

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Д.В. Тихонов, Е.В. Старцева

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие к выполнению лабораторных работ
для студентов энергетического института

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2014

УДК
ББК

Тихонов Д.В.

Электромагнитная совместимость: учебное пособие/ Д.В. Тихонов, Е.В. Старцева - Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014.– 84 с.

В учебном пособии приводится описание лабораторных работ, изучаемых в курсе «Электромагнитная совместимость». Рассмотрены причины появления электромагнитного поля и механизмы воздействия электрических и магнитных полей на организм человека, методики измерения напряженности электрического и магнитного полей. Кроме этого, рассмотрено явление коронного разряда и радиопомехи, создаваемые им. Рассмотрено также применение пассивных помехоподавляющих устройств – фильтров и электромагнитных экранов. Предназначено для бакалавров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2014
© Тихонов Д.В., Старцева Е.В., 2014
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2014

2014

Содержание	стр.
Лабораторная работа № 1.....	4
Лабораторная работа № 2.....	13
Лабораторная работа № 3.....	21
Лабораторная работа № 4.....	33
Лабораторная работа № 5.....	40
Краткое описание программы «ОРУ-М»	48
Заземляющие устройства подстанций	65
Лабораторная работа № 6.....	71
Лабораторная работа № 7.....	76
Приложение А.....	82

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.

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.

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 соприкосновении 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 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, мониторов, 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

$E_{пду}$, 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, Правилами устройства электроустановок (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.

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.

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, 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.

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 частотой 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 антенной-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:

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

Схема для проведения измерений электрического поля

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

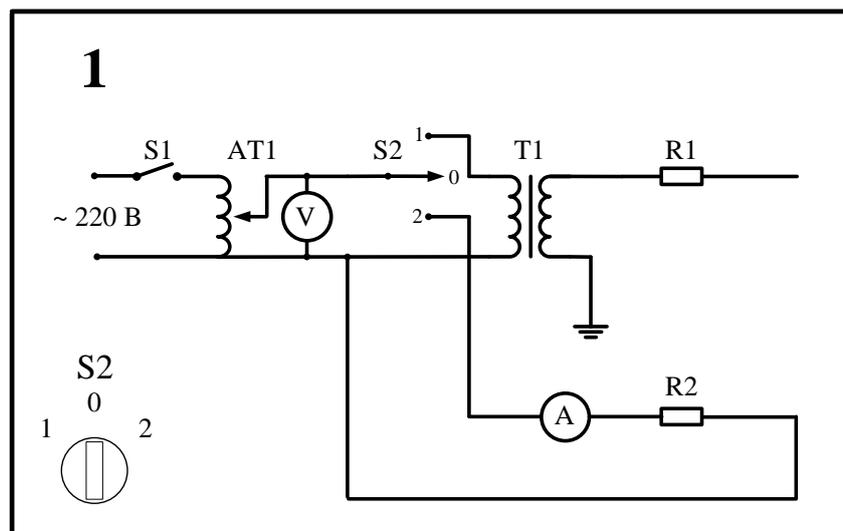


Рис. 2. Схема для создания электрического поля промышленной частоты

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 (так называемые 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 $U_1 = 10B$, что соответствует напряжению вторичной обмотки $U_2 = U_1 \times K_T = 10 \times 35000/100 = 3500B$
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 в соответствии со значениями, указанными в табл.3. Результаты измерений занести в табл. 3.
9. Построить зависимость модуля напряженности электрического поля в зависимости от величины напряжения на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора для всех точек пространства, в которых проводились измерения.
10. Сравнить измеренные уровни напряженности поля с фоновыми значениями.
11. Дать объяснения полученных результатов.
12. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 3 Результаты измерений

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					
40,0/14000					
50,0/17500					
60,0/21000					

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

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, касающихся 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.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

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?

Литература

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков [и др.]; 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.

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.

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 (H), или магнитной индукцией (B) (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:

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

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная,

H – 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 H (А/м)/ B (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 не-

специфический 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

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 стенами.

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 организация 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.

Аппаратура для измерения

Для измерения напряженности магнитного поля используется измеритель напряженности поля промышленной частоты типа ПЗ-50 (рис. 1.). 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. 1. Измеритель напряженности поля промышленной частоты с антенной-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. Положение переключателей

Предел измерения, А/м	Положение переключателя, $\times 0,1/\times 1/\times 10$	Положение переключателя, 2/20/200
2000	$\times 10$	200
200	$\times 1$	200
20	$\times 1$	20
2	$\times 1$	2
0,2	$\times 0,1$	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 необходимо определить модуль вектора напряженности электрического поля H по формуле:

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

Схема для проведения измерений магнитного поля

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

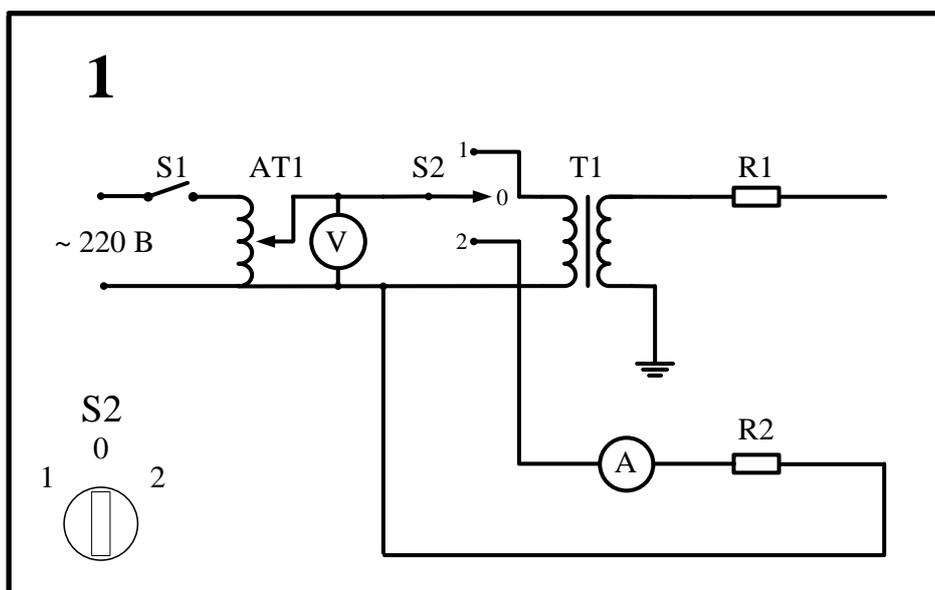


Рис. 2. Схема для создания электрического поля промышленной частоты

Порядок работы

1. Перед началом работы ознакомиться 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 (так называемые 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» замкнуть цепь, которая является источником магнитного поля (МП);
6. Установить с помощью автотрансформатора ток в проводнике $I_1 = 0,5\text{A}$.
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 0,5 А до значения 2,0 А. Результаты измерений занести в табл. 4.
9. Построить зависимость модуля напряженности магнитного 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. Результаты измерений

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
0,5					Установка включена
1,0					
1,5					
2,0					

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

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, касающихся 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.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

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. Как нормируется пребывание населения в магнитном поле промышленной частоты?

Литература

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков [и др.]; 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.

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 исправности 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 разряды 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} с 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 изолятора. 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

$$Y = 20 \lg (E / E_0).$$

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.

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;	80	52 (ANSI)	27,3	33,3
			ВЛ >550 кВ – 20 м			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)	7,3	26,3
					40 (ANSI) (N=10–50)	13,3	19,3
					43,5 (ANSI) (N<10)	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	В хорошую погоду	46	24,7	30,7
			45 м		46	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

№	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

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.

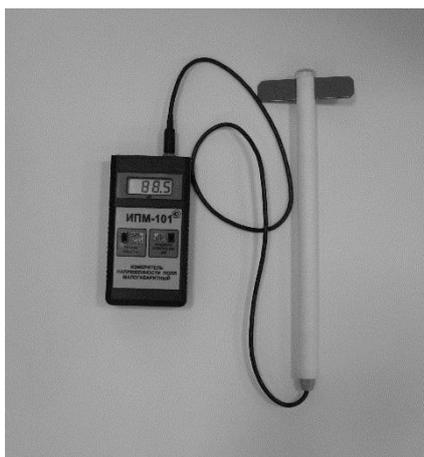


Рис. 1. Измеритель ИПМ-101

В составе с антенной-преобразователем АП Е01 измеритель обеспечивает измерение в свободном пространстве, при расстоянии от про-

водящих 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. Значения частотного коэффициента.

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 Π_{\min} до Π_{\max} , где Π_{\min} и Π_{\max} , мкВт/см², определяются по формулам:

$$\Pi_{\min} = 0,265(E_{\min})^2, \quad \Pi_{\max} = 0,265(E_{\max})^2,$$

где E_{\min} и E_{\max} измеряются в В/м.

Более подробно, технические характеристики и порядок подготовки к работе, и порядок работы измерителя напряженности поля малогабаритного ИПМ-101 приведены в инструкции на устройство.

Схема для проведения измерений электрического поля

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

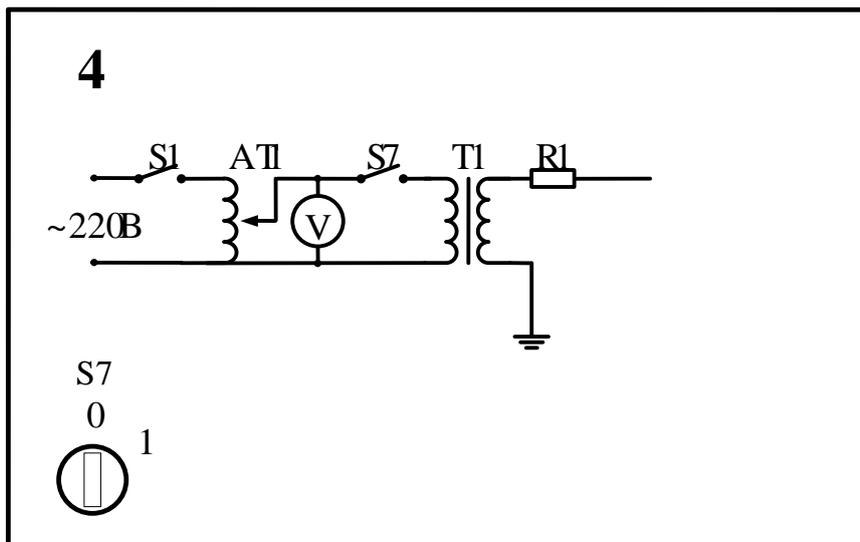


Рис. 2. Схема для создания электромагнитных помех короной переменного тока

Порядок работы

1. Перед началом работы необходимо ознакомиться 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 высоковольтный трансформатор.
6. Установить с помощью автотрансформатора напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора соответствующее устойчивому появлению короны между электродами.
7. С помощью радиоприемника по характерному шуму в динамиках 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). 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**.
12. 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. Оптимальным для проведения измерений является предел, на котором можно получить отсчет с максимальным количеством значащих цифр.
13. Измерение модуля проекции вектора напряженности электрического поля на измерительную ось АП:
 - 13.1. Возьмите в одну руку УО-101, а в другую – АП. Внесите АП на вытянутой руке над ограждением на высоте 15 см от него. При этом, на экране индикатора УО-101 появятся показания U_A , соот-

ветствующие проекции вектора напряженности поля на измерительную ось АП.

- 13.2. 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 проекций, соответствующих проекции вектора напряженности электрического поля (U_{Ax} , U_{Ay} и U_{Az} – показания индикатора УО-101 для электрического поля). Необходимо для каждой проекции провести два измерения, отличающиеся поворотом относительно оси ручки на 180° . Измерения занести в табл. 4.
- 13.3. Для каждого положения АП необходимо по формулам (1) и (2) вычислить измеренные значения напряженности поля E^0 и E^{180} , В/м:

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

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

где K_{Ai} – амплитудный коэффициент АП, В/м;

K_f – частотный коэффициент АП;

U_{Ai} – показания индикатора УО-101, мВ;

A, B, C – коэффициенты, задающие амплитудную характеристику АП.

