ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО ИрГУПС)

УТВЕРЖДЕНА
приказом ректора
от «30» мая 2025 г. № 51

Б1.О.32 Теоретические основы электротехники

рабочая программа дисциплины

Специальность/направление подготовки – 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов
Специализация/профиль – Электроснабжение железных дорог
Квалификация выпускника – Инженер путей сообщения
Форма и срок обучения – очная форма 5 лет; заочная форма 6 лет
Кафедра-разработчик программы – Электроэнергетика транспорта

Общая трудоемкость в з.е. – 8
Часов по учебному плану (УП) – 288

Формы промежуточной аттестации
очная форма обучения:
зачет 5 семестр, экзамен 4 семестр
заочная форма обучения:
зачет 3 курс, экзамен 3 курс

Очная форма обучения **Распределение часов дисциплины по семестрам**

Семестр	4	5	**Итого**
Вид занятий	Часов по УП	Часов по УП	**Часов по УП**
Аудиторная контактная работа по видам учебных занятий/ в т.ч. в форме ПП*	68	68	**136**
– лекции	34	34	**68**
– практические (семинарские)	17	17	**34**
– лабораторные	17	17	**34**
Самостоятельная работа	40	76	**116**
Экзамен	36		**36**
Итого	144	144	**288**

Заочная форма обучения **Распределение часов дисциплины по семестрам**

Курс	3	**Итого**
Вид занятий	Часов по УП	**Часов по УП**
Аудиторная контактная работа по видам учебных занятий/ в т.ч. в форме ПП*	32	**32**
– лекции	16	**16**
– практические (семинарские)	8	**8**
– лабораторные	8	**8**
Самостоятельная работа	234	**234**
Зачет	4	**22**
Экзамен	18	**0**
Итого	288	**288**

ИРКУТСК

Электронный документ выгружен из ЕИС ФГБОУ ВО ИрГУПС и соответствует оригиналу
Подписант ФГБОУ ВО ИрГУПС Трофимов Ю.А.
009B9D93267016946D4792FA33A1E1FAE3 с 22 января 2025 г. по 17 апреля 2026 г.Подпись соответствует файлу документа

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования – специалитет по специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов, утвержденным Приказом Минобрнауки России от 27.03.2018 г. № 217.

Программу составил(и):
к.т.н., доцент, доцент, А.П. Степанов

Рабочая программа рассмотрена и одобрена для использования в учебном процессе на заседании кафедры «Электроэнергетика транспорта», протокол от «20» мая 2025 г. № 9

Зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент В.А. Тихомиров

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1 Цели дисциплины

1	создание научной базы для последующего освоения различных специальных электротехнических дисциплин
2	освоение практической работы по сборке электрических схем и измерению различных электротехнических величин

1.2 Задачи дисциплины

1	освоение теории физических явлений, положенных в основу создания и функционирования различных электротехнических устройств
2	практическое освоение методов расчета режимов работы электрических цепей и состояний электрических, магнитных и электромагнитных полей

1.3 Цель воспитания и задачи воспитательной работы в рамках дисциплины

Профессионально-трудовое воспитание обучающихся

Цель профессионально-трудового воспитания – формирование у обучающихся осознанной профессиональной ориентации, понимания общественного смысла труда и значимости его для себя лично, ответственного, сознательного и творческого отношения к будущей деятельности, профессиональной этики, способности предвидеть изменения, которые могут возникнуть в профессиональной деятельности, и умению работать в изменённых, вновь созданных условиях труда.
Цель достигается по мере решения в единстве следующих задач:
– формирование сознательного отношения к выбранной профессии;
– воспитание чести, гордости, любви к профессии, сознательного отношения к профессиональному долгу, понимаемому как личная ответственность и обязанность;
– формирование психологии профессионала;
– формирование профессиональной культуры, этики профессионального общения;
– формирование социальной компетентности и другие задачи, связанные с имиджем профессии и авторитетом транспортной отрасли

2 МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Блок/часть ОПОП	Блок 1. Дисциплины / Обязательная часть

2.1 Дисциплины и практики, на которых основывается изучение данной дисциплины

1	Б1.О.33 Электрические машины
2	Б1.О.34 Теория дискретных устройств
3	Б1.О.35 Электроника
4	Б1.О.43 Общая энергетика
5	Б2.О.01(У) Учебная - ознакомительная практика

2.2 Дисциплины и практики, для которых изучение данной дисциплины необходимо как предшествующее

1	Б1.О.37 Теоретические основы автоматики и телемеханики
2	Б1.О.45 Релейная защита
3	Б1.О.46 Электроснабжение нетяговых потребителей
4	Б1.О.47 Автоматизация систем электроснабжения
5	Б1.О.50 Теория электрической тяги
6	Б2.О.02(П) Производственная - технологическая практика
7	Б3.01(Д) Выполнение выпускной квалификационной работы

3 ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ТРЕБОВАНИЯМИ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Планируемые результаты обучения
ПК-1 Способен организовывать и выполнять работы (технологические процессы) по монтажу, эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и модернизации объектов системы	ПК-1.1 Применяет знания устройства, принципа действия, технических характеристик и конструктивных особенностей основных элементов, узлов и устройств системы обеспечения движения поездов	Знать: основные электротехнические законы; методы расчета электрических линейных, нелинейных и магнитных цепей постоянного и переменного тока; основные законы и понятия электромагнетизма.
		Уметь: производить расчет электрических и магнитных цепей; осуществлять анализ переходных процессов в электрических и магнитных цепях производить измерения основных электрических величин; определять параметры электрических цепей постоянного и переменного тока; различать и выбирать электрические аппараты для типовых электрических цепей.

обеспечения движения поездов на основе знаний об особенностях функционирования её основных элементов и устройств, а так же правил технического обслуживания и ремонта		Владеть: методами чтения электрических схем; методами и способами диагностирования электрических устройств

4 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код	Наименование разделов, тем и видов работ	Очная форма					Заочная форма					*Код индикатора достижения компетенции
		Семестр	Часы				Курс	Часы				
			Лек	Пр	Лаб	СР		Лек	Пр	Лаб	СР	
1.0	**Раздел 1. Пассивные четырехполюсники**											
1.1	Пассивные четырехполюсники	4	4	2	2	10	3/уст.	2	2	2	10	ПК-1.1
2.0	**Раздел 2. Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах**											
2.1	Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах	4	4	2	2	10	3/уст.	2	2		10	ПК-1.1
3.0	**Раздел 3. Электрические фильтры**											
3.1	Электрические фильтры	4	2	1	1	5	3/уст.				6	ПК-1.1
4.0	**Раздел 4. Переходные процессы в линейных электрических цепях**											
4.1	Переходные процессы в линейных электрических цепях	4	8	4	2	10	3/уст.	2		2	20	ПК-1.1
5.0	**Раздел 5. Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока**											
5.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока	4	4	2		5	3/уст.	2			10	ПК-1.1
6.0	**Раздел 6. Методы расчёта магнитных**											

4 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ												
Код	Наименование разделов, тем и видов работ	Очная форма					Заочная форма					*Код индикатора достижения компетенции
		Семестр	Часы				Курс	Часы				
			Лек	Пр	Лаб	СР		Лек	Пр	Лаб	СР	
	цепей											
6.1	Методы расчёта магнитных цепей	4	2	2		5	3/уст.				10	ПК-1.1
7.0	**Раздел 7. Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока**											
7.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока	4	4	2	2	10	3/уст.	2			18	ПК-1.1
8.0	**Раздел 8. Катушка с ферромагнитным сердечником**											
8.1	Катушка с ферромагнитным сердечником	4	2		2	5	3/уст.				10	ПК-1.1
9.0	**Раздел 9. Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником**											
9.1	Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником	4	2		2	5	3/уст.				6	ПК-1.1
10.0	**Раздел 10. Феррорезонанс напряжения**											
10.1	Феррорезонанс напряжения	4	2	1	2	5	3/уст.				5	ПК-1.1
11.0	**Раздел 11. Феррорезонанс тока**											
11.1	Феррорезонанс тока	4	1	1	2	5	3/уст.				5	ПК-1.1
	Форма промежуточной аттестации – экзамен	4	36				3/зимняя	18				ПК-1.1
12.0	**Раздел 12. Электрическое поле в проводящих средах**											
12.1	Электрическое поле в проводящих средах	5	6	4	4	15	3/зимняя	2	1	1	30	ПК-1.1
13.0	**Раздел 13. Магнитное поле постоянного тока**											
13.1	Магнитное поле постоянного тока	5	6	4	4	10	3/зимняя	2	1	1	26	ПК-1.1
14.0	**Раздел 14. Электромагнитное поле**											
14.1	Электромагнитное поле	5	8	4	4	5	3/зимняя	2	1	1	24	ПК-1.1

4 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код	Наименование разделов, тем и видов работ	Очная форма					Заочная форма					*Код индикатора достижения компетенции
		Семестр	Часы				Курс	Часы				
			Лек	Пр	Лаб	СР		Лек	Пр	Лаб	СР	
15.0	**Раздел 15. Плоские электромагнитные волны**											
15.1	Плоские электромагнитные волны	5	7	4	2	5	3/зимняя	1	1		22	ПК-1.1
16.0	**Раздел 16. Поверхностный эффект в пластине**											
16.1	Поверхностный эффект в пластине4	5	6	1	3	6	3/зимняя	1		1	22	ПК-1.1
	Форма промежуточной аттестации – зачет	5					3/летняя	4				ПК-1.1
	Итого часов (без учёта часов на промежуточную аттестацию)		68	34	34	116		16	8	8	234	

5 ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонд оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине оформлен в виде приложения № 1 к рабочей программе дисциплины и размещен в электронной информационно-образовательной среде Университета, доступной обучающемуся через его личный кабинет

6 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1 Учебная литература

6.1.1 Основная литература

	Библиографическое описание	Кол-во экз. в библиотеке/ онлайн
6.1.1.1	Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учеб. пособие / Г. И. Атабеков. — Изд. 8-е, стер. — СПб. : Лань, 2010. — 592 с. — Текст : непосредственный.	25
6.1.1.2	Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле : учебное пособие для вузов / Г. И. Атабеков, С. Д. Купалян, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков. — 8-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 432 с. — URL: https://e.lanbook.com/book/407531 (дата обращения: 18.03.2025). — Текст : электронный.	Онлайн
6.1.1.3	Шебес, М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей : учеб. пособие / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1990. — 544 с. — Текст : непосредственный.	160
6.1.1.4	Основы теории цепей : Учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. — 5-е изд., перераб. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 528 с. — Текст : непосредственный.	95

6.1.2 Дополнительная литература

	Библиографическое описание	Кол-во экз. в библиотеке/ онлайн
6.1.2.1	Бычков, Ю. А. Основы теории электрических цепей : учебник / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев ; С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т "ЛЭТИ". — Спб. : Лань, 2002. — 464 с. — Текст : непосредственный.	11
6.1.2.2	Степанов, А. П. Расчет и анализ нелинейных электрических и магнитных цепей : учеб. пособие / А. П. Степанов, М. А. Степанов ; Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : ИрГУПС, 2018. — 104 с.	288

