите имя входного файла». Необходимо указать имя файла, содержащего исходные данные (например UNR111) и нажать клавишу «Ввод». Далее программа делает запрос «Введите имя выходного файла». После набора имени выходного файла (например REZ111) и нажатия клавиши «Ввод» программа выполняет расчет.

Результаты расчета представляются в графической и в табличной форме. Ознакомление с результатами расчета в графической форме выполняется в диалоговом режиме путем ответов на запросы программы нажатием клавиш Y или N. Ознакомление с результатами расчета в табличной форме выполняется путем открытия выходного файла после ознакомления с результатами расчета в графической форме.

5.4. Анализ результатов расчета

Анализ результатов расчета сводится к рассмотрению, сопоставлению и осмыслению следующих результатов расчета, полученных в четырех вариантах постановки задачи расчета:

1. Значений коэффициентов несинусоидальности напряжения в узлах электрической сети № 1, 2, 3.
2. Значений отдельных гармонических составляющих спектров напряжений в узлах электрической сети № 1, 2, 3.
3. Значений потоков реактивных мощностей, потребляемых из системы (или генерируемых в систему).
4. Значений отдельных гармонических составляющих токов, потребляемых из системы.
5. Значений отдельных гармонических составляющих токов силовых резонансных фильтров.

Результаты расчета сводятся в следующие таблицы.

Таблица 3

№ схемы	Активная мощность, потребляемая из сети P_{12}	Реактивная мощность, потребляемая из сети Q_{12}	Коэффициент не-синусоидальности напряжения в узле 3	Действующее напряжение 5-й гармоники в узле 3	Действующее напряжение 7-й гармоники в узле 3	Действующее напряжение 11-й гармоники в узле 3	Действующее напряжение 13-й гармоники в узле 3
1							
2							
3							
4							

Таблица 4

№ схемы	Действующее значение тока фильтра				Ток 5-й гармоники		Ток 7-й гармоники		Ток 11-й гармоники		Ток 13-й гармоники	
	Ф5	Ф7	Ф11	Ф13	Ф5	Ф7	Ф5	Ф7	Ф11	Ф13	Ф11	Ф13
2			X	X					X	X	X	X
4	X	X			X	X	X	X				

Содержание отчета

Отчет должен содержать следующие обязательные составные части:

1. Титульный лист, оформленный в соответствии с установленными требованиями.
2. Цели выполнения работы.
3. Краткое изложение теоретических вопросов, касательно содержания работы.
4. Термины и определения.
5. Используемые технические средства.
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе ЛР).
7. Описание основной части (краткая характеристика алгоритма расчета, результаты расчета, представленные в форме таблиц).
8. Анализ полученных результатов.
9. Отчет составляется общим на бригаду студентов.
10. Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

Контрольные вопросы

1. Какие нагрузки вызывают искажения формы напряжений и токов в узлах нагрузки и в электрических сетях предприятий?
2. В чем состоит проблема электромагнитной совместимости технических средств на предприятиях, имеющих мощные статические преобразователи?
3. Какие возможны пути улучшения формы напряжений и токов в узлах нагрузки имеющих в своем составе статические преобразователи?

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ, СОЗДАВАЕМОГО УСТАНОВКАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	3
1. Общие сведения	3
2. Электрическое поле промышленной частоты. Общие сведения	3
3. Меры защиты персонала от воздействия электрического поля	6
4. Способы ограничения напряженности поля под воздушными линиями высших классов напряжения	7
5. Аппаратура для измерения	7
6. Схема для проведения измерений электрического поля	9
7. Порядок выполнения работы	9
8. Содержание отчета	10
9. Контрольные вопросы	11
10. Список литературы	11
Лабораторная работа № 2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ СОЗДАВАЕМОГО УСТАНОВКАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	12
1. Общие сведения	12
2. Меры защиты персонала и населения от воздействия магнитного поля ..	16
3. Аппаратура для измерения	17
4. Схема для проведения измерений магнитного поля	18
5. Порядок работы	19
6. Содержание отчета	20
7. Контрольные вопросы	20
8. Список литературы	20
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КАК ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ	21
1. Возникновения помех от короны	21
2. Нормативная база на радиопомехи	23
3. Аппаратура для измерений	25
4. Схема для проведения измерений электрического поля	26
5. Порядок работы	27
6. Содержание отчета	31
7. Контрольные вопросы	31
8. Список литературы	31
Лабораторная работа № 4. ИЗУЧЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ И УЗКОПОЛОСНЫХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ СОЗДАВАЕМЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	32
1. Общие сведения	32
2. Ряд и интеграл Фурье	33
3. Спектры некоторых периодических и непериодических функций	34

4. Аппаратура для получения процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи	37
5. Аппаратура для измерений	37
6. Порядок выполнения работы.	38
7. Содержание отчета	39
8. Контрольные вопросы.....	40
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ И УЗКОПОЛОСНЫХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ, СОЗДАВАЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ	41
Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ, СОДЕРЖАЩИХ МОЩНЫЕ СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	41
Введение	41
1. Статический преобразователь как источник гармоник и другие источники гармоник	43
2. Влияние гармоник на элементы системы электроснабжения	46
2.1. Силовые конденсаторы	46
2.2. Вращающиеся машины	49
2.3. Устройства релейной защиты в энергосистемах	50
2.4. Оборудование потребителей	52
2.5. Влияние гармоник на измерение мощности и энергии.....	52
2.6. Влияние гармоник на коэффициент мощности	54
3. Алгоритм расчета уровня несинусоидальности в узле нагрузки.....	54
4. Постановка задачи расчета	55
5. Подготовка исходных данных.....	55
5.1. Подготовительная работа.....	55
5.2. Варианты исходных данных для расчета	59
5.3. Расчет несинусоидального режима узла нагрузки	60
5.4. Анализ результатов расчета.....	60
Содержание отчета	61
Контрольные вопросы.....	61

Учебное издание

ХАРЛОВ Николай Николаевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике»
для бакалавров, обучающихся по направлениям 140200
«Электроэнергетика», 140600 «Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»

Научный редактор
доктор физико-математических наук *В.Н. Барашков*


Верстка *В.П. Аршинова*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*
О.А. Дмитриев

Подписано к печати 17.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,37.
Заказ 844. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.