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

- 13.4. Затем вычислить напряженность электрического (E) поля для каждой из проекций по формулам:

$$E_x = \sqrt{E_x^0 \cdot E_x^{180}};$$

$$E_y = \sqrt{E_y^0 \cdot E_y^{180}}; \quad (3)$$

$$E_z = \sqrt{E_z^0 \cdot E_z^{180}}.$$

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

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2} \quad (4)$$

- 13.6. Занести вычисленное значение напряженности электрического поля в табл. 4.
- 13.7. Определить фоновое значение плотности потока энергии (ППЭ) по формуле:

$$P = 0.265 \cdot E^2$$

где P – ППЭ электромагнитного поля, мкВт/см²;

E – напряженность электрического поля, В/м.

Результаты расчетов также занести в табл. 4.

14. Переведите последовательно ключи S_1 и S_7 в положение 1.
15. Установите напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора равное 15 В.
16. Выполните измерения и расчеты в соответствии с п. 12. Результаты измерений занести в табл. 4.
17. Повторите измерения и расчеты, изменяя напряжение на первичной обмотке высоковольтного трансформатора через 15 В до значения 60 В. Результаты занесите в табл. 4.
18. Переведите последовательно ключи S_7 и S_1 в положение 0.
19. Повторить измерения по п. 12–17 в точке на удалении 2-х метров от установки (расстояние измеряется от высоковольтного электрода установки).
20. Построить зависимости среднеквадратического значения модуля НЭП и ППЭ в зависимости от величины напряжения на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора для двух точек, в которых проводились измерения (точки 1 м и 2 м).
21. Объяснить полученные зависимости НЭП и ППЭ
22. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 4

**Результаты измерения напряженности поля, создаваемого
коронной переменного тока**

Величина первично-вторичного напряжения высоковольтного трансформатора, В	U_{Ax}		U_{Ay}		U_{Az}		E , кВ/м	ППЭ, мкВт/см ²	Примечание
	0°	180°	0°	180°	0°	180°			
Непосредственно у ограждения (1 метр)									
0,0/0,0									Установка отключена
15/5250									Установка включена
30/10500									
45/15750									
65/22750									
На расстоянии от установки (2 метра)									
0,0/0,0									Установка отключена
15/5250									Установка включена
30/10500									
45/15750									
65/22750									

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, касающихся содержания работы.
4. Термины и определения.
5. Используемые технические средства.
6. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе лабораторной работы).
7. Описание основной части (краткая характеристика лабораторной установки, ее схема, результаты измерений, представленные в форме таблиц и графиков).
8. Анализ полученных результатов.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Оформление отчета по лабораторной работе выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

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?

Литература

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков [и др.]; 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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Исследовать экранирующие свойства электромагнитных экранов из различных материалов. Ознакомиться с применением цифрового запоминающего двухканального осциллографа типа АСК – 3105.

Общие сведения

Экранирование служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы, блоки, приборы, кабели, помещения и здания, а также для того, чтобы подавить исходящие из электрических и электронных промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями. Экран устанавливается между источником и приемником помех и снижает напряженности E_0 , H_0 воздействующего поля до значений E_1 , H_1 за экраном (рис. 1). Физически экранирование объясняется наведением на поверхностях экрана зарядов (в случае электрической составляющей поля) и/или индуктированием в нем вихревых токов (в случае магнитной составляющей поля). Поля этих зарядов и/или вихревых токов накладываются на воздействующие поля, тем самым ослабляя их. Таким образом, как бы удаляется чувствительный приемник помехи от источника.

На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала экрана, конфигурация и размеры экрана.

Для уточнения этих общих положений будем исходить из того, что экранирование осуществляется частично поглощением энергии поля материалом экрана (коэффициент затухания a_{SA} обусловленный поглощением), а частично - отражением падающей волны (коэффициент затухания a_{SR} , обусловленный отражением).

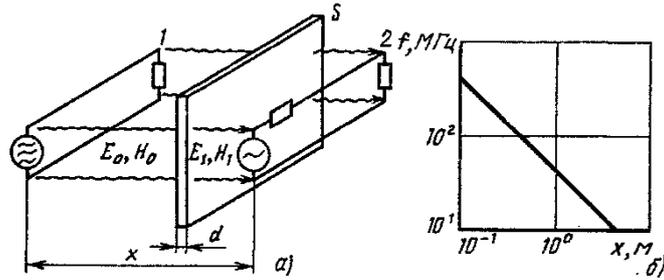


Рис. 1. Экранирование токовых контуров от внешних электрических и магнитных полей: а - принципиальное расположение контуров 1, 2 и экрана S; б - граница между условиями ближнего (нижняя левая часть) и дальнего (верхняя правая часть) полей

Результирующий коэффициент затухания, дБ, можно определить как

$$a_s = 20 \lg(E_0 / E_1) \quad (1)$$

Или же

$$a_s = 20 \lg(H_0 / H_1) \quad (2)$$

Т.е. a_s состоит из двух компонентов:

$$a_s = a_{SA} + a_{SR}. \quad (3)$$

При этом не учитываются многократные отражения от стенок экрана и помещения. Для установления существенных взаимосвязей между этими коэффициентами затухания и характеристиками магнитного поля, а также размерами экрана и свойствами его материала удобно воспользоваться понятием полных сопротивлений по аналогии с распространением волн в электрически длинной двухпроводной линии.

В зависимости от расстояния x приемника помехи от источника (рис. 1, а) и частоты f в ближней или дальней областях (рис. 1, б) для определения коэффициентов затухания a_{SA} и a_{SR} , дБ, пригодны следующие выражения:

для магнитного поля в ближней зоне ($x < c/2\pi f$) коэффициент отражения

$$a_{SR} = [15 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) + 20 \lg(x / x_0)] + 10 \lg(f / f_0); \quad (4)$$

для электрического поля в этой зоне ($x < c / 2 \pi f$)

$$a_{SR} = [202 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 30 \lg(f / f_0); \quad (5)$$

для электрического поля в дальней' зоне ($x > c / 2 \pi f$),

$$a_{SR} = [168 - 10 \lg(\mu_r / \sigma_r) - 20 \lg(x / x_0)] - 10 \lg(f / f_0), \quad (6)$$

а коэффициент поглощения, как для ближней, так и дальней зон

$$a_{SA} = \left[(0,1314d/d_0) \sqrt{\mu_r \sigma_r} \right] \sqrt{f/f_0}, \quad (7)$$

где μ_r , σ_r - относительная магнитная проницаемость материала, его электропроводность, отнесенная к электропроводности меди ($\sigma_{Cu} = 5,8 \cdot 10^7$ См/м); $f_0 = 1$ Гц - базовая частота; d - толщина экрана, отнесенная к $d_0 = 1$ мм; $x_0 = 1$ м.

Кроме того, выражения, заключенные в квадратные скобки формул (4)-(7), характеризуют влияние свойств материала экрана и его толщины на коэффициент затухания, и при $f = 1$ Гц ординаты функций (4)-(7) представляют собой значения a_{SR} и a_{SA} .

Зависимость результирующего коэффициента a_S от частоты при наличии магнитного поля для ближней зоны представлена на рис. 2. Эта зависимость получается суммированием a_{SR} и a_{SA} в соответствии с (3).

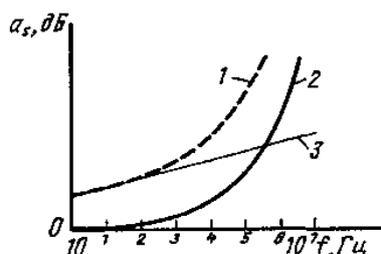


Рис. 2. Принципиальные зависимости коэффициентов:

$a_S = a_{SA} + a_{SR}$ (1), a_{SA} (2) и a_{SR} (3) от частоты f для магнитного поля в ближней зоне

Зависимости a_{SA} , a_{SR} и a_S от частоты для дальнейшей зоны в соответствии с (6) и (7) и для ближней зоны в соответствии с (6) и (7) представлены на рис. 3.

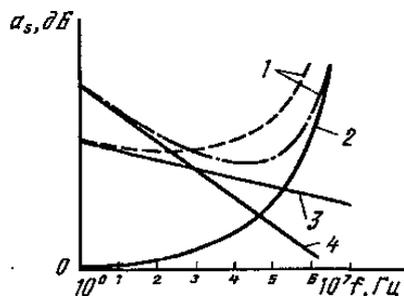


Рис. 3. Принципиальные зависимости коэффициентов затухания от частоты для электромагнитного поля в дальней зоне и для электрического в ближней зоне:

1- $a_S = a_{SA} + a_{SR}$; 2 - a_{SA} ; 3 - a_{SR} для электромагнитного поля в дальней зоне (6); 4 - a_{SR} для электрического поля в ближней зоне (5)

Следует подчеркнуть, что спад коэффициента a_{SR} , согласно (5), для ближней зоны происходит не на 10, как в остальных случаях, а на 30 дБ при увеличении частоты на порядок.

Эффективность экранирующих устройств ориентировочно может быть оценена следующим образом. Если a_S не выше 10 дБ, то экранирование, как правило, недостаточно. При $10 < a_S < 30$ дБ удовлетворяются минимальные требования по экранированию.

Для многих случаев достаточно, если $30 < a_S < 60$ дБ. Если $60 < a_S < 90$ дБ, то имеет место хорошее экранирование, а при $90 < a_S < 120$ дБ можно говорить о предельно хорошем экранировании.

Принципиально следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия дефектов и отверстий в стенке экрана (трещин, дверных, вентиляционных и оконных проемов, кабельных вводов и отверстий для элементов обслуживания и сигнализации), а также то, что внутри экранированных объемов могут возникать резонансные эффекты, так как любой корпус прибора с проводящими стенками можно рассматривать как объемный резонатор.

Аппаратура для получения процессов, имитирующих импульсные и периодические помехи.

Схема установки, обеспечивающая исследование экранирующих свойств электромагнитных экранов приведена на рис. 4. Данная схема обеспечивает создание электромагнитного излучения с помощью катушки индуктивности (поз. 3, рис. 4) и прием сигнала с помощью катушки индуктивности (поз. 4, рис. 4).

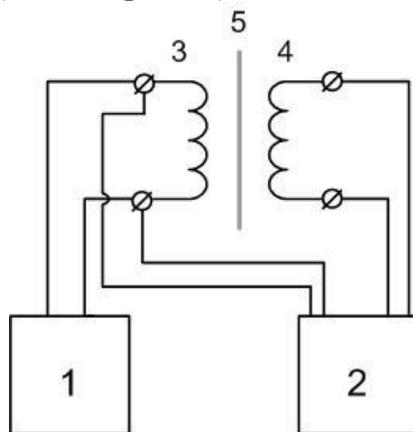


Рис. 4. Схема установки, обеспечивающая исследование экранирующих свойств электромагнитных экранов: 1- генератор сигналов; 2- осциллограф; 3 - катушка индуктивности - источник электромагнитного излучения; 4 - катушка индуктивности - приемник электромагнитного излучения; 5 – исследуемый электромагнитный экран.

В качестве основных приборов, предназначенных для проведения лабораторной работы является генератор синусоидальных сигналов и осциллограф цифровой, запоминающий двухканальный типа АСК – 3105. Для ознакомления с порядком работы осциллографа и генератора синусоидальных сигналов необходимо ознакомиться с руководством по эксплуатации. Общий вид лабораторного стенда для лабораторной работы приведен на рисунке 6.



Рис. 6. Общий вид лабораторной установки для исследования экранирующих свойств электромагнитных экранов.

Порядок выполнения работы.