	— Текст : непосредственный.	
6.1.2.3	Степанов, А. П. Расчет линейных электрических цепей : учеб. пособие / А. П. Степанов, М. А. Степанов ; Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : ИрГУПС, 2018. — 160 с. — Текст : непосредственный.	284
6.1.2.4	Степанов, А. П. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для лаб. занятий / А. П. Степанов, В. В. Криворотова, Г. Г. Кудряшова ; Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : ИрГУПС, 2016. — 188 с. — Текст : непосредственный.	250
6.1.2.5	Степанов, А. П. Расчет и исследование линейных электрических цепей : учеб. пособие по теорет. основам электротехники для студентов техн. вузов / А. П. Степанов ; М-во путей сообщ. РФ, Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — 2-е изд., перераб. и доп. — Иркутск : ИрГУПС, 2003. — 262 с. — Текст : непосредственный.	276
6.1.2.6	Степанов, А. П. Сборник заданий и рекомендаций для выполнения расчетно-графических и контрольных работ по ТОЭ : учеб. пособие по дисциплине "Теоретические основы электротехники" / А. П. Степанов, Г. Г. Кудряшова ; Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : ИрГУПС, 2012. — 55 с. — Текст : непосредственный.	276
6.1.2.7	Расчет электрических цепей синусоидального тока : Метод. указания к расчетно-графическим работам по электротехнике / МПС РФ, ИрИИТ ; Сост. А.П. Степанов, Сост. Н.М. Астраханцева, Сост. Г.Г. Кудряшова. — Иркутск : ИрИИТ, 2000. — 51 с. — Текст : непосредственный.	546
6.1.2.8	Степанов, А. П. Теоретические основы электротехники : сб. описаний лаб. работ для студентов энергет. и электротехн. специальностей / А. П. Степанов, Г. Г. Кудряшова ; Федер. агентство ж.-д. трансп., Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : ИрГУПС, 2005. — 186 с. — Текст : непосредственный.	218
6.1.2.9	Степанов, А. П. Тестовые задания по теоретическим основам электротехники / А. П. Степанов ; МПС РФ, ИрИИТ. — Иркутск : ИрИИТ, 2001. — 47 с. — Текст : непосредственный.	240
6.1.2.10	Аполлонский, С. М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учеб. пособие / С. М. Апполонский. — СПб. : Лань, 2012. — 587 с. — Текст : непосредственный.	29
6.1.2.11	Борцов, Николай Константинович Теоретические основы электротехники : учеб. пособие по разд. "Электромагнитное поле" для студентов электроэнергет. и электротехн. специальностей / Н. К. Борцов ; М-во путей сообщ. РФ, Иркут. гос. ун-т путей сообщ. — Иркутск : [б.и.], 2004. — Ч. 1. — 84 с. — Текст : непосредственный.	169
6.1.3 Учебно-методические разработки (в т. ч. для самостоятельной работы обучающихся)		
	Библиографическое описание	Кол-во экз. в библиотеке/ онлайн
6.1.3.1	Степанов, А. П. Методические указания по изучению дисциплины Б1.О.32 Теоретические основы электротехники специальности 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов специализации Электроснабжение железных дорог, Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте, Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта / А. П. Степанов ; ИрГУПС. – Иркутск : ИрГУПС, 2025. – 20 с. - Текст: электронный. - URL: https://www.irgups.ru/eis/for_site/umkd_files/mu_66798_1416_2025_1_signed.pdf	Онлайн
6.2 Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»		
6.3 Программное обеспечение и информационные справочные системы 6.3.1 Базовое программное обеспечение		
6.3.1.1	Microsoft Windows Professional 10, государственный контракт от 20.07.2021 № 0334100010021000013-01	
6.3.1.2	Microsoft Office Russian 2010, государственный контракт от 20.07.2021 № 0334100010021000013-01	
6.3.1.3	FoxitReader, свободно распространяемое программное обеспечение http://free-software.com.ua/pdf-viewer/foxit-reader/	
6.3.1.4	Adobe Acrobat Reader DC свободно распространяемое программное обеспечение https://get.adobe.com/ru/reader/enterprise/	
6.3.1.5	Яндекс. Браузер. Прикладное программное обеспечение общего назначения, Офисные приложения, лицензия – свободно распространяемое программное обеспечение по лицензии BSD License.	
6.3.1.10	Яндекс. Браузер. Прикладное программное обеспечение общего назначения, Офисные	

	приложения, лицензия – свободно распространяемое программное обеспечение по лицензии BSD License
6.3.2 Специализированное программное обеспечение	
6.3.2.1	Multisim education 16.0, договор от 06.06.2017 г. № 31705062861
6.3.3 Информационные справочные системы	
6.3.3.1	Не предусмотрены
6.4 Правовые и нормативные документы	
6.4.1	Не предусмотрены

7 ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1	Корпуса А, Б, В, Г, Д, Е ИрГУПС находятся по адресу г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; корпус Л ИрГУПС находится – по адресу г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.80
2	Учебная аудитория Г-305 для проведения лекционных и практических занятий, лабораторных работ, групповых и индивидуальных консультаций, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), текущего контроля и промежуточной аттестации. Основное оборудование: специализированная мебель, мультимедиапроектор, экран, (ноутбук переносной). Для проведения занятий имеются учебно-наглядные пособия (презентации, плакаты).
3	Лаборатория Г-123 «Теоретические основы электротехники и теория линейных электрических цепей» для проведения лекционных и практических занятий, лабораторных работ, групповых и индивидуальных консультаций, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), текущего контроля и промежуточной аттестации. Основное оборудование: специализированная мебель. Для проведения занятий имеются учебно-наглядные пособия (презентации, плакаты). Лабораторное рабочее место NI ELVIS II Bazic BundI, ноутбук DEPO VIP C85010 T5850/GDDR2/T120G/DVD+RW, ПЭВМ HP BundIe 3500 Pro MT, Осциллограф С1-73, Генератор Г6-43
4	Лаборатория Д-210 «Метрология, стандартизация и сертификация» для проведения лекционных и практических занятий, лабораторных работ, групповых и индивидуальных консультаций, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), текущего контроля и промежуточной аттестации. Основное оборудование: специализированная мебель. Для проведения занятий имеются учебно-наглядные пособия (презентации, плакаты). Лабораторный комплекс «Основы информационно-измерительной техники» И.И.Т., Стенд «Тэмп», Осциллограф С1-83, Вольтметр Д-5081, прибор Д-5014, измерительные приборы (разные)
5	Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой, подключенной к информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду ИрГУПС. Помещения для самостоятельной работы обучающихся: – читальные залы; – учебные залы вычислительной техники А-401, А-509, А-513, А-516, Д-501, Д-503, Д-505, Д-507; – помещения для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования – А-521

8 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Вид учебной деятельности	Организация учебной деятельности обучающегося
Лекция	Лекция (от латинского «lection» – чтение) – вид аудиторных учебных занятий. Лекция: закладывает основы научных знаний в систематизированной, последовательной, обобщенной форме; раскрывает состояние и перспективы развития соответствующей области науки и техники; концентрирует внимание обучающихся на наиболее сложных, узловых вопросах; стимулирует познавательную активность обучающихся. Во время лекционных занятий обучающийся должен уметь сконцентрировать внимание на изучаемых проблемах и включить в работу все виды памяти: словесную, образную и моторно-двигательную. Для этого весь материал, излагаемый преподавателем, обучающемуся необходимо конспектировать. На полях конспекта следует помечать вопросы, выделенные обучающимся для консультации с преподавателем. Выводы, полученные в виде формул, рекомендуется в конспекте подчеркивать или обводить рамкой, чтобы лучше запоминались. Полезно составить краткий справочник, содержащий определения важнейших понятий лекции. К каждому занятию следует разобрать материал предыдущей лекции. Изучая материал по учебнику или конспекту лекций, следует переходить к следующему вопросу только в том случае, когда хорошо усвоен предыдущий вопрос. Ряд вопросов дисциплины

	может быть вынесен на самостоятельное изучение. Такое задание требует оперативного выполнения. В конспекте лекций необходимо оставить место для освещения упомянутых вопросов. Обозначить вопросы, термины, материал, который вызывает трудности, пометить и попытаться найти ответ в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удается разобраться в материале, то необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практическом занятии
Практическое занятие	Практическое занятие – вид аудиторных учебных занятий, целенаправленная форма организации учебного процесса, при реализации которой обучающиеся по заданию и под руководством преподавателя выполняют практические задания. Практические задания направлены на углубление научно-теоретических знаний и овладение определенными методами работы, в процессе которых вырабатываются умения и навыки выполнения тех или иных учебных действий в данной сфере науки. Практические занятия развивают научное мышление и речь, позволяют проверить знания обучающихся, выступают как средства оперативной обратной связи; цель практических занятий – углублять, расширять, детализировать знания, полученные на лекции, в обобщенной форме и содействовать выработке навыков профессиональной деятельности. На практических занятиях подробно рассматриваются основные вопросы дисциплины, разбираются основные типы задач. К каждому практическому занятию следует заранее самостоятельно выполнить домашнее задание и выучить лекционный материал к следующей теме. Систематическое выполнение домашних заданий обязательно и является важным фактором, способствующим успешному усвоению дисциплины
Лабораторная работа	Основной целью лабораторных работ является теоретическое обоснование, наглядное и/или экспериментальное подтверждение и/или проверка существенных теоретических положений (законов, закономерностей) анализ существующих методик и методов их реализации и т.д. Они занимают преимущественное место при изучении дисциплин обязательной части и части, формируемой участниками образовательных отношений Блока 1. Исходя из цели, содержанием лабораторных работ могут быть: - экспериментальная проверка формул, методик расчета; - проведение натурных измерений свойств, рабочих параметров, режимов работы при помощи лабораторного оборудования и/или стендов и макетов; - ознакомление, анализ и теоретические выкладки по устройству, принципу действия и способам обслуживания аппаратов, деталей машин, механизмов, процессов, протекающих в них при этом и т.д.; - наглядная графическая интерпретация чертежей, схем, объемных поверхностей и т.д., воспроизводимых с помощью специализированного программного обеспечения; - имитационное моделирование процессов, протекающих в сложных химических, физических, механических, электрических и пр. объектах; - наглядное представление о работе персонала конкретной организации или подразделения ОАО «РЖД» посредством моделирования штатных и внештатных ситуаций в виртуальных специализированных АРМ (автоматизированных рабочих мест); - установление и подтверждение закономерностей (путем сравнения проведенного эксперимента и рассчитанных значений) и т.д.; - ознакомление с методиками проведения экспериментов, наглядным устройством стенд-макетов и пр.; - установление свойств веществ, их качественных и количественных характеристик; - анализ различных характеристик процессов, в том числе производственных и иных процессов; - расчет параметров различных явлений и процессов, смоделировать которые не возможно в реальных условиях (например, чрезвычайные ситуации и пр.); - наблюдение развития явлений, процессов и др. Допускается иное содержание лабораторных работ, если это будет способствовать реализации целей и задач дисциплины и формированию соответствующих компетенций. По характеру выполняемых лабораторных работ возможны: - ознакомительные работы, используемые для закрепления изученного теоретического материалы; - аналитические работы, используемые для получения новой информации на основе формализованных методов; - творческие работы, ориентированные на самостоятельный выбор подходов

	решения задач. Прежде, чем приступить к лабораторным занятиям, обучающимся необходимо повторить теоретический материал по теме работы. Каждая лабораторная работа оснащена методическими указаниями, разработанными преподавателями, ведущими дисциплину
Самостоятельная работа	Обучение по дисциплине «Теоретические основы электротехники» предусматривает активную самостоятельную работу обучающегося. В разделе 4 рабочей программы, который называется «Структура и содержание дисциплины», все часы самостоятельной работы расписаны по темам и вопросам, а также указана необходимая учебная литература: обучающийся изучает учебный материал, разбирает примеры и решает разноуровневые задачи в рамках выполнения как общих домашних заданий, так и индивидуальных домашних заданий (ИДЗ) и других видов работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины. При выполнении домашних заданий обучающемуся следует обратиться к задачам, решенным на предыдущих практических занятиях, решенным домашним работам, а также к примерам, приводимым лектором. Если этого будет недостаточно для выполнения всей работы можно дополнительно воспользоваться учебными пособиями, приведенными в разделе 6.1 «Учебная литература». Если, несмотря на изученный материал, задание выполнить не удается, то в обязательном порядке необходимо посетить консультацию преподавателя, ведущего практические занятия, и/или консультацию лектора. Домашние задания, индивидуальные домашние задания и другие работы, предусмотренные рабочей программой дисциплины должны быть выполнены обучающимся в установленные преподавателем сроки в соответствии с требованиями к оформлению текстовой и графической документации, сформулированным в Положении «Требования к оформлению текстовой и графической документации. Нормоконтроль»
Комплекс учебно-методических материалов по всем видам учебной деятельности, предусмотренным рабочей программой дисциплины (модуля), размещен в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет	

Приложение № 1 к рабочей программе

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

1. Общие положения

Фонд оценочных средств (ФОС) является составной частью нормативно-методического обеспечения системы оценки качества освоения обучающимися образовательной программы.