1. Подключить кабель «СОМ» осциллографа к компьютеру;
2. Включить компьютер;
3. С помощью кабеля соединить выход генератора с катушкой индуктивности, которая служит источником сигнала.
4. Вход А осциллографа соединить кабелем с катушкой индуктивности, которая служит источником сигнала, а вход В осциллографа соединить кабелем с катушкой- приемником.
5. Включить осциллограф;
6. Включить генератор синусоидальных сигналов.
7. С помощью ярлыка на рабочем столе компьютера запустить программу для работы осциллографа;
8. В разделе меню «Панели» открыть панели Управления и Измерений.
9. На панели управления установить:

- канал А – разрешить отображение (установить «птичку» в окошке);
 - входной диапазон сигнала по каналу А - 2 В/дел.
 - тип входа канала А - DC;
 - канал В – разрешить отображение (установить «птичку» в окошке);
 - входной диапазон сигнала по каналу В - 500 мВ/дел.
 - в окне Запуск убрать птичку;
 - в окне «режим» – авто;
 - в окнах «источник» – А, восход;
 - в окне «развертка» - 50 мс/д.
10. С помощью переключателя выходного сигнала генератора установить величину выходного сигнала 2 В. Частоту выходного сигнала установить равной 10 Гц.
 11. Установить нулевое смещение через меню «Настройки-калибровка смещений»;
 12. Установить режим запуска – «однократный»;
 13. Нажать кнопку «Запуск» на панели управления осциллографа на экране компьютера, после чего на экране главной панели осциллографа появятся изображения сигнала: на канале А – исходный сигнал, на канале В – сигнал с катушки-приемника.
 14. Используя курсоры измерить амплитуды входного и выходного сигналов и результаты измерения внести в таблицу 1.
 15. Изменяя частоту входного сигнала, провести измерения амплитуд входного и выходного сигналов и результаты измерения внести в таблицу 1. Измерения провести на частотах 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, $1 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $2,99 \cdot 10^5$ Гц.
 16. Установите исследуемый экран между катушкой-источником и катушкой-приемником и проведите те же измерения, согласно пунктам 10, 12, 13, 14, 15.

Таблица 1. Результаты измерений.

Частота сигнала, Гц	Без экрана			С экраном		
	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	a_s , Дб	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	a_s , Дб
10						
20						
50						
...						
$2,99 \cdot 10^5$						

17. Рассчитать результирующий коэффициент затухания a_s , по формуле:

$$a_s = 20 \lg(U_{вх}/U_{вых}) \quad (8)$$

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. 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.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

Контрольные вопросы

1. Для чего применяется экранирование?
2. В чем заключается физическая основа экранирования?
3. От чего зависит эффективность экранирования?
4. Как количественно можно оценить эффективность экранирования?
5. Какие материалы используются для экранирования электромагнитных полей?

Литература

1. Шапиро Д.Н. - Основы теории электромагнитного экранирования. Л., «Энергия», 1975 г., 112 с.
2. Э. Хабигер Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем./ И.П. Кужекин; Под ред. Б.К. Максимова.-М.: Энергоатомиздат, 1995.-304 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВ

Цель работы: Исследовать помехоподавляющие свойства фильтров разной структуры в зависимости от частоты сигнала и сопротивления приемника. Закрепить навыки работы с цифровым запоминающим двухканальным осциллографом типа АСК – 3105.

Общие сведения

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесообразное их применение предполагает, что спектральные составляющие полезного сигнала и помехи достаточно отличаются друг от друга. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить селективное демпфирование помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала. При этом собственно эффект демпфирования достигается делением напряжения. Поясним это на простейшем примере.

Если в низкочастотный контур полезного сигнала (полезные величины \dot{U}_N, \dot{I}_N на рис. 1, а) поступает высокочастотное напряжение помехи \dot{U}_0 , то на полном сопротивлении приемника \dot{Z}_s появляется составляющая напряжения помехи

$$\dot{U}_{st} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_s} \quad (1)$$

Введение зависящего от частоты продольного полного сопротивления \dot{Z}_L (рис. 1, б), например, в форме ωL , представляющего для низкочастотного тока \dot{I}_{st} - очень малое, а для высокочастотного тока \dot{I}_{st} - очень большое сопротивление, обеспечивает ослабление помехи, и составляющая, напряжения помехи снижается до

$$\dot{U}'_{st} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_s}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_L + \dot{Z}_s} \quad (2)$$

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания - отношением падений напряжений на \dot{Z}_s при наличии \dot{Z}_L и без него:

$$\left| \frac{\dot{U}_{st}}{\dot{U}'_{st}} \right| = \left| \frac{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_L + \dot{Z}_s}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_s} \right|. \quad (3)$$

Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения напряжений и выражается в децибелах:

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_{st}}{\dot{U}'_{st}} \right|. \quad (4)$$

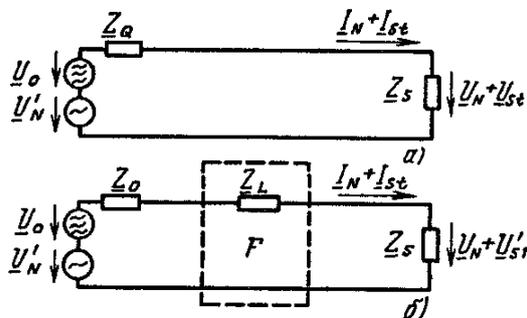


Рис. 1. Цепь без фильтра (а) и с фильтром (б)

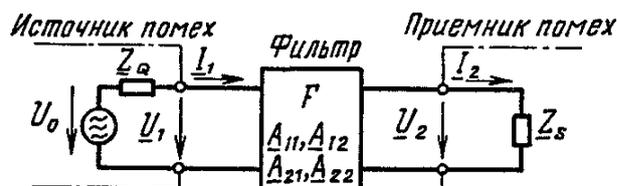


Рис. 2. Токовый контур с фильтром

В общем случае, фильтр F любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник (рис. 2). Для расчета фильтра пригодны известные соотношения:

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{11} \dot{U}_2 + \dot{A}_{12} \dot{I}_2; \quad (5)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{A}_{21} \dot{U}_2 + \dot{A}_{22} \dot{I}_2, \quad (6)$$

Где $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ - комплексные параметры четырехполюсника.

Их конкретные значения для простейших фильтровых структур представлены в табл. 1.

Далее (рис. 2) можно записать:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{Z}_Q \dot{I}_1; \quad (7)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{Z}_S \dot{I}_2. \quad (8)$$

Напряжение на входе приемника без фильтра определяется как

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_0 \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S}. \quad (9)$$

Аналогично (4) ослабление сигнала в фильтре описывает как логарифм отношения напряжений на входе приемника без фильтра \dot{U}_{20} и с фильтром \dot{U}_2 :

$$a_e = 20 \lg \left| \dot{U}_{20} / \dot{U}_2 \right|. \quad (10)$$

Коэффициент затухания в фильтре любой структуры в соответствии с (5)-(10) можно выразить как

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{11} + \frac{1}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{12} + \frac{\dot{Z}_Q \dot{Z}_S}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{21} + \frac{\dot{Z}_Q}{\dot{Z}_Q + \dot{Z}_S} \dot{A}_{22} \right| \quad (11)$$

Таблица 1. Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

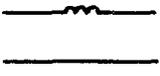
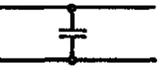
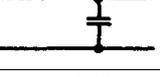
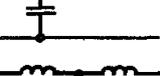
Схема	Коэффициент			
	\dot{A}_{11}	\dot{A}_{12}	\dot{A}_{21}	\dot{A}_{22}
	1	\dot{Z}_1	0	1
	1	0	$1/\dot{Z}_0$	1
	$1 + \dot{Z}_1/\dot{Z}_0$	\dot{Z}_1	$1/\dot{Z}_0$	1
	1	\dot{Z}_2	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2/\dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_1/\dot{Z}_0$	$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2)/\dot{Z}_0$	$1/\dot{Z}_0$	$1 + \dot{Z}_2/\dot{Z}_0$
	$1 + \dot{Z}_0/\dot{Z}_2$	\dot{Z}_0	$1/\dot{Z}_1 + 1/\dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$	$1 + \dot{Z}_0/\dot{Z}_1$

Отсюда следует, что коэффициент затухания зависит, с одной стороны от параметров фильтра $\dot{A}_{11}, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{21}, \dot{A}_{22}$ (см. табл. 1), а с другой - от полных сопротивлений участвующих в процессе источника и приемника помех.

Один и тот же фильтр при различных условиях, т.е. в зависимости значения и частотных характеристик полных сопротивлений \dot{Z}_0 и \dot{Z}_s , может вызывать сильно различающееся затухание. Поэтому, практически невозможно задать общую характеристику фильтра независимо от конкретных условий.

Если значения \dot{Z}_0 и \dot{Z}_s известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл. 2.

Таблица 2. Рекомендации по выбору структуры фильтра

№ схемы	Сопротивление источника	Схема фильтра	Сопротивление приемника
1	Мало		Мало
2	Велико		Велико
3	Мало		Велико
4	Велико		Мало
5	Мало, неизвестно		Мало, неизвестно
6	Велико, неизвестно		Велико, неизвестно

Аппаратура для исследования помехоподавляющих свойств фильтра

Схема установки, обеспечивающая исследование помехоподавляющих свойств фильтров показана на рисунке 3. В данной схеме исходный сигнал с генератора подается на вход исследуемого фильтра и на вход канала А осциллографа. Сигнал с выхода фильтра подается на вход канала Б осциллографа.

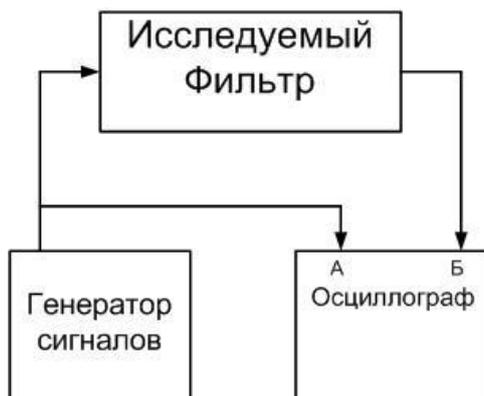


Рис. 3. Схема установки, обеспечивающая исследование помехоподавляющих свойств фильтров: А- вход канала А осциллографа; Б - вход канала Б осциллографа.

В качестве основных приборов, предназначенных для проведения лабораторной работы является генератор синусоидальных сигналов и осциллограф цифровой, запоминающий двухканальный типа АСК – 3105. Для ознакомления с порядком работы осциллографа и генератора синусоидальных сигналов необходимо ознакомиться с руководствами по эксплуатации. Общий вид лабораторного стенда для лабораторной работы приведен на рисунке 4.

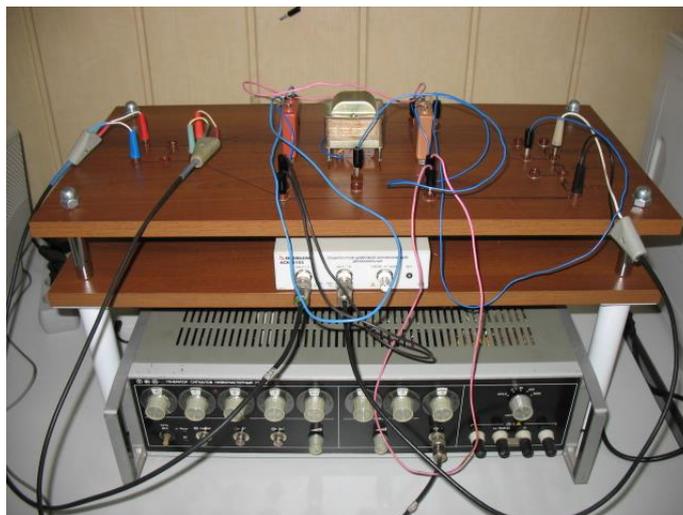


Рис. 4. Общий вид лабораторной установки для исследования помехоподавляющих свойств фильтров.

Порядок выполнения работы.