Фонд оценочных средств предназначен для использования обучающимися, преподавателями, администрацией Университета, а также сторонними образовательными организациями для оценивания качества освоения образовательной программы и уровня сформированности компетенций у обучающихся.

Задачами ФОС являются:

– оценка достижений обучающихся в процессе изучения дисциплины;

– обеспечение соответствия результатов обучения задачам будущей профессиональной деятельности через совершенствование традиционных и внедрение инновационных методов обучения в образовательный процесс;

– самоподготовка и самоконтроль обучающихся в процессе обучения.

Фонд оценочных средств сформирован на основе ключевых принципов оценивания: валидность, надежность, объективность, эффективность.

Для оценки уровня сформированности компетенций используется трехуровневая система:

– минимальный уровень освоения, обязательный для всех обучающихся по завершению освоения образовательной программы; дает общее представление о виде деятельности, основных закономерностях функционирования объектов профессиональной деятельности, методов и алгоритмов решения практических задач;

– базовый уровень освоения, превышение минимальных характеристик сформированности компетенций; позволяет решать типовые задачи, принимать профессиональные и управленческие решения по известным алгоритмам, правилам и методикам;

– высокий уровень освоения, максимально возможная выраженность характеристик компетенций; предполагает готовность решать практические задачи повышенной сложности, нетиповые задачи, принимать профессиональные и управленческие решения в условиях неполной определенности, при недостаточном документальном, нормативном и методическом обеспечении.

2. Перечень компетенций, в формировании которых участвует дисциплина. Программа контрольно-оценочных мероприятий. Показатели оценивания компетенций, критерии оценки

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» участвует в формировании компетенций:

ПК-1. Способен организовывать и выполнять работы (технологические процессы) по монтажу, эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и модернизации объектов системы обеспечения движения поездов на основе знаний об особенностях функционирования её основных элементов и устройств, а так же правил технического обслуживания и ремонта

Программа контрольно-оценочных мероприятий очная форма обучения

Наименование оценочного средства (форма проведения*)	Код индикатора достижения компетенции	Объект контроля	Наименование контрольно-оценочного мероприятия	№
4 семестр				
Раздел 1. Пассивные четырехполюсники				**1.0**
Лабораторная работа	ПК-1.1	Пассивные четырехполюсники	Текущий	1.1

(письменно/устно) Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)			контроль	
Раздел 2. Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах				**2.0**
Лабораторная работа (письменно/устно) Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)	ПК-1.1	Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах	Текущий контроль	2.1
Раздел 3. Электрические фильтры				**3.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Электрические фильтры	Текущий контроль	3.1
Раздел 4. Переходные процессы в линейных электрических цепях				**4.0**
Лабораторная работа (письменно/устно) Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)	ПК-1.1	Переходные процессы в линейных электрических цепях	Текущий контроль	4.1
Раздел 5. Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока				**5.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока	Текущий контроль	5.1
Раздел 6. Методы расчёта магнитных цепей				**6.0**
Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)	ПК-1.1	Методы расчёта магнитных цепей	Текущий контроль	6.1
Раздел 7. Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока				**7.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока	Текущий контроль	7.1
Раздел 8. Катушка с ферромагнитным сердечником				**8.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Катушка с ферромагнитным сердечником	Текущий контроль	8.1
Раздел 9. Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником				**9.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником	Текущий контроль	9.1
Раздел 10. Феррорезонанс напряжения				**10.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Феррорезонанс напряжения	Текущий контроль	10.1
Раздел 11. Феррорезонанс тока				**11.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Феррорезонанс тока	Текущий контроль	11.1
Экзамен (собеседование) Экзамен - тестирование (компьютерные технологии)	ПК-1.1	Разделы 1 - 11	Промежуточная аттестация	
5 семестр				
Раздел 12. Электрическое поле в проводящих средах				**12.0**
Лабораторная работа (письменно/устно) Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)	ПК-1.1	Электрическое поле в проводящих средах	Текущий контроль	12.1
Раздел 13. Магнитное поле постоянного тока				**13.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Магнитное поле постоянного тока	Текущий контроль	13.1
Раздел 14. Электромагнитное поле				**14.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Электромагнитное поле	Текущий контроль	14.1
Раздел 15. Плоские электромагнитные волны				**15.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Плоские электромагнитные волны	Текущий контроль	15.1
Раздел 16. Поверхностный эффект в пластине				**16.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Поверхностный эффект в пластине	Текущий контроль	16.1
Зачет (собеседование) Зачет - тестирование (компьютерные	ПК-1.1	Разделы 12 - 16	Промежуточная аттестация	

технологии)				

Программа контрольно-оценочных мероприятий заочная форма обучения

Наименование оценочного средства (форма проведения*)	Код индикатора достижения компетенции	Объект контроля	Наименование контрольно-оценочного мероприятия	№
3 курс, сессия установочная				
Раздел 1. Пассивные четырехполюсники				**1.0**
Контрольная работа (КР) (письменно) Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Пассивные четырехполюсники	Текущий контроль	1.1
Раздел 2. Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах				**2.0**
Контрольная работа (КР) (письменно)	ПК-1.1	Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах	Текущий контроль	2.1
Раздел 3. Электрические фильтры				**3.0**
Контрольная работа (КР) (письменно)	ПК-1.1	Электрические фильтры	Текущий контроль	3.1
Раздел 4. Переходные процессы в линейных электрических цепях				**4.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Переходные процессы в линейных электрических цепях	Текущий контроль	4.1
Раздел 5. Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока				**5.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока	Текущий контроль	5.1
Раздел 6. Методы расчёта магнитных цепей				**6.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Методы расчёта магнитных цепей	Текущий контроль	6.1
Раздел 7. Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока				**7.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока	Текущий контроль	7.1
Раздел 8. Катушка с ферромагнитным сердечником				**8.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Катушка с ферромагнитным сердечником	Текущий контроль	8.1
Раздел 9. Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником				**9.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником	Текущий контроль	9.1
Раздел 10. Феррорезонанс напряжения				**10.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Феррорезонанс напряжения	Текущий контроль	10.1
Раздел 11. Феррорезонанс тока				**11.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Феррорезонанс тока	Текущий контроль	11.1
3 курс, сессия зимняя				
Экзамен (собеседование) Экзамен - тестирование (компьютерные технологии)	ПК-1.1	Разделы 1 - 11	Промежуточная аттестация	
3 курс, сессия зимняя				
Раздел 12. Электрическое поле в проводящих средах				**12.0**
Контрольная работа (КР) (письменно)	ПК-1.1	Электрическое поле в проводящих средах	Текущий контроль	12.1
Раздел 13. Магнитное поле постоянного тока				**13.0**
Лабораторная работа (письменно/устно) Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Магнитное поле постоянного тока	Текущий контроль	13.1
Раздел 14. Электромагнитное поле				**14.0**

Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Электромагнитное поле	Текущий контроль	14.1
Раздел 15. Плоские электромагнитные волны				**15.0**
Проверочная работа (устно/письменно)	ПК-1.1	Плоские электромагнитные волны	Текущий контроль	15.1
Раздел 16. Поверхностный эффект в пластине				**16.0**
Лабораторная работа (письменно/устно)	ПК-1.1	Поверхностный эффект в пластине	Текущий контроль	16.1
3 курс, сессия летняя				
Зачет (собеседование) Зачет - тестирование (компьютерные технологии)	ПК-1.1	Разделы 12 - 16	Промежуточная аттестация	

*Форма проведения контрольно-оценочного мероприятия: устно, письменно, компьютерные технологии.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций. Описание шкал оценивания

Контроль качества освоения дисциплины включает в себя текущий контроль успеваемости и промежуточную аттестацию. Текущий контроль успеваемости и промежуточная аттестация обучающихся проводятся в целях установления соответствия достижений обучающихся поэтапным требованиям образовательной программы к результатам обучения и формирования компетенций.

Текущий контроль успеваемости – основной вид систематической проверки знаний, умений, навыков обучающихся. Задача текущего контроля – оперативное и регулярное управление учебной деятельностью обучающихся на основе обратной связи и корректировки. Результаты оценивания учитываются в виде средней оценки при проведении промежуточной аттестации.

Для оценивания результатов обучения используется четырехбалльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» и двухбалльная шкала: «зачтено», «не зачтено».

Перечень оценочных средств, используемых для оценивания компетенций, а также краткая характеристика этих средств приведены в таблице.

Текущийконтроль

Представление оценочного средства в ФОС	Краткая характеристика оценочного средства	Наименование оценочного средства	№
Типовое задание для выполнения расчетно-графической работы по разделам/темам дисциплины	Средство для проверки умений применять полученные знания по заранее определенной методике для решения задач или заданий по разделу дисциплины. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Расчетно-графическая работа (РГР) (письменно)	1
Типовое задание для выполнения контрольной работы по разделам/темам дисциплины	Средство для проверки умений применять полученные знания по заранее определенной методике для решения задач или заданий по разделу дисциплины. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Контрольная работа (КР)	2
Образец задания для выполнения лабораторной работы и примерный перечень вопросов для ее	Средство, позволяющее оценить умение обучающегося письменно/устно излагать суть поставленной задачи, самостоятельно применять стандартные методы решения поставленной задачи с использованием имеющейся лабораторной базы, проводить анализ полученного результата работы. Может быть использовано для оценки умений, навыков	Лабораторная работа	3

защиты	и (или) опыта деятельности обучающихся		
Комплекты заданий для выполнения проверочных работ по темам дисциплины	Средство проверки умений применять полученные знания для выполнения заданий определенного типа по теме или разделу. Может быть использовано для оценки знаний и умений обучающихся.	Проверочная работа	4

Промежуточная аттестация

Представление оценочного средства в ФОС	Краткая характеристика оценочного средства	Наименование оценочного средства	№
Перечень теоретических вопросов и практических заданий к зачету	Средство, позволяющее оценить знания, умения, навыков и (или) опыта деятельности обучающегося по дисциплине. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Зачет	1
Фонд тестовых заданий	Система автоматизированного контроля освоения компетенций (части компетенций) обучающимся по дисциплине (модулю) с использованием информационно-коммуникационных технологий. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Тест – промежуточная аттестация в форме зачета	2
Перечень теоретических вопросов и практических заданий (образец экзаменационного билета) к экзамену	Средство, позволяющее оценить знания, умения, навыков и (или) опыта деятельности обучающегося по дисциплине. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Экзамен	3
Фонд тестовых заданий	Система автоматизированного контроля освоения компетенций (части компетенций) обучающимся по дисциплине (модулю) с использованием информационно-коммуникационных технологий. Может быть использовано для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности обучающихся	Тест – промежуточная аттестация в форме экзамена	4

Критерии и шкалы оценивания компетенций в результате изучения дисциплины при проведении промежуточной аттестации в форме зачета и экзамена. Шкала оценивания уровня освоения компетенций

Шкалы оценивания		Критерии оценивания	Уровень освоения компетенции
«отлично»	«зачтено»	Обучающийся правильно ответил на теоретические вопросы. Показал отличные знания в рамках учебного материала. Правильно выполнил практические задания. Показал отличные умения и владения навыками применения полученных знаний и умений при решении задач в рамках учебного материала. Ответил на все дополнительные вопросы	Высокий
«хорошо»		Обучающийся с небольшими неточностями ответил на теоретические вопросы. Показал хорошие знания в рамках учебного материала. С небольшими неточностями выполнил практические задания. Показал хорошие умения и владения навыками применения полученных знаний и умений при решении задач в рамках учебного материала. Ответил на большинство дополнительных вопросов	Базовый