1. Подключить кабель «СОМ» осциллографа к компьютеру;
2. Включить компьютер;
3. С помощью соединительных проводов собрать одну из схем из таблицы 2.
4. С помощью кабеля соединить выход генератора с входом схемы фильтра.
5. Вход А осциллографа соединить кабелем с входом схемы фильтра.
6. Вход В осциллографа соединить кабелем с выходом схемы фильтра, при этом нагрузку фильтра (сопротивление приемника) выбрать равной 5,6 Ом или 16,4 Ом (в зависимости от конкретного экземпляра стенда).
7. Включить осциллограф;
8. Включить генератор синусоидальных сигналов.
9. С помощью ярлыка на рабочем столе компьютера запустить программу для работы осциллографа;

10. В разделе меню «Панели» открыть панели Управления и Измерения.
11. На панели управления установить:
 - канал А – разрешить отображение (установить «птичку» в окошке);
 - входной диапазон сигнала по каналу А - 2 В/дел.
 - установить нулевое смещение через меню «Настройки-калибровка смещений»;
 - тип входа канала А - DC;
 - канал В – разрешить отображение (установить «птичку» в окошке);
 - входной диапазон сигнала по каналу В - 500мВ/дел.
 - в окне Запуск убрать птичку;
 - в окне «режим» – авто;
 - в окнах «источник» – А, восход;
 - в окне «развертка» - 50 мс/д.
12. С помощью переключателя выходного сигнала генератора установить величину выходного сигнала 2 В. Частоту выходного сигнала установить равной 10 Гц.
13. Установить нулевое смещение через меню «Настройки-калибровка смещений»;
14. Установить режим запуска – «однократный»;
15. Нажать кнопку «Запуск» на панели управления осциллографа на экране компьютера, после чего на экране главной панели осциллографа появятся изображения сигнала: на канале А – исходный сигнал, на канале В – сигнал с выхода схемы фильтра.
16. Используя курсоры измерить амплитуды входного и выходного сигналов и результаты измерения внести в таблицу 3.
17. Изменяя частоту входного сигнала провести измерения амплитуд входного и выходного сигналов и результаты измерения внести в таблицу 3. Измерения провести на частотах 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, $1 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$, $2,99 \cdot 10^5$ Гц.
18. Увеличьте сопротивление нагрузки фильтра (сопротивление приемника) до $\sim 15,2$ кОм (или $\sim 6,2$ кОм в зависимости от конкретного экземпляра стенда) и проведите те же измерения, согласно пунктам 12, 14-17. Результаты измерения внесите в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты измерений

Частота сигнала, Гц	Сопротивление приемника 5,5 Ом или 16,4 Ом			Сопротивление приемника $\sim 6,2$ кОм или $\sim 15,2$ кОм		
	$U_{вх}, В$	$U_{вых}, В$	$a_{\phi}, Дб$	$U_{вх}, В$	$U_{вых}, В$	$a_s, Дб$

10						
20						
50						
...						
$2,99 \cdot 10^5$						

19. Рассчитать результирующий коэффициент затухания фильтра a_{ϕ} , по формуле:

$$a_{\phi} = 20 \lg(U_{вх}/U_{вых}) \quad (12)$$

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.

Отчет составляется общим на бригаду студентов.

Оформление текста отчета о ЛР выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия фильтра.
2. Что такое «коэффициент затухания» фильтра?
3. Приведите примеры схем простейших фильтров.
4. Приведите примеры возможных схем сетевых фильтров при разных соотношениях величины сопротивлений источника и приемника электромагнитных помех.

5. Для чего служат сетевые фильтры?

Литература

1. Харлов Н.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие. Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск : Изд-во ТПУ, 2008. — 200 с.

Краткие пояснения для выполнения лабораторных работ № 6 и № 7

Описание программы «ОРУ-М»

1. Программа «ОРУ-М» предназначена для моделирования сложных заземляющих устройств, включающих:

- систему шин в воздухе и в грунте;
- порталы, трубы, фундаменты зданий и электрических аппаратов (для ОРУ);
- металлические сооружения (мачты, баки, эстакады и т.п.)
- кабельные линии

2. Анализ может быть проведен как для гармонического (короткое замыкание), так и импульсного воздействия (удар молнии).

3. Результатами расчета являются:

- токи и напряжения во всех токоведущих элементах;
- статическое и динамическое сопротивление заземляющего устройства относительно любой узловой точки;
- распределение потенциала на поверхности земли и в грунте;
- распределение шагового напряжения и напряжения прикосновения по территории заземляющего устройства.

4. Расчетные элементы

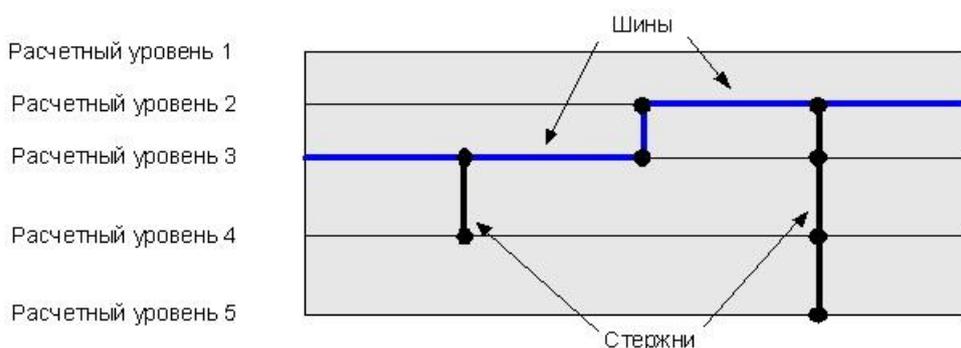
Пространство в воздухе и грунте условно разбивается на горизонтальные слои. В каждом из слоев может быть собрана разветвленная система горизонтальных шин. Системы шин различных слоев могут соединяться вертикальными шинами. Модель может включать так же порталы, трубы, кабели, фундаменты зданий и электрических аппаратов. Кроме того, к шинам могут быть присоединены объемные проводящие тела – плоскости, параллелепипеды, цилиндры. Набор этих элементов позволяет моделировать достаточно сложные заземляющие устройства.

5. Создание нового проекта

Запустите приложение и выберите опцию «Новый проект». В открывшемся окне следует установить общие параметры проекта: число расчетных уровней в воздухе и грунте, толщину каждого из слоев между уровнями, удельные сопротивления грунта для двухслойной модели. Можно добавить высокоомное покрытие (гравий, асфальт), наличие ко-

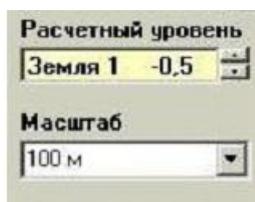
того влияет только на величину шаговых напряжений и напряжений прикосновения. В дальнейшем эти параметры могут быть изменены, в том числе, могут быть добавлены новые слои или изменены их толщины выбором пункта меню «Параметры» / «Параметры проекта» или кнопки .

Число расчетных уровней определяется расположением элементов в грунте. Например, для моделирования схемы приведенной на рисунке понадобилось 5 расчетных уровней и 4 слоя между ними.



Расчетные уровни в воздухе используются главным образом для моделирования металлоконструкций, в которые ударяет молния. Это может быть молниезащитный портал, производственное здание (ТЭЦ, АЭС и др.). Программа позволяет рассчитать возникающие при этом напряжения шага и прикосновения еще на стадии проектирования.

Перемещение от слоя к слою осуществляется переключателем расположенным на правой панели. Там же расположен переключатель масштаба рабочего поля.



Для удобства работы рабочее поле покрыто сеткой, которая имеет разные цвета в воздухе (голубой), на поверхности (зеленый) и в грунте (коричневый). Если это не так, переключите цветовое разрешение дисплея на более высокое. Сетка может быть отключена («Вид» / «Сетка»).

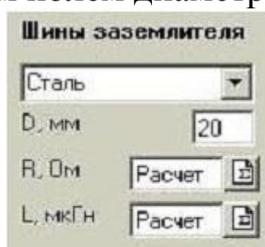
6. Загрузка и сохранение существующего проекта

Собранную схему можно сохранить в файле с расширением "ctk" и вновь загрузить из него. Для сохранения проекта использовать пункты меню «Проект / Сохранить проект», «Проект/ Сохранить проект как» или кнопку 

Для загрузки существующего проекта использовать пункт меню «Проект/Открыть проект» или кнопку . После загрузки проекта автоматически установится масштаб рабочего поля 500 м и расчетный слой, расположенный в грунте и ближайший к поверхности.

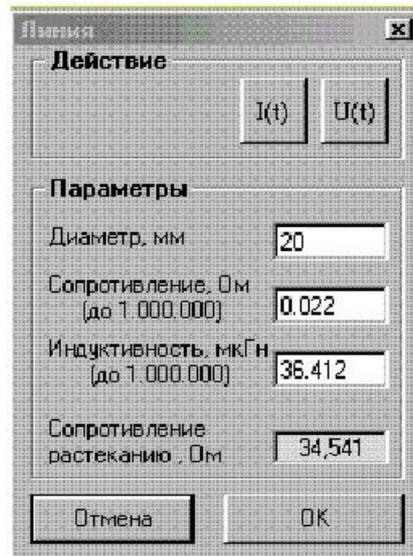
7. Ввод горизонтальных шин

Откройте окно установки атрибутов рисования («Параметры»/ «Атрибуты рисования» или кнопка  и установите удобные цвет, толщину и стиль рисования. Установите в текстовых окнах «Параметры шин и кабелей» над рабочим полем диаметр и материал шин.



Их электрические параметры (сопротивление и индуктивность) будут вычисляться автоматически с учетом параметров источника и автоматически пересчитываются при смене источника. При необходимости в соответствующих окнах на правой панели можно установить другие значения этих параметров. Для ввода шин следует выбрать пункт меню «Элементы схемы / «Шины», или кнопку .

Всем вводимым шинам будут присваиваться эти значения до тех пор, пока Вы их не измените. После чего вновь вводимые элементы будут иметь новые параметры, а для ранее введенных сохранятся прежние значения параметров. Горизонтальные шины «рисуются» мышью. В этикетке шины будет указана ее длина в метрах. При нажатой клавише Shift шины рисуются только в направлении координатных осей. Узлы, в которых шины соединяются друг с другом, окрасятся в зеленый цвет. Щелчок левой кнопкой по этикетке размера шины, выводит окно параметров шины.



Сопротивление и индуктивность шины вычисляются автоматически в соответствии с характерной частотой источника тока (напряжения). Учитываются скин-эффект и ферромагнетизм. Если источников несколько, параметры шин рассчитываются для максимальной характерной частоты. Эти параметры можно изменить по усмотрению пользователя. Тогда такие участки цепи могут моделировать сосредоточенные сопротивления и индуктивности.

Сопротивление растеканию шины выводится после проведения расчета переходного процесса. Кнопки $I(t)$, $U(t)$ выводят графики тока в шине и напряжения между ее концами (только после проведения расчета). Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет шину

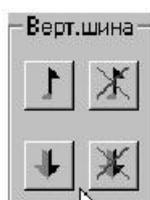
8. Примечания:

- *Часть функций экрана работает только в режиме ввода шин. Поэтому, введя другие элементы, переключитесь обратно в этот режим.*
- *Принято, что шины на поверхности грунта и в воздухе изолированы от грунта, а шины в грунте контактируют с ним по всей длине.*
- *Для правильного моделирования длинные шины следует составлять из нескольких отрезков. В гармоническом режиме (50 Гц) длины отрезков не должны превышать 50 м, а в импульсном – 20 м.*

9. Ввод вертикальных шин

Вертикальные шины устанавливаются в уже существующих узлах схемы. Для ввода вертикальных шин следует выбрать пункт меню «Элементы схемы / Шины», или  кнопку.

В окнах над рабочим полем установить эквивалентный диаметр вводимых шин и материал. Всем вводимым шинам будут присваиваться эти значения до тех пор, пока Вы их не измените. После чего вновь вводимые элементы будут иметь новые параметры, а для ранее введенных сохранятся прежние значения параметров. Вертикальные шины вводятся (удаляются) соответствующими кнопками в диалоговом окне узла схемы.



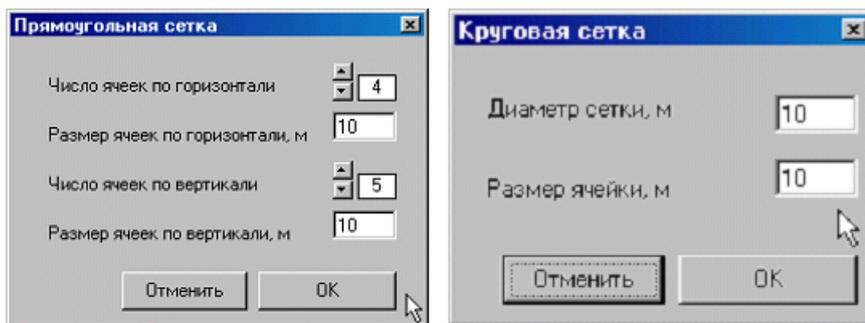
Окно открывается щелчком правой кнопкой по соответствующему узлу. Длина шины равна расстоянию от текущего расчетного уровня до следующего (вверх или вниз). Узлы, в которых установлены вертикальные шины, помечаются красным контуром. На верхнем узле вертикальной шины автоматически устанавливается ее этикетка. Щелчок левой кнопкой по этикетке выводит диалоговое окно аналогичное окну для горизонтальных шин. Электрические параметры вертикальных шин, как и горизонтальных, вычисляются автоматически, но их может задать и пользователь. Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет вертикальную шину.