«удовлетворительно»		Обучающийся с существенными неточностями ответил на теоретические вопросы. Показал удовлетворительные знания в рамках учебного материала. С существенными неточностями выполнил практические задания. Показал удовлетворительные умения и владения навыками применения полученных знаний и умений при решении задач в рамках учебного материала. Допустил много неточностей при ответе на дополнительные вопросы	Минимальный
«неудовлетворительно»	«не зачтено»	Обучающийся при ответе на теоретические вопросы и при выполнении практических заданий продемонстрировал недостаточный уровень знаний и умений при решении задач в рамках учебного материала. При ответах на дополнительные вопросы было допущено множество неправильных ответов	Компетенция не сформирована

Тест – промежуточная аттестация в форме зачета и экзамена

Шкала оценивания		Критерии оценивания
«отлично»	«зачтено»	Обучающийся верно ответил на 90 – 100 % тестовых заданий при прохождении тестирования
«хорошо»		Обучающийся верно ответил на 80 – 89 % тестовых заданий при прохождении тестирования
«удовлетворительно»		Обучающийся верно ответил на 70 – 79 % тестовых заданий при прохождении тестирования
«неудовлетворительно»	«не зачтено»	Обучающийся верно ответил на 69 % и менее тестовых заданий при прохождении тестирования

Критерии и шкалы оценивания результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости

Расчетно-графическая работа (РГР)

Шкалы оценивания		Критерии оценивания
«отлично»	«зачтено»	Обучающийся полностью и правильно выполнил задание РГР. Показал отличные знания, умения и владения навыками применения их при решении задач в рамках усвоенного учебного материала. РГР оформлена аккуратно и в соответствии с предъявляемыми требованиями
«хорошо»		Обучающийся выполнил задание РГР с небольшими неточностями. Показал хорошие знания, умения и владения навыками применения их при решении задач в рамках усвоенного учебного материала. Есть недостатки в оформлении РГР
«удовлетворительно»		Обучающийся выполнил задание РГР с существенными неточностями. Показал удовлетворительные знания, умения и владения навыками применения их при решении задач в рамках усвоенного учебного материала. Качество оформления РГР имеет недостаточный уровень
«неудовлетворительно»	«не зачтено»	При выполнении РГР обучающийся продемонстрировал недостаточный уровень знаний, умений и владения ими при решении задач в рамках усвоенного учебного материала

Контрольная работа

Шкалы оценивания		Критерии оценивания
«отлично»	«зачтено»	Обучающийся полностью и правильно выполнил задание контрольной работы. Показал отличные знания и умения в рамках усвоенного учебного материала. Контрольная работа оформлена аккуратно и в соответствии с предъявляемыми

		требованиями
«хорошо»		Обучающийся выполнил задание контрольной работы с небольшими неточностями. Показал хорошие знания и умения в рамках усвоенного учебного материала. Есть недостатки в оформлении контрольной работы
«удовлетворительно»		Обучающийся выполнил задание контрольной работы с существенными неточностями. Показал удовлетворительные знания и умения в рамках усвоенного учебного материала. Качество оформления контрольной работы имеет недостаточный уровень
«неудовлетворительно»	«не зачтено»	Обучающийся не полностью выполнил задания контрольной работы, при этом проявил недостаточный уровень знаний и умений

Лабораторная работа

Шкалы оценивания		Критерии оценивания
«отлично»	«зачтено»	Лабораторная работа выполнена в обозначенный преподавателем срок, письменный отчет без замечаний. Лабораторная работа выполнена обучающимся в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности. Обучающийся работал полностью самостоятельно; показал необходимые для проведения работы теоретические знания, практические умения и навыки. Работа (отчет) оформлена аккуратно, в наиболее оптимальной для фиксации результатов форме
«хорошо»		Лабораторная работа выполнена в обозначенный преподавателем срок, письменный отчет с небольшими недочетами. Лабораторная работа выполнена обучающимся в полном объеме и самостоятельно. Допущены отклонения от необходимой последовательности выполнения, не влияющие на правильность конечного результата. Работа показывает знание обучающимся основного теоретического материала и овладение умениями, необходимыми для самостоятельного выполнения работы. Допущены неточности и небрежность в оформлении результатов работы (отчета)
«удовлетворительно»		Лабораторная работа выполнена с задержкой, письменный отчет с недочетами. Лабораторная работа выполняется и оформляется обучающимся при посторонней помощи. На выполнение работы затрачивается много времени. Обучающийся показывает знания теоретического материала, но испытывает затруднение при самостоятельной работе с источниками знаний или приборами
«неудовлетворительно»	«не зачтено»	Лабораторная работа не выполнена, письменный отчет не представлен. Результаты, полученные обучающимся, не позволяют сделать правильных выводов и полностью расходятся с поставленной целью. Показывается плохое знание теоретического материала и отсутствие необходимых умений. Лабораторная работа не выполнена, у учащегося отсутствуют необходимые для проведения работы теоретические знания, практические умения и навыки

Проверочная работа

Шкала оценивания	Критерий оценки
«зачтено»	Обучающийся правильно или с небольшими неточностями выполнил задания проверочной работы
«не зачтено»	Обучающийся неправильно или с существенными неточностями выполнил задания проверочной работы

3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

3.1Типовые контрольные задания для выполнения расчетно-графических работ

Контрольные варианты заданий выложены в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет.

Ниже приведен образец типовых вариантов заданий для выполнения расчетно-графических работ.

Задачи приведены в учебном пособии «Сборник заданий и рекомендаций для выполнения расчётно-графических и контрольных работ».

Приведены 7 задач при ста вариантов заданий в каждой для выполнения расчётно-графических работ студентами очного обучений, а также краткий порядок решения задач.

Образец типового варианта расчетно-графической работы
«Пассивные четырехполюсники»
Образец типового варианта расчетно-графической работы
«Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах»

Задача №4. Расчёт линейного пассивного четырёхполюсника
при подаче на его вход несинусоидального периодического напряжения

Задание задачи рассчитано на освоение студентами метода расчёта линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах [1-6].

Постановка задачи

Заданы электрические схемы **Т**- и **П**-образных симметричных четырёхполюсников, рис. 4.1. Входное напряжение $\mathbf{u_1(t)}$ изменяется по несинусоидальному периодическому закону, график которого представлен на рис. 4.2. Четырёхполюсники нагружены на активное сопротивление нагрузки $\mathbf{R_н}$. Числовые значения напряжений $\mathbf{U_m}$, величины сопротивлений при частоте основной гармоники приведены в таблице 4.

Требуется:

1. Используя табличное разложение несинусоидальных периодических сигналов, разложить в ряд Фурье заданное входное напряжение, ограничившись определением первых трёх гармоник (членов ряда) плюс постоянная составляющая, если присутствует на заданном графике. Написать закон изменения мгновенного значения напряжения $\mathbf{u_1(t)}$ и определить его действующее значение $\mathbf{U_1}$.
2. Используя теорию четырёхполюсников, выразить в комплексной форме записи для **k**-ой гармоники зависимость комплексной амплитуды выходного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{2mk}}$ от комплексной амплитуды входного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{1mk}}$.
3. Определить коэффициенты заданного четырёхполюсника $\mathbf{A_k}$ и $\mathbf{B_k}$ для соответствующих гармоник входного напряжения, найти для каждой гармоники комплексную амплитуду выходного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{2mk}}$ по формуле пункта 2.
4. Написать закон изменения мгновенного значения напряжения $\mathbf{u_2(t)}$ и определить его действующее значение $\mathbf{U_2}$.
5. На одном рисунке в одном масштабе построить графики линейчатых спектров входного и выходного напряжений (постоянные составляющие на графике не показывать).
6. Определить коэффициенты гармоник, амплитуды и искажения для входного и выходного напряжений.
7. На основании п. 5 и п. 6 сделать вывод о фильтрующих свойствах заданной схемы четырёхполюсника.

8. С помощью компьютера или вручную построить графики входного $\mathbf{u_1(t)}$ и выходного $\mathbf{u_2(t)}$ напряжений. На графиках показать первые три гармоники и суммарную кривую, полученную в результате графического сложения отдельных гармоник.

Порядок расчёта

Краткие пояснения к расчётам. Нумерация пунктов приведена в соответствии с 4.1. Нарисовать расчётную схему четырёхполюсника с подключенной нагрузкой $\mathbf{R_н}$.

1. По графику входного напряжения подобрать в справочнике или в приложении учебной литературы типовое разложение в ряд Фурье [1], которое использовать для написания закона изменения входного напряжения $\mathbf{u_1(t)}$.

2. Записать в комплексной форме уравнения четырёхполюсника в виде «**A**» при прямом включении для **k**-ой гармоники:

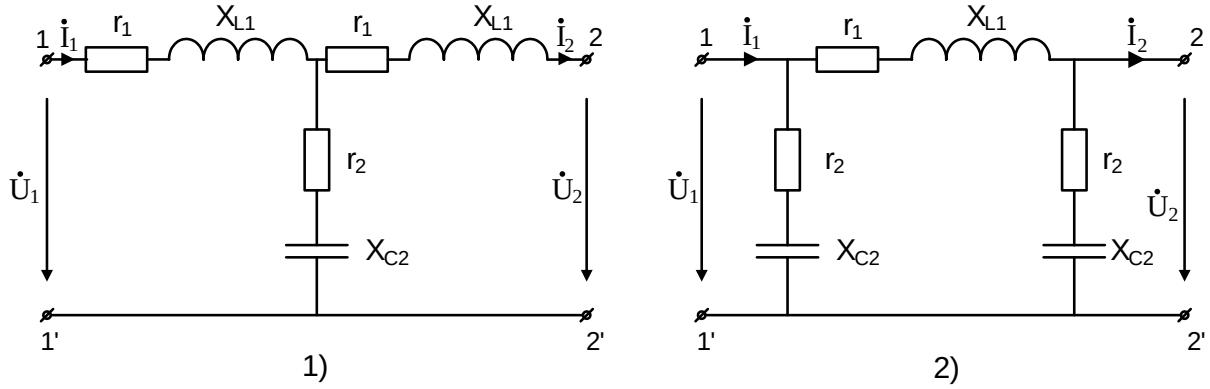
$$\mathbf{U_{1mk} = A_k U_{2mk} + B_k I_{2mk};}$$
$$\mathbf{I_{1mk} = C_k U_{2mk} + D_k I_{2mk}.}$$

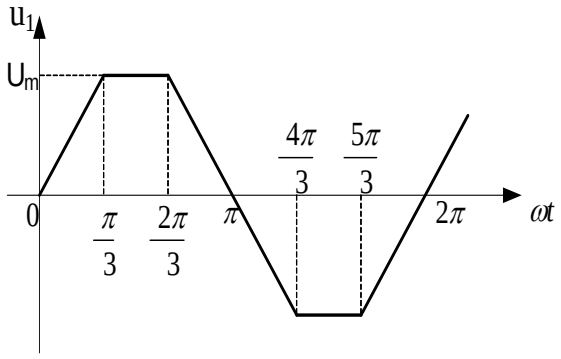
В первом уравнении сделать подстановку $\mathbf{I_{2mk} = U_{2mk} / R_н}$ и определить требуемую зависимость.

3. В приложении учебной литературы [1-5] для **Т**- или **П**-образного симметричного четырёхполюсника найти требуемые зависимости коэффициентов четырёхполюсника от первичных параметров заданной схемы. Записать формулы определения коэффициентов в общем виде для **k**-ой гармоники.

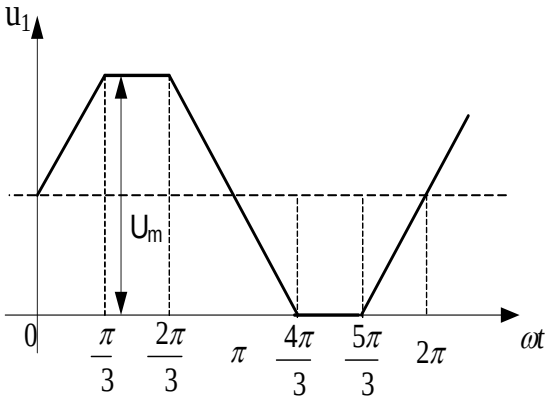
4. По найденным комплексным амплитудам выходного напряжения записать закон изменения выходного напряжения в виде ряда Фурье $\mathbf{u_2(t)}$, как сумму гармоник плюс постоянная составляющая, если присутствует.