***Примечание.** Принято, что шины на поверхности грунта и в воздухе изолированы от грунта, а шины в грунте контактируют с ним по всей длине.*

10. Ввод регулярной сетки шин

Для ввода регулярной сетки шин следует выбрать пункт меню «Элементы схемы / Прямоугольная сетка», «Элементы схемы / Круговая сетка» или кнопки  .

В открывшемся диалоговом окне установить требуемые размеры ячеек сетки и их количество. Сетка устанавливается в нужном месте рабочего поля перемещением мышью контура сетки и щелчком левой кнопки.



Щелчок правой кнопкой отменяет установку. Используйте регулярные сетки для моделирования фундаментов зданий. Для этого следует сетку с размерами, равными размерам фундамента в плане, с размерами ячейки от 5 (при размерах фундамента менее 50 м) до 10 м расположить на глубине вдвое меньше глубины закладки фундамента.

11. Операции с выделенными узлами

Режим выделения включается пунктом меню «Редактировать / Выделить». После выделения курсором группы элементов открывается диалоговое окно.

Возможны следующие операции с выделенными узлами:

- Удаление выделенных узлов с присоединенными к ним элементами;
- Присоединение к выделенным узлам вертикальных шин вверх или вниз;
- Удаление присоединенных к выделенным узлам вертикальных шин вверх или вниз.

После завершения выбранных операций режим выделения следует отключить.

12. Ввод порталов

Для ввода порталов следует переключиться на слой соответствующий поверхности земли и выбрать пункт меню «Элементы схемы / Портал» или кнопку  .

Порталы «рисуются» так же, как и шины. Однако, порталы могут располагаться на рабочем поле только вдоль координатных осей. В открывшемся диалоговом окне установить высоту портала. При вводе портала к его основаниям автоматически присоединяются узлы для подключения шин и модели фундаментов.



На этикетке портала указывается его длина в метрах. Щелчок левой кнопкой по этикетке выводит о диалоговое окно свойств элемента. Сопротивление растеканию фундаментов портала выводится после расчета переходного процесса. Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет элемент.

Внимание. Часть функций экрана работает только в режиме ввода шин. Поэтому, введя другие элементы, переключитесь обратно в этот режим.

13. Ввод трубчатых проводников

Для ввода трубчатых проводников следует выбрать пункт меню «Элементы схемы / Трубчатый проводник» или кнопку  .

Трубчатые проводники «рисуются» так же, как и шины. На их концах автоматически устанавливаются узлы для присоединения других элементов. В открывшемся диалоговом окне выбрать тип вид трубчатого проводника. Геометрические параметры и материал типовых проводников (кабельная броня, кабельный экран, пожарная труба) устанавливаются автоматически. В других случаях их следует установить пользователю.



На этикетке проводника указывается его длина в метрах. Щелчок левой кнопкой по этикетке выводит диалоговое окно свойств элемента. Сопротивление растеканию элемента выводится после расчета переходного процесса. Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет элемент.

Примечания

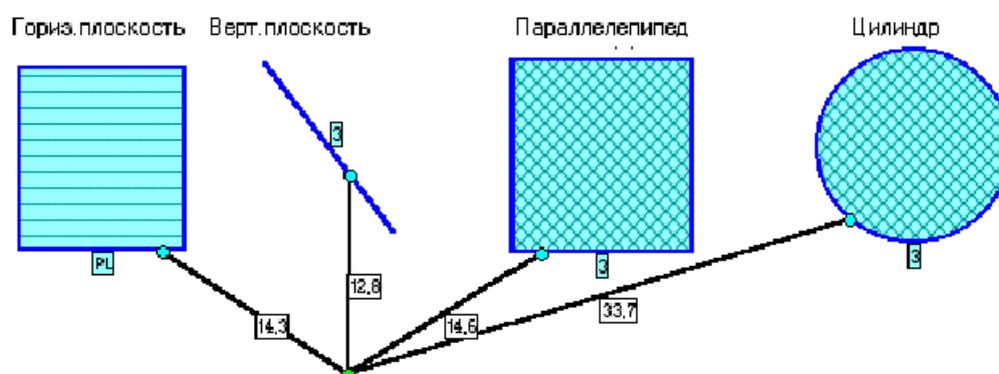
- Если при вводе трубчатого проводника выбрана опция «Кабельный экран», то проводник всегда считается изолированным от грунта. В других случаях принято, что трубы на поверхности грунта и в воздухе изолированы от грунта, а трубы в грунте контактируют с ним по всей длине.
- Часть функций экрана работает только в режиме ввода шин. Поэтому, введя другие элементы, переключитесь обратно в этот режим.

14. Ввод плоских и объемных проводящих тел

Для ввода плоских и объемных элементов выбрать пункты меню «Элементы схемы / Плоскость вертикальная», «Элементы схемы / Параллелепипед», «Элементы схемы / Цилиндр» или кнопки



По окончании рисования объемного элемента откроется окно его свойств, в котором следует установить его вертикальный размер. Он будет указан в этикетке объемного элемента. Если вертикальный размер равен нулю, то объемный элемент вырождается в горизонтальную плоскость.



Щелчок правой кнопкой по этикетке выводит диалоговое окно параметров элемента. Сопротивление растеканию элемента выводится после расчета переходного процесса. Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет элемент.

Для присоединения шин к этим элементам узел шины следует подвести к границе элемента. При правильном присоединении узел должен окраситься в голубой цвет.

Модели плоских и объемных тел могут использоваться только в однородном грунте при равенстве удельных сопротивлений верхнего и нижнего слоев.

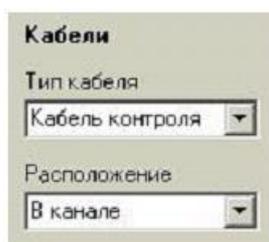
Внимание! Часть функций экрана работает только в режиме ввода шин. Поэтому, вводя другие элементы, переключитесь обратно в этот режим.

15. Ввод кабельных линий

Модель кабельной линии позволяет вычислить высокий потенциал, который может выноситься с объекта по кабелю при возникновении КЗ или ударах молнии. Возможны два механизма выноса потенциала:

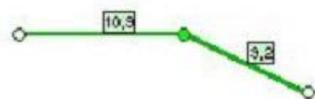
- Вынос потенциала по нулевому проводу или кабельному экрану, гальванически присоединенному к шинам ЗУ. Потенциал выносится на большие расстояния практически без затухания и определяется потенциалом ЗУ в точке присоединения кабеля.
- Вынос потенциала через емкостную связь проводов кабеля с находящимся под высоким потенциалом грунтом. Этот механизм более сложный. Для определения выносимого потенциала требуется проведение вычислений как указано ниже.

Установите на правой панели параметры кабеля.



Их электрические параметры (сопротивление и индуктивность) будут вычисляться автоматически с учетом типа кабеля и его расположения. Для ввода шин следует выбрать пункт меню «**Элементы схемы / Кабели**», или кнопку

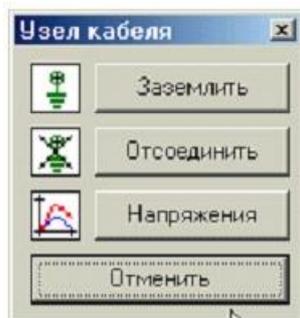
Всем вводимым элементам кабелей будут присваиваться установленные на правой панели параметры до тех пор, пока Вы их не измените. После чего вновь вводимые элементы будут иметь новые параметры, а для ранее введенных сохранятся прежние значения параметров. Кабели «ри-



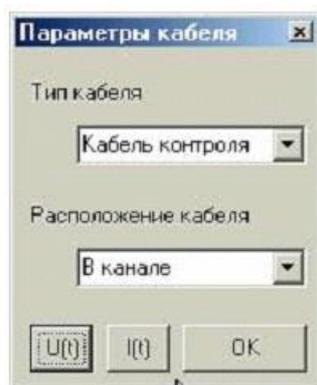
суются» мышью. В этикетке кабеля будет указана ее длина в метрах.

В отличие от шин ЗУ кабели видны на экране независимо от выбранного расчетного уровня. При нажатой клавише Shift кабели рисуются только в направлении координатных осей. Узлы, в которых кабе-

ли соединяются друг с другом, окрасятся в голубой цвет. Для соединения узла кабеля с грунтом следует щелкнуть по узлу правой кнопкой.



Выбрать опцию «Заземлить». Заземленный узел окрасится в черный цвет. Щелчок по этикетке левой кнопкой выводит окно параметров кабеля.



Кнопки $I(t)$, $U(t)$ выводят графики тока в элементе кабеля и напряжения между его концами (только после проведения расчета). Щелчок правой кнопкой по этикетке удаляет шину. Для удаления всех кабелей следует выбрать пункт меню «Редактировать»/ «Удалить кабели».

Примечания

- Часть функций экрана работает только в режиме **ввода шин**. Поэтому, введя другие элементы, переключитесь обратно в этот режим.
- Принято, что кабели всегда изолированы от грунта.
- Для правильного моделирования длинные элементы кабелей следует составлять из нескольких отрезков. В гармоническом режиме (50 Гц) длины отрезков не должны превышать 50 м, а в импульсном – 20 м.

16. Установка в узлах электрических аппаратов

При установке в узлах схемы электрических аппаратов к узлам автоматически подключаются фундаменты этих аппаратов. В программе заложены параметры фундаментов следующих электрических аппаратов:

- силовой трансформатор;
- воздушный выключатель;
- масляный выключатель;
- маломасляный выключатель;
- разъединитель;
- трансформатор напряжения;
- трансформатор тока;
- одиночный молниеотвод.

Для установки электрического аппарата щелчком правой кнопкой по узлу открыть диалоговое окно узла, с помощью переключателя выбрать картинку соответствующего аппарата и, при необходимости, отредактировать текстовую строку, идентифицирующую аппарат.



Аппарат удаляется щелчком правой кнопки.

17. Подключение источников тока и напряжения

Программа содержит модели источников тока/напряжения двух типов. Это источник, включаемый между узлом и удаленной землей (моделирует молнию, КЗ) и источник, включаемый между двумя узлами. Для подключения к узлу источника между узлом и удаленной землей следует щелкнуть по узлу правой кнопкой. В открывшемся диалоговом окне

нажать кнопку источника  и нажать «ОК». В открывшемся диалоговом окне источника установить вид источника (тока или напряжения) и форму тока (50 Гц, 400 Гц, однополярный или колебательный импульс).

Модели источников следует использовать в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. Источники тока и напряжения для моделирования воздействий на ЗУ.

Форма импульса	Источник тока	Источник напряжения
Синусоидальный 50 Гц	КЗ в силовых цепях	Генератор 50 Гц имитирующий ток КЗ
Синусоидальный 400 Гц	Реальный объект отсутствует	Генератор 400 Гц имитирующий ток КЗ
Импульсный аperiodический	Удар молнии	Генератор импульсный имитирующий ток молнии
Импульсный колебательный	Высокочастотные составляющие тока КЗ	Генератор импульсный имитирующий высокочастотные составляющие тока КЗ

Источник тока КЗ устанавливается в том узле ЗУ, к которому присоединен корпус аппарата, на котором произошло КЗ. Амплитуда тока КЗ должна быть задана заказчиком.

Источник тока молнии устанавливается либо в том узле ЗУ, к которому присоединен молниеотвод, либо в узле воздушной конструкции, моделирующей молниеприемник (молниеотвод, портал, металлоконструкция здания). Параметры тока молнии задаются в соответствии со стандартами по согласованию с заказчиком. Ниже приведены стандартные параметры тока молнии установленные МЭК (Табл. 2–3).