К пунктам 5-8 особых пояснений нет.





а)



б)

№ варианта	№ варианта схемы на рис. 4.1	Вариант графика **u1(t)** на рис.4.2	**Um**	**r1**	**r2**	**XL1**	**XC2**	**rн**
-	-	-	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	1	а	60	20	15	9	25	10

Образец типового варианта расчетно-графической работы
«Переходные процессы в линейных электрических цепях»

Задача №6. Расчёт переходного процесса
в линейной электрической цепи постоянного тока

Задание задачи рассчитано на освоение студентами основных методов расчёта переходных процессов в линейных электрических цепях.

Постановка задачи

На рисунке 6 представлены десять вариантов схем линейных электрических цепей постоянного тока, в которых происходит замыкание или размыкание ключа (коммутация). Числовые данные для схем приведены в таблице 6. Необходимо определить переходные токи или переходное падение напряжения на ёмкости в зависимости от варианта, см. последний столбец таблицы 6.

Требуется:

Рассчитать переходный процесс с помощью:

1. Классического метода расчёта.
2. Операторного метода расчёта.
3. Построить график переходного процесса.
4. Осуществить моделирование переходного процесса.

Порядок расчёта

1. Классический метод расчёта:
   - для после коммутационной схемы по законам Кирхгофа составить систему уравнений для мгновенных значений токов и напряжений;
   - найти принуждённое значение тока или падения напряжения;
   - по методу входного сопротивления составить характеристическое уравнение и найти его корни;

- по виду корней характеристического уравнения определить вид свободной составляющей тока или падения напряжения;
- записать общее решение в виде суммы принуждённой и свободной составляющих тока или падения напряжения;
- определить постоянные интегрирования, используя независимые и зависимые начальные условия;
- записать общее решение, подставив в него найденные постоянные интегрирования.

2. Операторный метод расчёта:
   - составить операторную схему замещения;
   - используя любой из методов расчёта установившихся режимов в линейных электрических цепях, найти требуемое изображение тока или падения напряжения;
   - по формуле разложения найти оригинал тока или падения напряжения.
3. Построение графика переходного процесса:
   - определить постоянные времени переходного процесса;
   - определить время переходного процесса, используя постоянные времени переходного процесса;
   - нарисовать результирующий график как сумму графика принуждённой составляющей и графика (-ов) свободной составляющей тока или падения напряжения.
4. Моделирование в среде Electronicsworkbench:
   - собрать исходную схему; подключить осциллограф для регистрации требуемого переходного процесса;
   - определить масштаб по оси времени осциллографа таким образом, чтобы на экране поместилось примерно двойное время переходного процесса; согласно графику пункта 3 выбрать масштаб по оси ординат на экране осциллографа;
   - получить до коммутационный установившийся режим, для этого нажать на экране клавишу «Пуск» и дождаться установившегося режима; затем сделать коммутацию (замкнуть или разомкнуть ключ) и получить переходный процесс; после получения установившегося режима остановить процесс; сохранить график переходного процесса. График переходного процесса, полученный путём моделирования, должен совпадать с графиком переходного процесса построенного в п. 3.

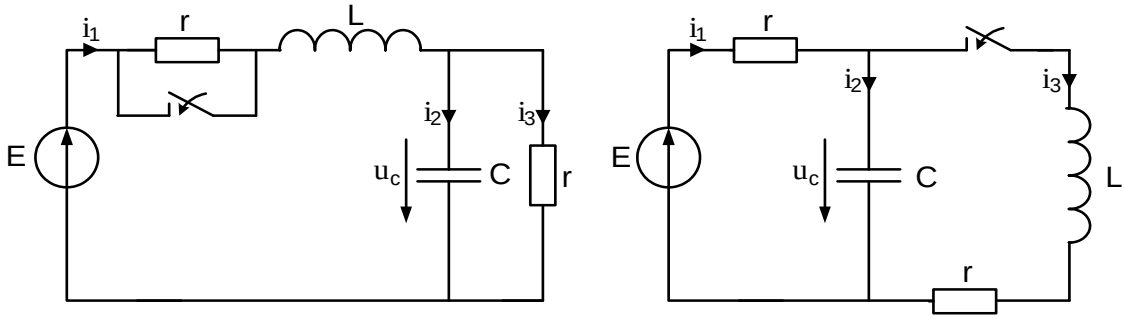


Таблица 6

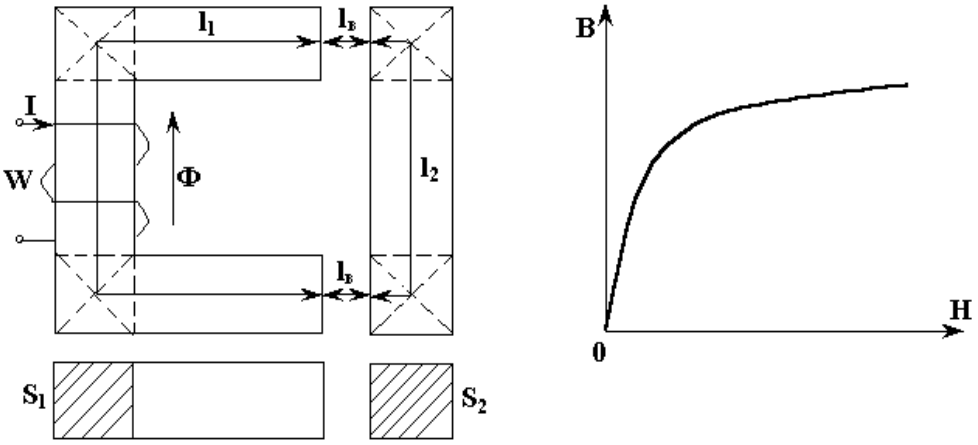
№ варианта	№ варианта схемы на рис. 6	**r**	**L**	**C**	**E**	Определить закон изменения

-	-	Ом	Гн	мкФ	В	-
1	1	10	0,1	100	100	$u_c(t)$
2	2	8	0,02	31,3	150	$i_1(t)$

Образец типового варианта расчетно-графической работы
«Методы расчёта магнитных цепей»

Задана магнитная цепь с катушкой (рис. 4.1 *а*). По конструктивным размерам магнитопровода найдены средние длины участков магнитопровода l_1 и l_2 , длина воздушного зазора $l_в$ ($l_в << l_1, l_2$), сечения участков магнитопровода S_1 и S_2, задано число витков катушки w, основная кривая намагничивания B(H) (рис. 4.1 *б*).

Требуется: а) по заданному магнитному потоку $Ф_0$ найти ток намагничивания I_0 (прямая задача); б) по заданному значению тока намагничивания I_0 найти магнитный поток $Ф_0$ (обратная задача).



а) б)

Рис. 4.1. Магнитная цепь с катушкой (а) и основная кривая намагничивания (б)

Решение. Общая часть для прямой и обратной задач.

1. По исходной схеме магнитопровода рис. 4.1*а* нарисуем схему замещения (рис. 4.2).

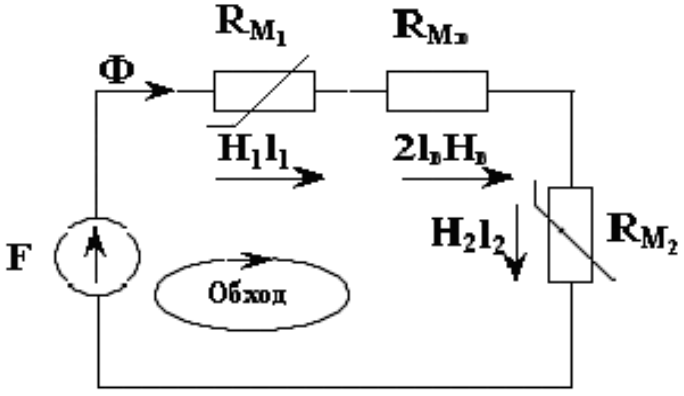


Рис. 4.2. Схема замещения магнитной цепи

2. Используя схему замещения (рис. 4.2), составим уравнение по второму закону Кирхгофа (см. формулу 4.2)

$$H_1 l_1 + 2H_в l_в + H_2 l_2 = F, \qquad (4.4)$$

где $F=wi$ – магнитодвижущая сила.

Решение прямой задачи ($Ф$ F)→

По заданному значению магнитного потока $\Phi = \Phi_0$, найдем индукцию и напряженность на трех участках магнитопровода по следующему алгоритму:

$$\begin{array}{l} \Phi \longrightarrow B_1 = \dfrac{\Phi}{S_1} \longrightarrow B(H) \longrightarrow H_1; \\ \longrightarrow B_2 = \dfrac{\Phi}{S_2} \longrightarrow B(H) \longrightarrow H_2; \\ \longrightarrow B_B = \dfrac{\Phi}{S_B} \longrightarrow H_B = \dfrac{B_B}{\mu_0}, \end{array} \qquad (4.5)$$

где $S_в = S_1$ – сечение воздушного зазора принимается равным $\mathbf{S_1}$;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума, принимаем за проницаемость воздуха.

Найденные значения напряженности H_1, H_2 и $H_в$ подставим в уравнение (4.4), из которого находим магнитодвижущую силу

$$F = H_1 l_1 + 2H_в l_в + H_2 l_2$$

Для графического решения нелинейного уравнения (4.4) при заданмагнитодвижущей силе $F = F_0 = I_0 w$ построим зависимость $\Phi(F)$, где ной магнитодвижущую силу определим по уравнению (4.4) как сумму падений магнитных напряжений

$$F = H_1 l_1 + 2H_в l_в + H_2 l_2$$

при задаваемых значениях магнитного потока Ф. Затем по известной магнитодвижущей силе F_0 определим значение потока, рис. 4.3:

$$F_0 \longrightarrow \Phi(F) \longrightarrow \Phi_0.$$

Вычисления, связанные с построением зависимости $\Phi(F)$, можно оформить в виде табл. 4.1.

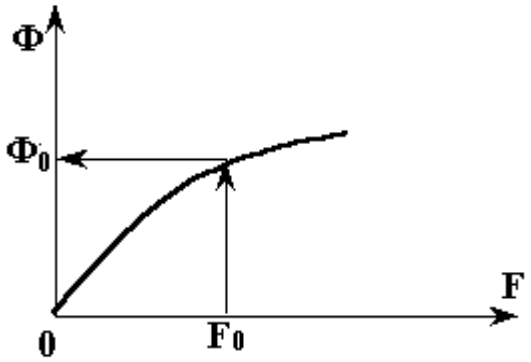


Рис. 4.3. По магнитодвижущей силе определение значения потока

В первые два столбца табл. 4.1 впишем данные основной кривой намагничивания $B(H)$ (рис. 4.1 *а*). При этом примем $B_1 = B$, $H_1 = H$. Затем реализуем алгоритм вычисления требуемых величин:

$$\begin{array}{l} B_1 \longrightarrow \Phi = B_1 S_1 \longrightarrow B_2 = \dfrac{\Phi}{S_2} \longrightarrow B(H) \longrightarrow H_2 \longrightarrow H_2 l_2; \\ \longrightarrow H_1 \longrightarrow H_1 l_1; \\ \longrightarrow B_в = B_1 \longrightarrow H_в = \dfrac{B_в}{\mu_0} \longrightarrow 2H_в l_в; \end{array}$$

$$F = H_1 l_1 + 2H_в l_в + H_2 l_2 .$$

Указанный алгоритм реализуем до тех пор, пока вычисленное значение F не будет превышать заданного значения F_0.

Отметим, что процедура решения может быть реализована с помощью, например, электронных таблиц Excel.

Образец типового варианта расчетно-графической работы
«Электрическое поле в проводящих средах»

Образец типового варианта контрольной работы
«Электрическое поле в проводящих средах»

«Расчет электрического поля и основных параметров цилиндрического заземлителя»

ЗАДАНИЕ 1

Принимая, что цилиндрический заземлитель находится в глине, определить:

1) плотность тока на расстоянии x_1 от оси заземлителя;
2) модуль напряженности электрического поля на расстоянии x_1 от оси заземлителя;
3) значения разности потенциалов между точками x_1 и x_2, а также между точками x_2 и x_3;
4) сопротивление заземления;
5) шаговое напряжение в точках x_1, x_2 и x_3;
6) опасную зону, то есть радиус круга $x^{|}$, принимая, что длина шага $L_ш$=0,8 м, а напряжение на границе этой зоны не превышает $U^{|}$=150 В.

ЗАДАНИЕ 2

Принимая в формуле (7) значение постоянной интегрирования $C = \frac{I}{2\pi\gamma\ell}\ell n x_0$,

начертить график зависимости $\varphi=\varphi(x)$ при $x_0<x<15$м.

ЗАДАНИЕ 3

Оценить необходимое число соединенных параллельно цилиндрических заземлителей, чтобы радиус опасной зоны вокруг каждого из них не превышал 1 м. Принять, что сила тока i, протекающего через всю систему заземлителей, равна силе тока, протекающего через один заземлитель в предыдущих заданиях.

Численные значения величин приведены в таблице 2. По последней цифре номера зачетной книжки студента выбираются значения x_0, ℓ, I. По предпоследней цифре – значения x_1, x_2, x_3.

3.2 Типовые контрольные задания для выполнения контрольных работ

Контрольные варианты заданий выложены в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет.

Ниже приведен образец типовых вариантов заданий для выполнения контрольных работ.

Задачи приведены в учебном пособии «Сборник заданий и рекомендаций для выполнения расчётно-графических и контрольных работ».

Приведены 7 задач со ста вариантами заданий в каждой для выполнения контрольных работ студентами очного и заочного обучений, а также краткий порядок решения задач.

Образец типового варианта контрольной работы
«Пассивные четырехполюсники»
«Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах»
«Электрические фильтры»

Задача №4. Расчёт линейного пассивного четырёхполюсника
при подаче на его вход несинусоидального периодического напряжения

Задание задачи рассчитано на освоение студентами метода расчёта линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах [1-6].

Постановка задачи

Заданы электрические схемы **Т**- и **П**-образных симметричных четырёхполюсников, рис. 4.1. Входное напряжение $\mathbf{u_1(t)}$ изменяется по несинусоидальному периодическому закону, график которого представлен на рис. 4.2. Четырёхполюсники нагружены на активное сопротивление нагрузки $\mathbf{R_н}$. Числовые значения напряжений $\mathbf{U_m}$, величины сопротивлений при частоте основной гармоники приведены в таблице 4.

Требуется:

1. Используя табличное разложение несинусоидальных периодических сигналов, разложить в ряд Фурье заданное входное напряжение, ограничившись определением первых трёх гармоник (членов ряда) плюс постоянная составляющая, если присутствует на заданном графике. Написать закон изменения мгновенного значения напряжения $\mathbf{u_1(t)}$ и определить его действующее значение $\mathbf{U_1}$.
2. Используя теорию четырёхполюсников, выразить в комплексной форме записи для **k**-ой гармоники зависимость комплексной амплитуды выходного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{2mk}}$ от комплексной амплитуды входного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{1mk}}$.
3. Определить коэффициенты заданного четырёхполюсника $\mathbf{A_k}$ и $\mathbf{B_k}$ для соответствующих гармоник входного напряжения, найти для каждой гармоники комплексную амплитуду выходного напряжения $\mathbf{\mathring{U}_{2mk}}$ по формуле пункта 2.
4. Написать закон изменения мгновенного значения напряжения $\mathbf{u_2(t)}$ и определить его действующее значение $\mathbf{U_2}$.
5. На одном рисунке в одном масштабе построить графики линейчатых спектров входного и выходного напряжений (постоянные составляющие на графике не показывать).
6. Определить коэффициенты гармоник, амплитуды и искажения для входного и выходного напряжений.
7. На основании п. 5 и п. 6 сделать вывод о фильтрующих свойствах заданной схемы четырёхполюсника.
8. С помощью компьютера или вручную построить графики входного $\mathbf{u_1(t)}$ и выходного $\mathbf{u_2(t)}$ напряжений. На графиках показать первые три гармоники и суммарную кривую, полученную в результате графического сложения отдельных гармоник.

Порядок расчёта

Краткие пояснения к расчётам. Нумерация пунктов приведена в соответствии с 4.1.

1. Нарисовать расчётную схему четырёхполюсника с подключенной нагрузкой $\mathbf{R_н}$.
2. По графику входного напряжения подобрать в справочнике или в приложении учебной литературы типовое разложение в ряд Фурье [1], которое использовать для написания закона изменения входного напряжения $\mathbf{u_1(t)}$.
3. Записать в комплексной форме уравнения четырёхполюсника в виде «**A**» при прямом включении для **k**-ой гармоники:

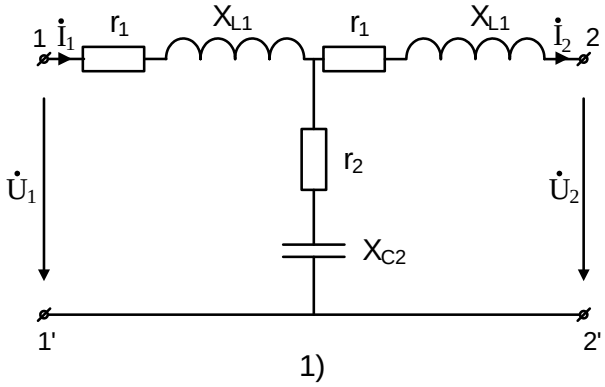
$$\mathbf{U_{1mk} = A_k U_{2mk} + B_k I_{2mk};}$$
$$\mathbf{I_{1mk} = C_k U_{2mk} + D_k I_{2mk}.}$$

В первом уравнении сделать подстановку $\mathbf{I_{2mk} = U_{2mk} / R_н}$ и определить требуемую зависимость.

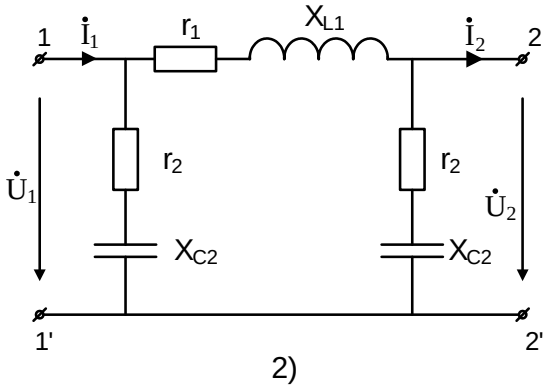
4. В приложении учебной литературы [1-5] для **Т**- или **П**-образного симметричного четырёхполюсника найти требуемые зависимости коэффициентов четырёхполюсника от первичных параметров заданной схемы. Записать формулы определения коэффициентов в общем виде для **k**-ой гармоники.

5. По найденным комплексным амплитудам выходного напряжения записать закон изменения выходного напряжения в виде ряда Фурье **$u_2(t)$**, как сумму гармоник плюс постоянная составляющая, если присутствует.

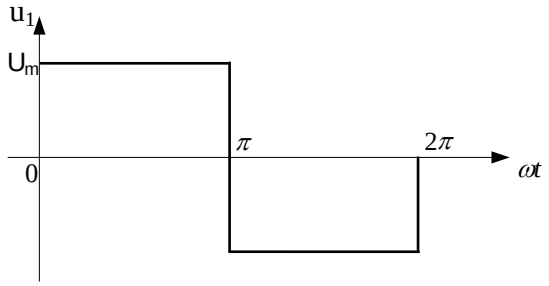
К пунктам 5-8 особых пояснений нет.



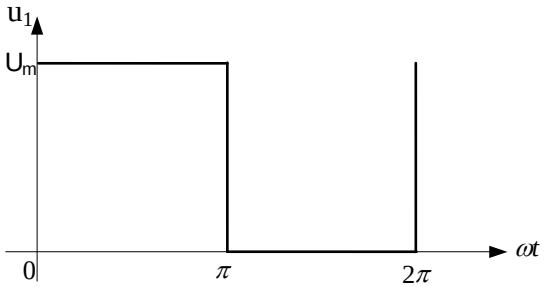
1)



2)



д)



е)

Таблица 4

№ вариант а	№ вариант а схемы на рис. 4.1	Вариант графика **$u_1(t)$** на рис.4.2	**U_m**	**r_1**	**r_2**	**X_{L1}**	**X_{C2}**	**$r_н$**
-	-	-	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	1	а	60	20	15	9	25	10

Образец типового варианта контрольной работы
«Электрическое поле в проводящих средах»

«Расчет электрического поля и основных параметров цилиндрического заземлителя»

ЗАДАНИЕ 1

Принимая, что цилиндрический заземлитель находится в глине, определить:

1) плотность тока на расстоянии x_1 от оси заземлителя;
2) модуль напряженности электрического поля на расстоянии x_1 от оси заземлителя;
3) значения разности потенциалов между точками x_1 и x_2, а также между точками x_2 и x_3;
4) сопротивление заземления;
5) шаговое напряжение в точках x_1, x_2 и x_3;
6) опасную зону, то есть радиус круга $x^{|}$, принимая, что длина шага $L_ш$=0,8 м, а напряжение на границе этой зоны не превышает $U^{|}$=150 В.

ЗАДАНИЕ 2

Принимая в формуле (7) значение постоянной интегрирования $C = \frac{I}{2\pi\gamma\ell}\ell n x_0$,

начертить график зависимости $\varphi=\varphi(x)$ при $x_0<x<15$м.

ЗАДАНИЕ 3

Оценить необходимое число соединенных параллельно цилиндрических заземлителей, чтобы радиус опасной зоны вокруг каждого из них не превышал 1 м. Принять, что сила тока i, протекающего через всю систему заземлителей, равна силе тока, протекающего через один заземлитель в предыдущих заданиях.

Численные значения величин приведены в таблице 2. По последней цифре номера зачетной книжки студента выбираются значения x_0, ℓ, I. По предпоследней цифре – значения x_1, x_2, x_3.

Таблица 2.

Предлагаемые значения величин при выполнении расчетной работы

Номер вариан-та	x_0, м	ℓ, м	I, А	x_1, м	x_2, м	x_3, м
1	0,010	2,50	1000	0,10	0,50	10,00
2	0,011	2,51	1010	0,11	0,51	10,01
3	0,012	2,52	1020	0,12	0,52	10,02
4	0,013	2,53	1030	0,13	0,53	10,03
5	0,014	2,54	1040	0,14	0,54	10,04
6	0,015	2,55	1050	0,15	0,55	10,05
7	0,016	2,56	1060	0,16	0,56	10,06
8	0,017	2,57	1070	0,17	0,57	10,07
9	0,018	2,58	1080	0,18	0,58	10,08
0	0,019	2,59	1090	0,19	0,59	10,09

3.3 Типовые задания для выполнения лабораторной работы и примерный перечень вопросов для ее защиты

Контрольные варианты заданий выложены в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет.

Ниже приведен образец типовых вариантов заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты.

Сборник включает в себя 18 лабораторных работ «Теоретические основы электротехники: учебное пособие для лабораторных занятий»

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Пассивные четырехполюсники»

Компьютерное моделирование

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 9.7 или открыть файл lab9_toe.ms10.

2. Установить величину входного напряжения из таблицы 9.1 (вариант указывает преподаватель), в дальнейших опытах напряжение на входе оставлять неизменным.