Таблица 2. Параметры первого импульса тока молнии

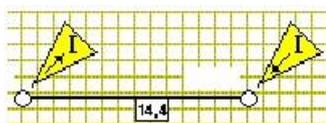
Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I, кА	200	150	100
Длительность фронта T1, мкс	10	10	10
Время полуспада T2, мкс	350	350	350

Заряд в импульсе $Q_{\text{сум}}^*$, Кл	100	75	50
Удельная энергия в импульсе W/R^{**} , МДж/Ом	10	5.6	2.5

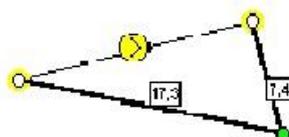
Таблица 3. Параметры последующего импульса тока молнии

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I, кА	50	37,5	25
Длительность фронта T1, мкс	0,25	0,25	0,25
Время полуспада T2, мкс	100	100	100
Средняя крутизна, кА/мкс	200	150	100

Принято, что при положительном значении амплитуды ток втекает в узел, а при отрицательном – вытекает из него.



Для установки источника между узлами следует выбрать пункт меню «Элементы / Источник между узлами» и соединить мышью соответствующие узлы. Параметры источника устанавливаются аналогично.



Параметры установленных источников можно просмотреть в окне подсказки, появляющемся при установке курсора мыши над этикеткой источника. Для изменения параметров источника следует дважды щелкнуть по его этикетке левой кнопкой. Для удаления источника щелкните по нему правой кнопкой.

Внимание! Физическая модель, реализованная в программе, имеет ограничение по применимости. При моделировании импульсных воздей-

ствий время нарастания тока источника должно быть не менее $(100/r)$ мкс, где r - удельное сопротивление грунта (Ом·м). В противном случае погрешность расчета превысит 10%.

18. Просмотр собранной схемы

Пункт меню «Вид» / «3D» позволяет просмотреть собранную схему в 3-мерном виде. Шины и другие элементы изображаются при этом наборами точек, изображающих разбиение элементов схемы на расчетные элементы.

19. Установка параметров счета

В большинстве случаев вполне приемлемы те параметры счета, которые программа назначает автоматически. Однако, эти установки могут быть изменены с помощью пункта меню «Параметры» / «Параметры счета» или кнопки 

Увеличение количества расчетных элементов, на которые разбиваются шины, плоские и объемные тела позволяет сгладить скачки потенциалов из-за численных погрешностей.

Расчетные элементы линий	Расчетные элементы Ψ -тел
Шаг разбиения по длине, м: <input type="text" value="5"/>	Шаг сетки, м: <input type="text" value="5"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Лимит элементов в линии: <input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Лимит элементов в плоскости: <input type="text" value="50"/>

Есть возможность увеличить число расчетных шагов по времени до 1000. Такая необходимость возникает при расчете импульсных процессов в протяженных схемах, когда числа шагов по умолчанию (200) бывает недостаточно, чтобы вычислить амплитудные значения в удаленных от источника точках схемы. В обоих случаях время счета увеличивается.

Опция «Ускорение счета в режиме 50, 400 Гц» позволяет заметно сократить время расчёта одиночного КЗ и существенно – нескольких КЗ. При этом, однако, возможна дополнительная погрешность вычислений – около 5%.

Шаги по времени	Расчетная сетка в грунте
Шаг по времени: <input type="text" value="50"/> фронта	<input checked="" type="radio"/> Задано число точек по горизонтали: <input type="text" value="60"/>
Число шагов по времени: <input type="text" value="200"/>	<input type="radio"/> Заданы шаги между точками, м: <input type="text" value="2"/>
<input type="checkbox"/> Ускорение счета в режимах 50, 400 Гц	

Раздел **«Расчетная сетка в грунте»** позволяет увеличить (уменьшить) разрешение диаграмм распределения потенциалов, шаговых напряжений и напряжений прикосновения на поверхности грунта.

Опция **«Учесть объекты, гальванически не связанные с источниками»** позволяет вычислить потенциалы объектов, расположенных в грунте и не присоединенных к общей схеме.

Опция **«Учесть коэффициент импульса»** позволяет учесть уменьшение сопротивления растеканию заземлителя при протекании больших импульсных токов (за счет искрообразования в грунте).

Включение опции **«Учесть зависимость магнитной проницаемости стали от тока»** приводит к некоторому увеличению времени счета. При этом основные результаты расчета изменяются незначительно (на 1-2%).

20. Расчет параметров ЗУ

Пункт меню **«Счет / Расчет ЗУ»** и кнопка  позволяют рассчитать потенциалы в узлах и токи в ветвях схемы. Результаты расчета можно просмотреть следующим образом.

- На верхней панели окна, расположенной над главным меню, выводится сопротивление заземляющего устройства.
- Щелчок правой кнопкой по узлу схемы открывает диалоговое окно узла, в котором кнопка $U(t)$ выводит график изменения во времени потенциала в узле.
- Щелчок левой кнопкой по этикетке шины открывает диалоговое окно шины, в котором кнопки $I(t)$, $U(t)$ выводят графики изменения во времени тока в шине и разности потенциалов между ее концами.
- Пункт меню **«Результаты / Карта токов и потенциалов в схеме»** и кнопка  выводят карту распределения максимальных токов и потенциалов в элементах схемы.
- График разности потенциалов между двумя произвольными узлами схемы можно просмотреть используя элемент **«Вольтметр»**. Для этого по окончании счета следует выбрать этот элемент в пункте меню **«Элементы схемы»** (или кнопка ). Соедините мышью два узла схемы так же как шиной и щелкните по вольтметру» левой кнопкой.

- Пункт меню «**Диаграмма потенциалов на поверхности**» и кнопка  выводят 2-х и 3-хмерные диаграммы распределения по поверхности земли потенциалов и шаговых напряжений.
- Кнопка  в правом нижнем углу рабочего поля активизирует «движки» на краях рабочего поля и пункт меню «**Результаты / Диаграммы потенциалов в грунте**». Эти элементы позволяют вывести распределение потенциалов в вертикальных сечениях грунта
- Пункт меню «**Результаты / Карта напряжений прикосновения**» и кнопка  выводят карту распределения напряжений прикосновения в узлах схемы.
- Пункт меню «**Результаты / Диаграмма напряжений прикосновения**» и кнопка  выводят 2-х и 3-хмерные диаграммы распределения по поверхности земли напряжений прикосновения.

Примечания.

- *Статическое сопротивление – это сопротивление ЗУ при условии, что все его элементы находятся под одним потенциалом (на практике это не возможно, т.к. существует падение потенциалов в шинах из-за протекания в них токов). Динамическое сопротивление – это реальное сопротивление ЗУ относительно точки подключения источника с учетом падения потенциалов в токоведущих элементах.*
- *При наличии только одного гармонического источника (50 Гц, 400 Гц) выводятся статическое и динамическое сопротивления ЗУ. В импульсном режиме выводится только динамическое сопротивление. Если источников несколько, или имеются источники между узлами, то динамическое сопротивление не выводится.*
- *Карты и диаграммы выводятся для той части схемы, которая находится в пределах текущего рабочего окна. Для просмотра карт и диаграмм другого участка схемы достаточно переместить рабочее окно на соответствующий участок схемы и вновь вывести карты (диаграммы). Повторять расчет при этом не требуется.*
- *Шаговые напряжения и напряжения прикосновения вычисляются с учетом сопротивления тела человека и сопротивления растеканию ступней. При расчете напряжений прикосновения может быть учтено наличие на поверхности грунта слоя с высоким удельным сопротивле-*

нием, например, подсыпки из гравия или асфальтовое покрытие. Для этого в пункте меню «Параметры» / «Параметры проекта» следует включить соответствующую опцию. Заново пересчитывать переходный процесс в этом случае не требуется. Достаточно повторить вывод диаграммы.

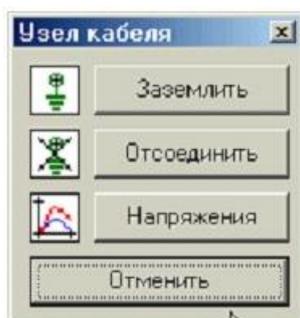
21. Расчет выноса потенциала по кабелям

Проложенные по территории ЗУ кабельные линии (силовые, контроля и управления) могут выносить возникший на ЗУ высокий потенциал на значительные расстояния. Возможны два механизма выноса потенциала:

- Вынос потенциала по нулевому проводу или кабельному экрану гальванически присоединенному к шинам ЗУ. Потенциал выносится на большие расстояния практически без затухания и определяется потенциалом ЗУ в точке присоединения кабеля.
- Вынос потенциала через емкостную связь проводов кабеля с находящимся под высоким потенциалом грунтом. Этот механизм более сложный. Для определения выносимого потенциала требуется проведение вычислений как указано ниже.

Ввести в схему элемент(ы) «**Кабель**»(см «Ввод кабельных линий»). Если расчетная схема содержит кабельные линии, то расчет напряжений в них происходит автоматически вместе с расчетом ЗУ. Кроме того, после проведения расчета ЗУ можно удалить или добавить новые кабельные линии и рассчитать напряжения в них без пересчета ЗУ. Для этого используйте пункт меню «Счет»/Расчет выноса потенциалов» или кнопку . Результаты расчета можно просмотреть следующим образом.

- Щелчок правой кнопкой по узлу кабеля открывает диалоговое окно, в котором для просмотра графиков напряжений следует выбрать опцию



«Напряжения».

- Щелчок левой кнопкой по этикетке кабеля открывает диалоговое окно кабеля, в котором кнопки $I(t)$, $U(t)$ выводят графики изменения во времени тока в элементе кабеля и разности потенциалов между его концами.
- Пункт меню «**Результаты / Карта токов и потенциалов в схеме**» и кнопка  выводят карту распределения максимальных токов в отрезках кабелей и напряжений между узлами кабелей и поверхностью грунта.

Заземляющие устройства подстанций

Термины и определения

1. **Базовая конструкция заземляющего устройства:** Первичная конструкция заземляющего устройства, закладываемая в расчёт, конфигурация которой зависит от класса напряжения и компоновки оборудования электроустановки.
2. **Внешние устройства молниезащиты:** Комплекс, состоящий из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.
3. **Внешний контур заземления (здания):** Замкнутый горизонтальный заземлитель, проложенный вокруг здания.
4. **Внутреннее устройство заземления (здания):** Совокупность магистралей заземления и отдельных заземляющих проводников, расположенных внутри здания.
5. **Выносной заземлитель:** Заземлитель, выполненный за пределами территории энергообъекта, не охватывающий эту территорию и соединённый с заземляющим устройством энергообъекта подземными или надземными проводниками.
6. **Выравнивание потенциалов:** Снижение разности потенциалов (шагового напряжения) на поверхности земли или пола при помощи защитных проводников, проложенных в земле или в полу, или на их поверхности и присоединённых к заземляющему устройству, или за счёт применения специальных покрытий земли с низким удельным сопротивлением.

7. **Естественный заземлитель:** Сторонняя проводящая часть, находящаяся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду, используемая для целей заземления.
8. **Заземление:** Преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством.
9. **Заземляющее устройство:** Совокупность заземлителя и заземляющих проводников.
10. **Заземлитель:** Проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду.
11. **Заземляющий проводник:** Проводник, соединяющий заземляемую часть (точку) с заземлителем.
12. **Искусственный заземлитель:** Заземлитель, специально выполняемый для целей заземления.
13. **Коэффициент передачи:** Отношение наибольшего значения импульса напряжения на заземляющем устройстве к наибольшему значению импульса напряжения на входных портах технических средств.
14. **Магистраль заземления:** Заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями.
15. **Напряжение на заземляющем устройстве:** Напряжение, возникающее между точкой ввода тока в заземлитель и зоной нулевого потенциала.
16. **Напряжение прикосновения:** Напряжение между двумя открытыми проводящими частями или между открытой проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.
17. **Напряжение шага:** Напряжение между двумя точками на поверхности земли, на расстоянии 1 м одна от другой, которое принимается равным длине шага человека, при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

18. Нулевой защитный проводник (РЕ-проводник): Защитный проводник в электроустановках до 1 кВ, предназначенный для присоединения открытых проводящих частей к глухозаземленной нейтрали источника питания.

19. Сопротивление заземляющего устройства: Отношение напряжения на заземляющем устройстве к потенциалоповышающему току.

20. Токоотвод: Часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

21. Уравнивание потенциалов: Электрическое соединение проводящих частей для достижения равенства их потенциалов. Система уравнивания потенциалов – совокупность проводящих частей и соединительных проводников уравнивания потенциалов.

Устройство ЗУ на подстанциях с открытыми распределительными устройствами

1. Искусственный заземлитель подстанций с ОРУ 110-750 кВ состоит из продольных и поперечных горизонтальных заземлителей, соединенных между собой в заземляющую сетку, вертикальных заземлителей и заземляющих проводников. При выполнении проекта ЗУ рекомендуется выделить две основные части искусственного заземлителя: базовую конструкцию, размещенную в зоне расположения оборудования РУ, и внешнюю часть, которая расположена за пределами базовой конструкции. При наличии на ПС нескольких РУ различных напряжений для каждого РУ рекомендуется выполнять базовую конструкцию ЗУ. Базовые конструкции РУ различного напряжения должны быть соединены не менее, чем двумя связями и объединены общим внешним контуром, охватывающим все ОРУ.

2. Для выравнивания электрического потенциала и обеспечения присоединения электрооборудования к заземлителю на территории, занятой ПС с открытым распределительным устройством, прокладывают продольные и поперечные горизонтальные заземлители и соединяют их между собой в заземляющую сетку.

Горизонтальные заземлители следует также прокладывать по краю территории, занимаемой заземляющим устройством, так, чтобы они в совокупности образовывали замкнутый контур.

При выходе заземляющего устройства за пределы ограждения ПС горизонтальные заземлители, находящиеся вне территории ПС, следует про-

кладывать на глубине не менее 1 м. Внешний контур заземляющего устройства в этом случае рекомендуется выполнять в виде многоугольника с тупыми или скругленными углами.

3. Базовая конструкция должна обеспечивать: удобство присоединения оборудования, выравнивание потенциалов в местах ввода тока КЗ, снижение импульсного сопротивления местами заземления молниеотводов, разрядников и ОПН, ТТ, ТН и другого силового оборудования, к которому прокладывают контрольные кабели. К базовой конструкции должны быть присоединены все естественные заземлители, включая железобетонные фундаменты зданий и оборудования. Заземляющие проводники, присоединяющие оборудование или конструкции к заземлителю, следует прокладывать в земле на глубине не менее 0,3 м.

4. Продольные заземлители базовой конструкции рекомендуется прокладывать вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,3 – 0,7 м от поверхности земли и на расстоянии 0,8 – 1,0 м от фундаментов или оснований оборудования. Допускается увеличение расстояний от фундаментов или оснований оборудования до 1,5 м с прокладкой одного заземлителя для двух рядов оборудования, если стороны обслуживания обращены одна к другой, а расстояние между основаниями или фундаментами двух рядов не превышает 3,0 м.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине, соответствующей прокладке продольных заземлителей базовой конструкции. Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающемся от периферии к центру заземляющей сетки. В скальных грунтах глубина прокладки горизонтальных заземлителей может быть уменьшена до 0,15 м. В грунтах с повышенной коррозионной опасностью глубина укладки горизонтальных заземлителей выбирается по условиям коррозии.

Расстояния между продольными и расстояния между поперечными горизонтальными искусственными заземлителями не должны превышать 30 м.

Нормируемые параметры заземляющих устройств

ЗУ электрической подстанции должны обеспечивать нормируемые параметры (табл.1) по условиям обеспечения электробезопасности и ЭМС для нормальных и наиболее опасных аварийных режимов:

- однофазное (двухфазное) короткое замыкание на землю на ПС;
- короткое замыкание на землю на линиях, отходящих от ПС;
- двойное замыкание на землю в сети с изолированной (заземлённой через дугогасящий реактор или резистор) нейтралью;
- стекание токов молнии и токов через ограничители перенапряжений;
- стекание токов несимметрии и токов шунтирующих реакторов.

Таблица 4. Нормируемые параметры заземляющего устройства.

	Нормируемый параметр	Допустимое значение
1.	Напряжение прикосновения.	ГОСТ12.1.038-82 (см. ПриложениеА). Предельнодопустимое напряжение прикосновения зависит отвремени отключения КЗ. <u>ПУЭп.1.7.91.</u> В качестве расчетного времени воздействия следует принимать сумму времени действия защиты и полного времени отключения выключателя. При определении допустимых значений напряжений прикосновения у рабочих мест следует принимать время действия резервной защиты, а для остальной территории – основной защиты. <u>В качестве рабочих мест на подстанции, как правило,</u>
2.	Сопротивление заземляющего устройства.	<u>ПУЭгл.1.7.</u>
3.	Напряжение на ЗУ относительно зоны нулевого потенциала.	<u>ПУЭп.1.7.89.</u> Напряжение на ЗУ при стекании с него тока замыкания на землю не должно, как правило, превышать10кВ. Напряжениевыше10кВ на ЗУ допускаеся, если исключен вынос потенциала за пределы подстанции. При напряжении выше 5кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и
4.	Напряжение между какой-либо точкой заземления силовогооборудования (при КЗ на землю) и точкамиЗУ вместе расположенными вторичного оборудования (РЩ, ОПУ и др.), к которому приходят	<u>СО34.35.311-2004(П.В.1).</u> Для цепей с номинальным напряжением не более 250В – 2кВ. При использовании контрольных кабелей, электрическая прочность изоляции которых ниже 2кВ, напряжение должно быть принято равное испытательному напряжению.

Продолжение таблицы 4

	Нормируемый параметр	Допустимое значение
5.	Температура нагрева заземленных с двух сторон экранов и брони кабелей при КЗ на подстанции.	ПУЭ пп.1.4.16,1.7.126 Кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение до 10кВ $\leq 200^{\circ}\text{C}$, кабели с ПВХ изоляцией $\leq 160^{\circ}\text{C}$, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена или пропиленовой резины $\leq 250^{\circ}\text{C}$, кабели с изоляцией из бутиловой резины $\leq 220^{\circ}\text{C}$.
6.	Импульсный потенциал на ЗУ при коммутациях силового оборудования и КЗ на землю.	СО 34.35.311-2004 п.2.2. Для вторичных цепей напряжения и тока, заземленных на РУ, не более $2,5 \text{ кВ} \cdot K_{\text{перед}}$. Коэффициент передачи $K_{\text{перед}}$ определяют экспериментально или расчетным путем. Наименьшее значение $K_{\text{перед}}=2$. Для вторичных цепей, не заземленных на РУ, – не более 10кВ.
7.	Температура нагрева заземляющих проводников и заземлителей при коротких замыканиях.	ПУЭ п.1.4.16. Не более 400°C (с учетом коррозионного износа). Для стальных проводников, присоединяемых к аппаратам, – не более 300°C .
8.	Расстояние от ЗУ молниеотводов до оборудования и кабельных трасс вторичных цепей.	Определяют расчетом из условия исключения пробоя с ЗУ молниеотводов на первичные и вторичные цепи. В расчетах среднюю напряженность электрического пробоя в грунте принимают по РД 153-34.3-35.125-99 (СО 34.35.125-99), табл. П15.3, см. приложение А.
9.	Сопротивление контакта между заземляющим проводником и заземляемым	Не более 0,05 Ом
10.	Коррозионное состояние элементов заземляющего	Разрушение не более 50% сечения (при выполнении п.7 по температуре нагрева).

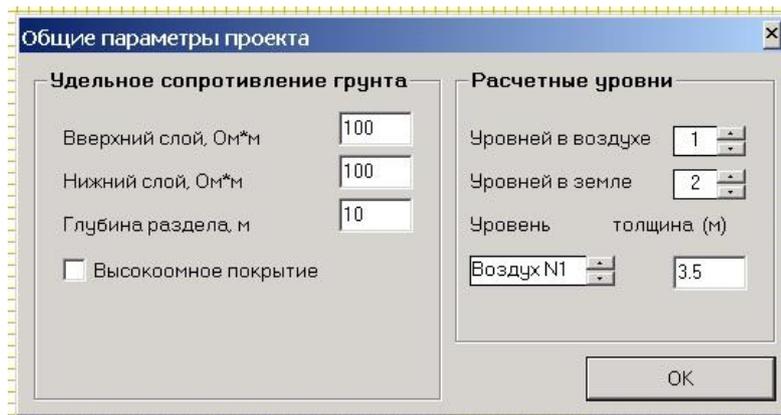
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ ОРУ И ШАГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИМИТАЦИИ КЗ.

Цель работы: ознакомиться с программой ОРУ-М и провести расчет шагового напряжения и потенциала на поверхности над сетчатым заземляющим устройством.

Порядок выполнения работы

1. Запустить программу ОРУ-М с помощью ярлыка на рабочем столе .
2. В открывшемся окне выбрать «Новый проект».
3. В следующем окне «Общие параметры проекта» указать значения в соответствии со своим вариантом (см. таблицу №1). Номер варианта сообщает преподаватель.



4. Сохранить проект, используя оригинальное имя файла (например, Ivanov_lab6.oru)
5. В окне масштаб установить 100 м.
6. Создать заземляющее устройство, с параметрами в соответствии со своим вариантом (см. таблицу 2).
7. Подключить источник тока и напряжения к одному из угловых узлов заземляющего устройства. Подвести курсор мыши к выбранному узлу, нажать правую кнопку мыши и выбрать источник .

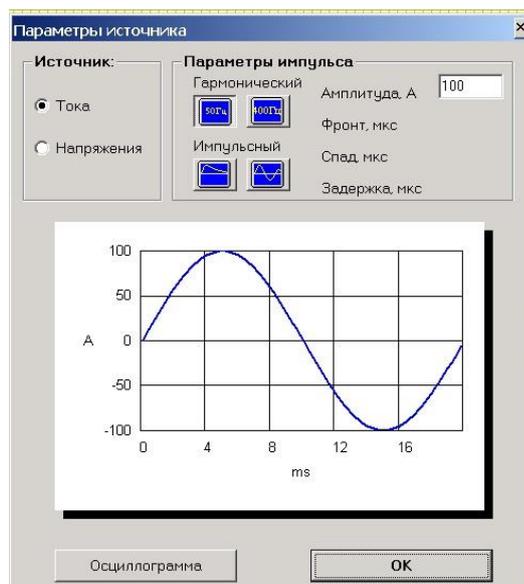
Таблица 1. Общие параметры проекта

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Верхний слой Ом*м	100	105	110	115	120	125	130	135
Нижний слой Ом*м	50	55	60	65	70	75	80	85
Глубина раздела (м)	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
Число уровней в воздухе	1	1	1	1	1	1	1	1
Число уровней в земле	2	2	2	2	2	2	2	2
Толщина уровня воздух №1 (м)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
Толщина уровня земля №1 (м)	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8
Толщина уровня земля №2 (м)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5

Таблица 2. Параметры заземляющих устройств.

Вариант	1,3,5,7	2,4,6,8
Тип заземлителя	прямоугольная сетка	круговая сетка
Расположение заземлителя	Земля 1	Земля 1
Материал заземлителя	сталь	Медь
Диаметр шины, мм	30	35
Число ячеек по горизонтали	4	–
Размер ячейки по горизонтали, м	10	–
Число ячеек по вертикали	4	–
Размер ячейки по вертикали, м	10	–
Диаметр сетки, м	–	50
Размер ячейки, м	–	10

8. Щелкнуть левой кнопкой мыши на значок источника . В открывшемся окне выбрать источник тока, кликнуть на кнопке 50 Гц и установить в поле Амплитуда значение 100 А и затем



нажать ОК.

9. Установить требуемые параметры счета с помощью пункта меню «**Параметры**» / «**Параметры счета**» или кнопки .
10. Провести расчет ЗУ путем использования пунктов меню **Счет** → **Расчет ЗУ**.
11. Посмотреть результаты расчета **Результаты** → **Диаграмма потенциалов на поверхности**.
12. Определить по цвету диаграммы максимальное (Π_{\max}) и минимальное (Π_{\min}) значение потенциала на поверхности в пределах заземлителя и внести их в таблицу 2 (колонки 2 и 3).
13. Используя кнопку  переключитесь в режим отображения шаговых напряжений. По цвету диаграммы определите максимальное ($U_{\text{шmax}}$) и минимальное ($U_{\text{шmin}}$) значение шагового напряжения в пределах заземляющего устройства и внести их в таблицу 2 (колонки 4 и 5).
14. Для выхода из режима просмотра результатов нажмите кнопку *ОК*.
15. Провести аналогичные расчеты при синусоидальном токе 50 Гц при амплитудных значениях 500, 1000, 5000, 10000 и 50000 А и внести значение потенциала и шагового напряжения в пределах заземлителя в таблицу 3.

Таблица 3. Расчетные значения потенциалов на поверхности и шаговых напряжений над ЗУ.

Амплитуда источника тока, А	Π_{\min}	Π_{\max}	$U_{\text{шmin}}$	$U_{\text{шmax}}$
1	2	3	4	5
100				
500				
1000				
5000				

10000				
50000				

16. По данным таблицы 3 построить графики зависимости расчетных значений потенциала на поверхности и шагового напряжения в зависимости от амплитуды источника тока.

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, касающихся содержания работы.
4. Термины и определения.
5. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе лабораторной работы).
6. Описание основной части (краткое описание программы ОРУ-М, проведение расчетов, результаты расчетов, представленные в форме таблиц и графиков).
7. Анализ полученных результатов.

Отчет составляется индивидуально каждым студентом.

Оформление отчета по лабораторной работе выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

Контрольные вопросы

1. Для чего нужно заземляющее устройство на ОРУ?
2. Какие параметры может рассчитывать программа «ОРУ-М»?
3. Какие параметры нормируются для заземляющего устройства ОРУ?

4. Из каких элементов состоит искусственный заземлитель ОРУ?
5. Что такое напряжение шага и как принимают допустимое значение напряжения шага?

Литература

1. Бургсдорф В.В. и Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Колечицкий Е.С. Основы расчета заземляющих устройств: Учебное пособие – М.: Издательство МЭИ, 2001.
4. Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого напряжения. Новосибирск, Изд-во НЭТИ, 1987.
5. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. /Под редакцией Дьякова А.Ф. -М.: Энергоатомиздат. 2003.
6. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. –М.: ЗАО«Энергосервис», 1998.
7. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И.ГумероваГ.М.Иманов и др. под ред Г.С.Кучинского СПб: Энергоатомиздат Санкт-Петербургское отделение. 2003 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛОВ И ТОКОВ В ЗАЗЕМЛЯЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ, ВЫЗВАННЫМИ РАЗРЯДАМИ МОЛНИЙ

Цель работы: Закрепить навыки использования программы ОРУ-М и провести расчет токов и потенциалов в заземляющем устройстве, вызванными разрядами молний.

Порядок выполнения работы

1. Запустить программу ОРУ-М с помощью  .
2. В появившемся окне выбрать «Открыть проект» и загрузить проект, созданный при выполнении лабораторной работы №6.
3. Удалите источник тока и напряжения путем нажатия на него правой кнопкой мыши.
4. В окне задать материал и диаметр шины согласно своему варианту (см. таблицу 1). С помощью кнопки «Выделение»  необходимо выделить заземляющее устройство и затем добавьте шину вниз путем нажатия на кнопку «Добавить шину вниз»  .

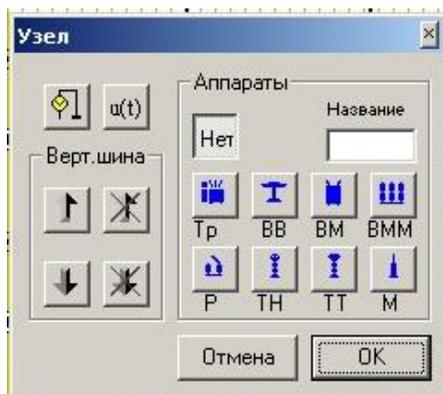
Таблица 1. Параметры вертикальных шин ЗУ

Варианты	1,2	3,4	5,6	7,8
Материал	сталь	медь	сталь	медь
Диаметр шины, мм	60	55	50	45

5. В углах заземляющего устройства установить молниеотводы. Для этого поочередно подвести курсор мыши к узлам ЗУ, нажать правую кнопку мыши и выбрать значок «Молниеотвод».
6. Расположить три трансформатора в ряд, так чтобы они находились на одной вертикальной шине заземляющего устройства. (В случае круговой сетки ЗУ (варианты 2, 4, 6 и 8) линия расположения трансформаторов будет находиться не вертикально, а под углом к вертикальной оси). Для установки трансформатора надо подвести курсор мыши к узлу ЗУ, нажать правую кнопку мыши и выбрать значок в открывшемся окне значок «Трансформатор»  .

7. Аналогично расположите три выключателя в ряд справа от трансформаторов, а затем правее от них три размыкателя. Для выбора выключателя выберите левой кнопкой мыши значок «Выключатель масляный» , а для выбора размыкателя значок .

8. Подключите источник тока и напряжения к одному из углов ЗУ. Для этого необходимо подвести курсор мыши к угловому узлу, нажать правую кнопку мыши и в появившемся окне

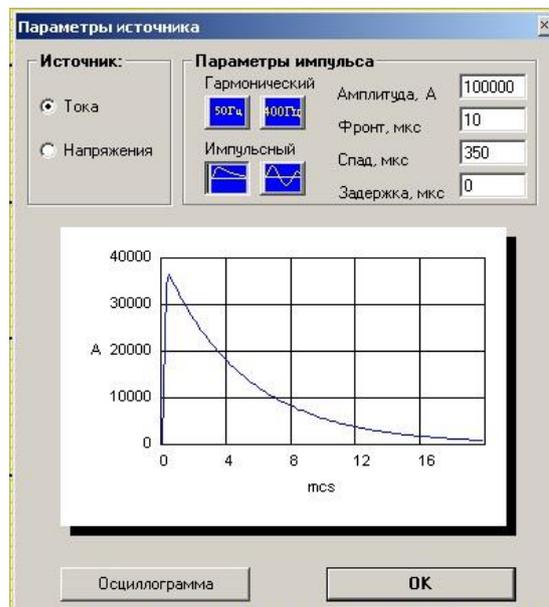


выбрать левой клавишей мыши значок «Источник»  и затем также левой клавишей кнопку . Появившееся окно «Параметры источника» закрыть клавишей .

9. Провести расчет ЗУ с параметрами *первого импульса молнии*. Для этого необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши на значке источника.



В открывшемся окне выбрать источник тока «**Импульсный апериодический**», установить в поле **Амплитуда** значение 100000 А, **Фронт** – 10 мкс, **Спад** – 350 мкс, **Задержка** – 0 мкс и затем нажать **ОК**.



10. Установить требуемые параметры счета с помощью пункта меню «**Параметры**» / «**Параметры счета**» или кнопки  (их надо оставить по умолчанию).

11. Провести расчет ЗУ путем использования пунктов меню **Счет** → **Расчет ЗУ**.

12. Посмотреть результаты расчета **Результаты** → **Карта токов и потенциалов в схеме**. В открывшемся окне «Выбор просматриваемых уровней выбрать» выбрать **Все уровни**.

13. В открывшейся карте экстремальных потенциалов в узлах и токов в ветвях найти максимальные и минимальные значения потенциалов (P_{\max} , P_{\min}) и токов (I_{\max} , I_{\min}) для уровня *земля 1* и внести их в таблицу 2.

14. По этой же карте найти максимальные и минимальные значения потенциалов узлов ЗУ (P_{\max} , P_{\min}) для уровня *земля 2*, а также максимальные и минимальные значения токов в вертикальных шинах ЗУ и внести их в таблицу 3.

Таблица 2. Расчетные значения потенциалов и токов в ЗУ (уровень земля 1)

Амплитуда тока молнии, кА	$T_{\text{фронта}}$, мкс	$T_{\text{полуспада}}$, мкс	P_{max} , кВ	P_{min} , кВ	I_{max} , кА	I_{min} , кА
100	10	350				
150	10	350				
200	10	350				
25	0,25	100				
37,5	0,25	100				
50	0,25	100				

Таблица 3. Расчетные значения потенциалов и токов в ЗУ (уровень земля 2)

Амплитуда тока молнии, кА	$T_{\text{фронта}}$, мкс	$T_{\text{полуспада}}$, мкс	P_{max} , кВ	P_{min} , кВ	I_{max} , кА (ток в вертикальной шине)	I_{min} , кА (ток в вертикальной шине)
100	10	350				
150	10	350				
200	10	350				
25	0,25	100				
37,5	0,25	100				
50	0,25	100				

15. Для выхода из режима просмотра карты результатов нажмите кнопку .

16. Провести аналогичные расчеты для значений амплитуды тока 150 и 200 кА и внести результаты расчета в таблицы 2 и 3.

17. Провести аналогично расчеты для **последующего импульса молнии**. Для этого в окне параметры источника необходимо ввести значения: Фронт – 0,25 мкс, Спад – 100 мкс, Задержка – 0 мкс. При расчетах использовать значения тока 25, 37,5 и 50 кА и внести результаты расчета в таблицы 2 и 3.

18. По данным таблиц 2 и 3 построить графики зависимостей расчетных значений экстремальных потенциалов в узлах и токов в ветвях ЗУ, от амплитуды воздействующего тока.

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, касающихся содержания работы.
4. Термины и определения.
5. Описание задания (постановка задач, подлежащих выполнению в процессе лабораторной работы).
6. Описание основной части (краткое описание программы ОРУ-М, проведение расчетов, результаты расчетов, представленные в форме таблиц и графиков).
7. Анализ полученных результатов.

Отчет составляется индивидуально каждым студентом.

Оформление отчета по лабораторной работе выполняется в соответствии с требованиями СТО ТПУ 2.5.01-2006.

Контрольные вопросы

1. Что такое базовая конструкция заземляющего устройства?
2. Каким образом распределяется потенциал в ЗУ?
3. Каким образом распределяются токи в ЗУ?
4. От каких факторов зависит предельно допустимое напряжение прикосновения?
5. Как изменяется значение потенциала в вертикальных шинах ЗУ?

Литература

1. Бургсдорф В.В. и Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Колечицкий Е.С. Основы расчета заземляющих устройств: Учебное пособие – М.: Издательство МЭИ, 2001.
4. Целебровский Ю.В. Заземляющие устройства электроустановок высокого напряжения. Новосибирск, Изд-во НЭТИ, 1987.
5. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. /Под редакцией Дьякова А.Ф. -М.: Энергоатомиздат. 2003.
6. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. –М.: ЗАО«Энергосервис», 1998.
7. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов/ И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И.Гумерова Г.М.Иманов и др. под ред Г.С.Кучинского СПб: Энергоатомиздат Санкт-Петербургское отделение. 2003 г.

Приложение А

Справочные материалы

П.А.1 Предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и токов. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам (ГОСТ 12.1.038-82). В таблицах П.А.1-П.А.3 даны зависимости предельно допустимых уровней напряжения прикосновения в зависимости от времени воздействия для нормальных и аварийных режимов.

Таблица П.А.1 - Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, при нормальном (неаварийном) режиме продолжительность воздействия не более 10 мин в сутки)

Род тока	U, В	I, mA
	Не более	
Переменный 50 Гц	2,0	0,3
Постоянный	8,0	1,0

Примечание: Для лиц, выполняющих работу в условиях высоких температур (выше 25° С) и влажности (более 75%) приведенные в таблице значения должны быть уменьшены в три раза. +

Таблица П.А.2 Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения при аварийном режиме электроустановок, напряжением до 1 кВ с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1 кВ с изолированной нейтралью

	Предельно допустимое напряжение прикосновения U, В											
	0,01 0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св 1,0
Переменный 50 Гц	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Постоянный	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40

Таблица П.А.3 Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения при аварийном режиме электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с эффективным и глухим заземлением нейтрали.

Продолжительность воздействия t, с	Предельно допустимый уровень напряжения прикосновения U, В
До 0,1	500
0,2	400
0,5	200
0,7	130
1,0	100
Св. 1,0 до 5,0	65

Предельно допустимые значения напряжения шага в ГОСТ 12.1.038-82 не установлены. На практике в качестве допустимого значения напряжения шага принимают напряжение прикосновения.

В российских нормативных документах не установлены предельно допустимые значения импульсных (при ударе молнии) напряжений прикосновения. Согласно стандарту МЭК 1662 предельно допустимое значение энергии импульса, при котором вероятность возникновения вентрикулярной фибрилляции не превышает 2%, составляет 6 Дж. При этом напряжение прикосновения не должно превышать 6 кВ.

Учебное издание

Тихонов Дмитрий Владимирович

Старцева Елена Вячеславовна

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие

Научный редактор
Редактор *И.О. Фамилия*
Компьютерная верстка *И.О. Фамилия*
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru