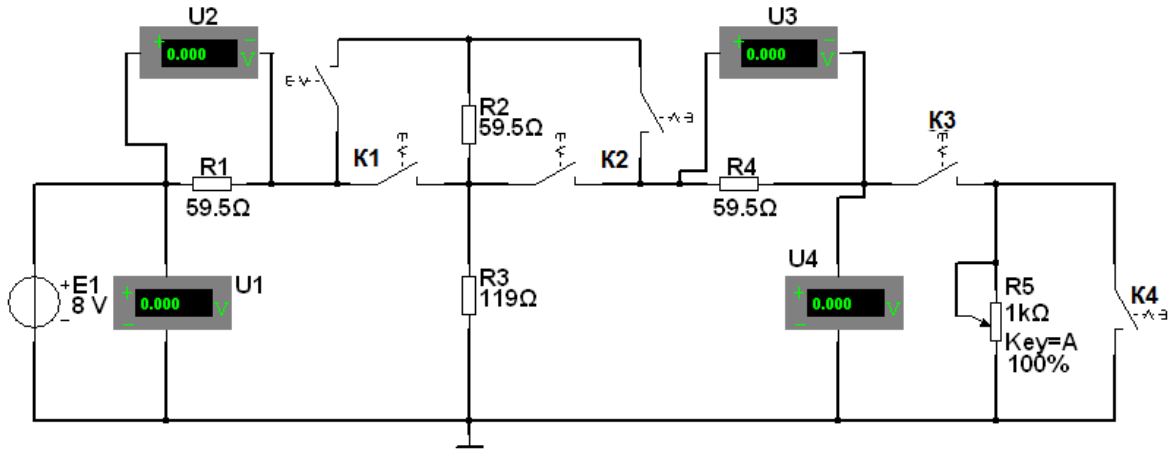


Рис. 9.7. Схема исследуемой цепи

3. Провести ***опыт короткого замыкания (к.з.) при прямом включении*** четырехполюсника, для этого в соответствии с таблицей 9.2 замкнуть ключи, схема примет вид (рис. 9.5); показания приборов занести в таблицу 9.6, аналогичную таблице 9.4.

4. Провести ***опыт холостого хода (х.х.)***, для этого замкнуть ключи в соответствии с таблицей 9.1; показания приборов занести в таблицу 9.6.

5. Провести ***нагрузочный режим*** при трех различных значениях $\mathbf{R_5}$, при этом замкнуть ключи в соответствии с таблицей 9.1; показания приборов занести в соответствующие графы таблицы 9.6.

6. Проделать ***опыты холостого хода и короткого замыкания при обратном включении***, для этого замкнуть ключи в соответствии с таблицей 9.2, показания приборов занести в таблицу 9.7, аналогичную таблице 9.5.

Обработка результатов измерений

1. Определить требуемые величины по формулам:

– токи в ветвях: $\mathbf{I}_1 = \dfrac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{R}_1}$; $\mathbf{I}_2 = \dfrac{\mathbf{U}_3}{\mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_4}$ – прямое включение; $\mathbf{I}'_1 = \dfrac{\mathbf{U}'_2}{\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2}$;

$\mathbf{I}'_2 = \dfrac{\mathbf{U}'_3}{\mathbf{R}_4}$ – обратное включение;

– мощность: $\mathbf{P}_1 = \mathbf{U}_1\mathbf{I}_1$, $\mathbf{P}_2 = \mathbf{U}_4\mathbf{I}_2$;

– КПД: $\eta = \dfrac{\mathbf{P}_2}{\mathbf{P}_1}$;

– входные сопротивления: $\mathbf{r}_{10} = \frac{\mathbf{U}_{10}}{\mathbf{I}_{10}}$; $\mathbf{r}_{1k} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\mathbf{I}_{1k}}$ – прямое включение; $\mathbf{r}_{20} = \frac{\mathbf{U}'_{10}}{\mathbf{I}'_{10}}$; $\mathbf{r}_{2k} = \frac{\mathbf{U}'_{1k}}{\mathbf{I}'_{1k}}$ – обратное включение;

– коэффициенты четырехполюсника: $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{U}_{10}}{\mathbf{U}_{40}}$; $\mathbf{B} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\mathbf{I}_{2k}}$; $\mathbf{C} = \frac{\mathbf{I}_{10}}{\mathbf{U}_{40}}$; $\mathbf{D} = \frac{\mathbf{I}_{1k}}{\mathbf{I}_{2k}}$ – прямое включение; $\mathbf{A}' = \frac{\mathbf{I}'_{1k}}{\mathbf{I}'_{2k}}$; $\mathbf{B}' = \frac{\mathbf{U}'_{1k}}{\mathbf{I}'_{2k}}$; $\mathbf{C}' = \frac{\mathbf{I}'_{10}}{\mathbf{U}'_{40}}$; $\mathbf{D}' = \frac{\mathbf{U}'_{10}}{\mathbf{U}'_{40}}$ – обратное включение.

2. Проверить результаты измерений, для чего сравнить значения коэффициентов **A**, **B**, **C** и **D** таблиц 9.4 (9.6) и 9.5 (9.7), значения соответствующих коэффициентов должны совпадать, кроме того, должно соблюдаться соотношение

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{D} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} = 1.$$

3. По таблице 9.4 построить графики и сделать их анализ $\mathbf{I_1(I_2)}$, $\mathbf{U_2(I_2)}$, $\mathbf{P_1(I_2)}$, $\mathbf{P_2(I_2)}$ и $\boldsymbol{\eta}\mathbf{(I_2)}$.

Дополнительное задание

1. Определить собственные параметры схем замещения четырех-полюсника через коэффициенты четырехполюсника в **A**-форме:

T-образная схема замещения:

$$\mathbf{R_1} = \frac{\mathbf{A}-\mathbf{1}}{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{R_2} = \frac{\mathbf{D}-\mathbf{1}}{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{R_3} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{C}}, \text{ Ом.}$$

2. Определить параметры холостого хода и короткого замыкания ($\mathbf{R_{10}}$, $\mathbf{R_{1k}}$, $\mathbf{R_{20}}$, $\mathbf{R_{2k}}$) исследуемого четырехполюсника через коэффициенты четырехполюсника в A-форме:

$$\mathbf{r_{10}} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{r_{1k}} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{D}}, \quad \mathbf{r_{20}} = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{C}}, \quad \mathbf{r_{2k}} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}, \text{ Ом.}$$

Результаты расчетов собственных параметров схемы замещения четырехполюсника и параметров холостого хода и короткого замыкания ($\mathbf{R_{10}}$, $\mathbf{R_{1k}}$, $\mathbf{R_{20}}$, $\mathbf{R_{2k}}$) данного четырехполюсника занести в таблицу 9.6.

Таблица 9.6

Схема	Собственные значения схемы замещения			Параметры КЗ и ХХ при прямом включении	
	$\mathbf{R_1}$, Ом	$\mathbf{R_2}$, Ом	$\mathbf{R_3}$, Ом	$\mathbf{R_{10}}$, Ом	$\mathbf{R_{1к}}$, Ом
T					

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. Написать уравнения четырёхполюсника при прямом и обратном включениях.
3. Вывести формулы определения входных сопротивлений через параметры схем замещения: **T**, **П** и **Г**-образных схем замещения.
4. Показать способы определения параметров схем замещения при заданных коэффициентах четырёхполюсника **A, B, C** и **D** на примере **Г**-образной схемы.

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах»

«Исследование линейных электрических цепей при несинусоидальном входном напряжении»

Компьютерное моделирование

1. Загрузить программу Multisim, собрать схему согласно рисунку 10.4 или загрузить файл lab10_toe.ms10.

2. Установить величину амплитуды и частоты генератора из таблицы 10.1 (вариант указывает преподаватель); тип сигнала – прямоугольный; режим работы вольтметра $U_{вых}$ – по переменному току – AC.

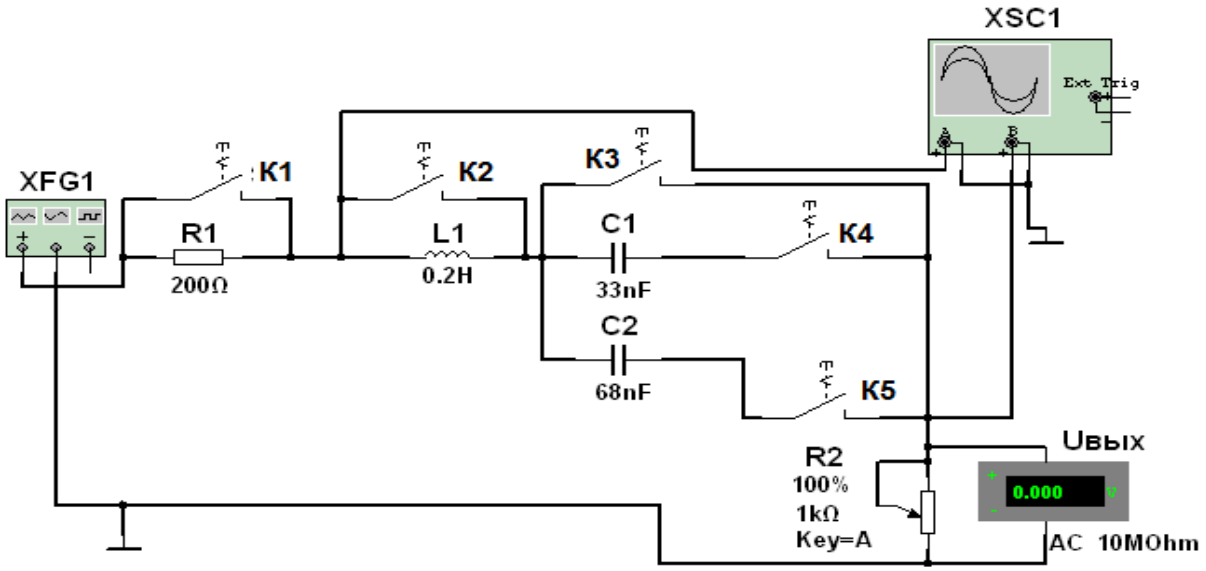


Рис. 10.4. Схема исследуемой цепи

3. Замкнуть ключи К1, К2, К3; установить переменный резистор R2 – 100 %; включить схему; раскрыть панель осциллографа, установить масштаб по оси времени (по x) и масштаб по каналам A и B (желательно выбрать один), достаточно удобный для наблюдения сигнала; зарисовать форму выходного сигнала (канал B), показание вольтметра $U_{вых}$ занести в таблицу 10.5, аналогичную таблице 10.3.

4. Исследовать цепь R-L: разомкнуть ключ К2, ключи К1, К3 –замкнуты; включить схему, записать действующее значение $U_{вых}$ в таблицу 10.6, аналогичную таблице 10.4, снять осциллограммы напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$; выключить схему.

5. Исследовать цепь R-C: разомкнуть ключ К3, ключи К1, К2, К5 – замкнуты; включить схему, записать действующее значение $U_{вых}$ в таблицу 10.6, снять осциллограммы напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$; выключить схему.

Обработка результатов эксперимента

1. Разложить прямоугольный сигнал генераторов в ряд Фурье, используя стандартное разложение и ограничившись тремя гармониками.

2. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблиц 10.3–10.6:

– действующее значение несинусоидального напряжения:

$$\mathbf{U} = \sqrt{\mathbf{U}_0^2 + \frac{\mathbf{U}_{1m}^2}{2} + \frac{\mathbf{U}_{3m}^2}{2} + \frac{\mathbf{U}_{5m}^2}{2}};$$

– коэффициенты гармоник, искажений и амплитуды:

$$\mathbf{k_г} = \frac{\sqrt{\mathbf{U_2^2 + U_3^2 + ... + U_k^2}}}{\mathbf{U_1}};$$

$$\mathbf{k_и} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{U_1}},$$

$$\mathbf{k_а} = \frac{\mathbf{U_m}}{\mathbf{U}}$$

где U_1, U_2, U_k – действующее значение напряжения соответственно первой, второй, *k*-й гармоники;

U – действующее значение суммы гармонических составляющих несинусоидального напряжения;

U_m – максимальное по модулю за период значение напряжения.

3. Разложить в ряд Фурье напряжение $u_г(t)$ для двух исследуемых схем R-L и R-C, применив графоаналитический метод. При расчете коэффициентов ряда Фурье воспользоваться формулами (10.7), (10.8) и (10.9). Определить действующие значения и коэффициенты по формулам (10.14) и (10.15). Полученные данные занести в таблицы 10.3–10.6.

4. Используя расчетные данные таблиц 10.3–10.6, построить графики линейных спектров выходного напряжения ГПН, равного входному напряжению исследуемых цепей, а также напряжений $u_г(t)$ для обеих схем R-L и R-C.

Дополнительное задание

Используя полученное разложение в ряд Фурье несинусоидального напряжения (п. 10.5) и параметры цепи (рис. 10.2), найти закон изменения тока и рассчитать мощности (активную, реактивную, полную).

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения лабораторной работы.
2. Записать члены ряда Фурье в зависимости от вида симметрии разлагаемых сигналов.
3. Как изображаются графики линейчатых спектров?
4. Как с помощью осциллографа определить сдвиг фаз между двумя сигналами?
5. По каким формулам находятся коэффициенты: амплитуды, формы, искажения и гармоник?
6. Как найти активную, реактивную и полную мощности при несинусоидальных напряжениях и токах, разложенных в тригонометрический ряд Фурье?

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Электрические фильтры»

«Исследование реактивной фильтрующей цепи низкой и высокой частоты»

Компьютерное моделирование

Основные измерения

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 11.5 или открыть файл lab11_ФНЧ_T_toe.ms10.
2. Открыть функциональный генератор (рис. 11.5), установить величину амплитуды из таблицы 11.1 (вариант указывает преподаватель), частоту **f** = 20 Гц;

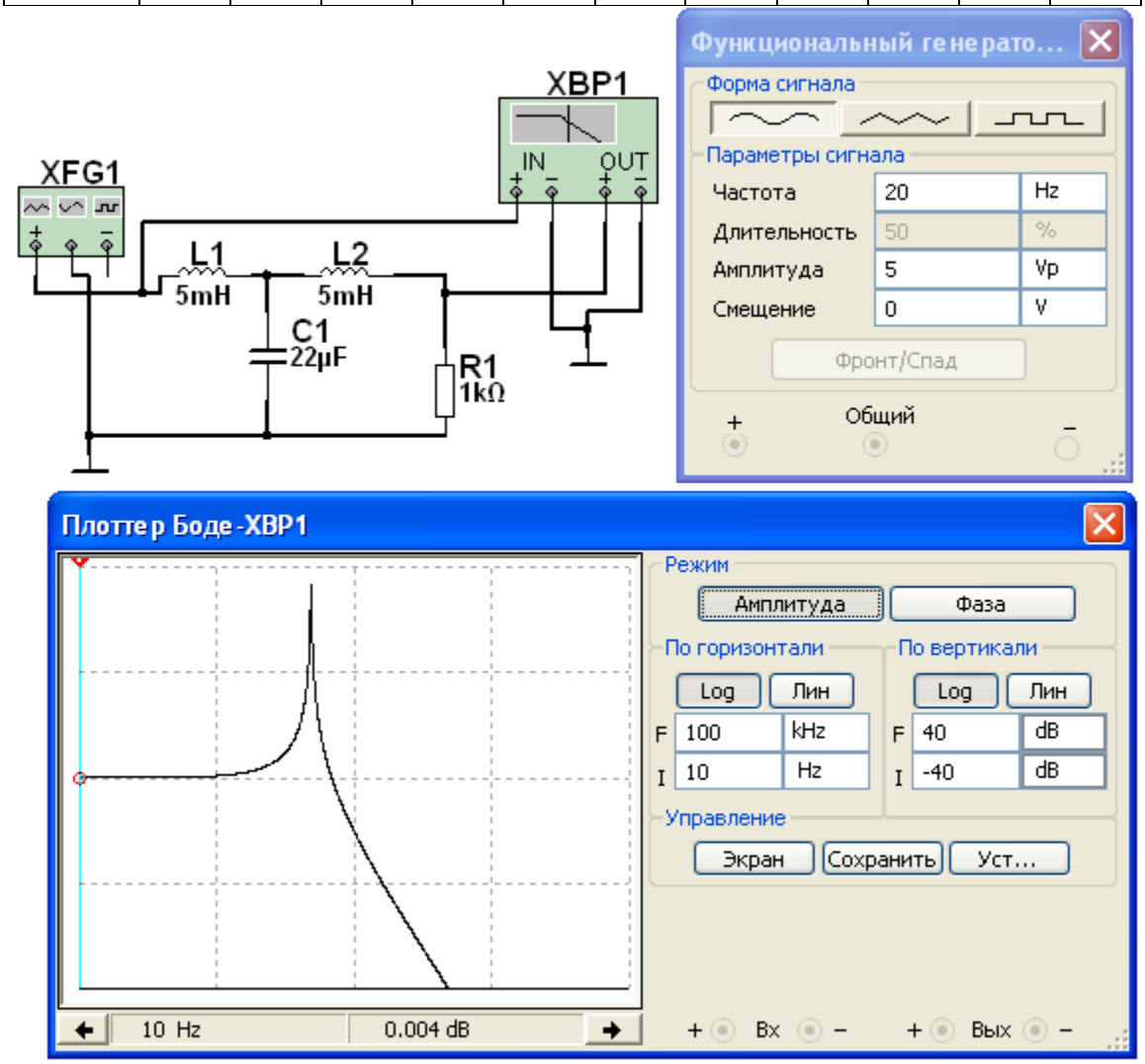
открыть Bode Plotter (ИЧХ), установить количество расчетных точек равным 1 000 (кнопка Set-установки); остальные параметры ИЧХ должны соответствовать рисунку 11.6.

3. Измерить 10 точек АЧХ и ФЧХ, данные занести в таблицу 11.4; с помощью визирной линии определить частоты среза фильтров по уровню $\frac{F_{p\,max}}{\sqrt{2}}$; определить фазовый сдвиг на частоте среза для каждого фильтра.

Таблица 11.4

Результаты эксперимента. Компьютерное моделирование

***f*, Гц**											
***F*$_p$, дБ**											
φ, °											



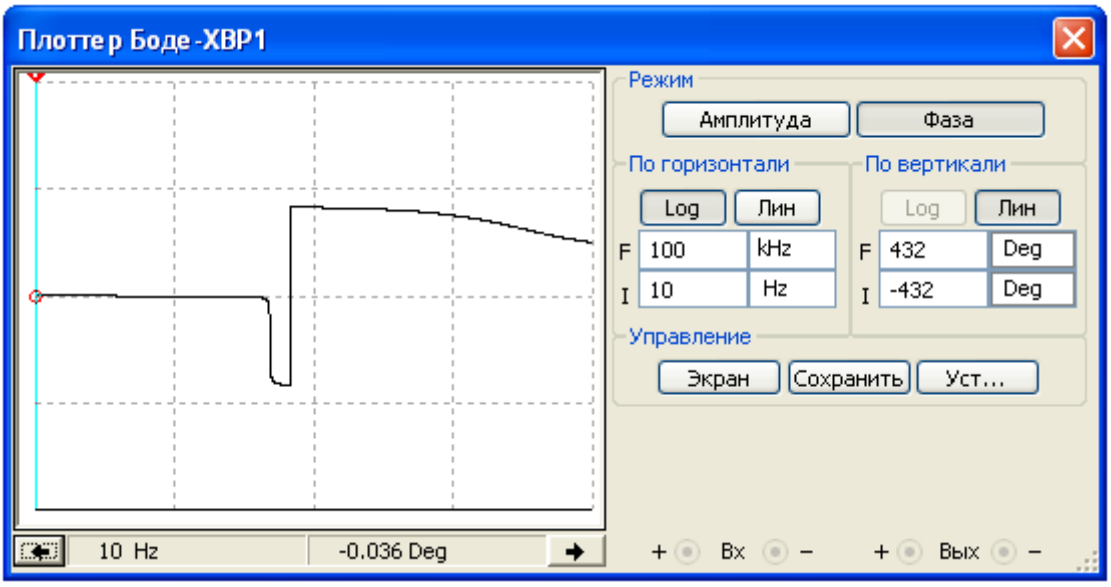


Рис. 11.5. Фильтр низкой частоты, *Т*-образная схема

4. Собрать схему рисунка 11.6 или открыть файл lab11_ФНЧ_П_toe.ms10; повторить измерения пункта 2 и 3, занести данные в таблицу 11.5, аналогичную таблице 11.4.

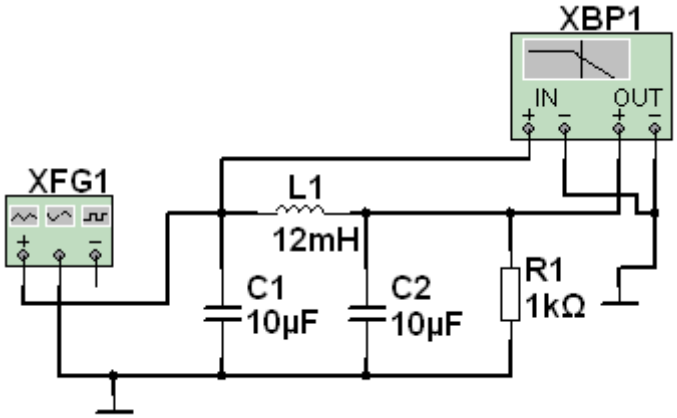


Рис. 11.6. Фильтр низкой частоты, *П*-образная схема

5. Собрать схему рисунка 11.7 или открыть файл lab11_ФВЧ_Т_toe.ms10; повторить измерения пункта 2 и 3, занести данные в таблицу 11.6, аналогичную таблице 11.4.

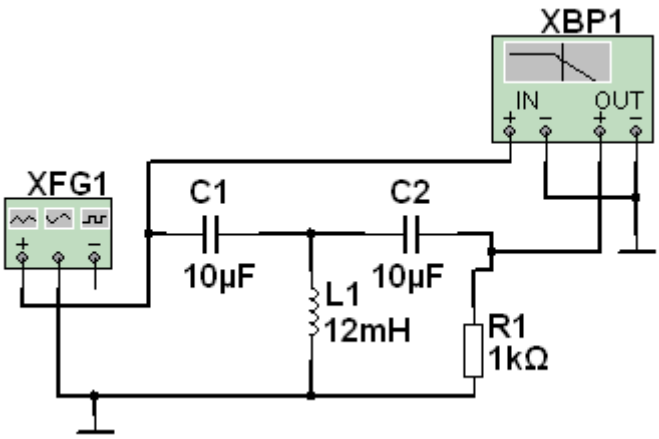


Рис. 11.7. Фильтр высокой частоты, *Т*-образная схема

6. Собрать схему рисунка 11.8 или открыть файл lab11_ФВЧ_П_toe.ms10; повторить измерения пункта 2 и 3, занести данные в таблицу 11.7, аналогичную таблице 11.4.

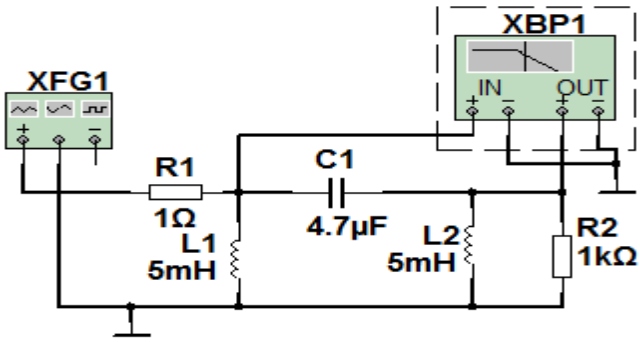


Рис. 11.8. Фильтр высокой частоты, *П*-образная схема

Дополнительные измерения

1. Собрать схему полосового фильтра (рис. 11.9) или открыть файл lab11_ФП_toe.ms10; повторить измерения пункта 2 и 3 основных измерений, занести данные в таблицу 11.8, аналогичную таблице 11.4.

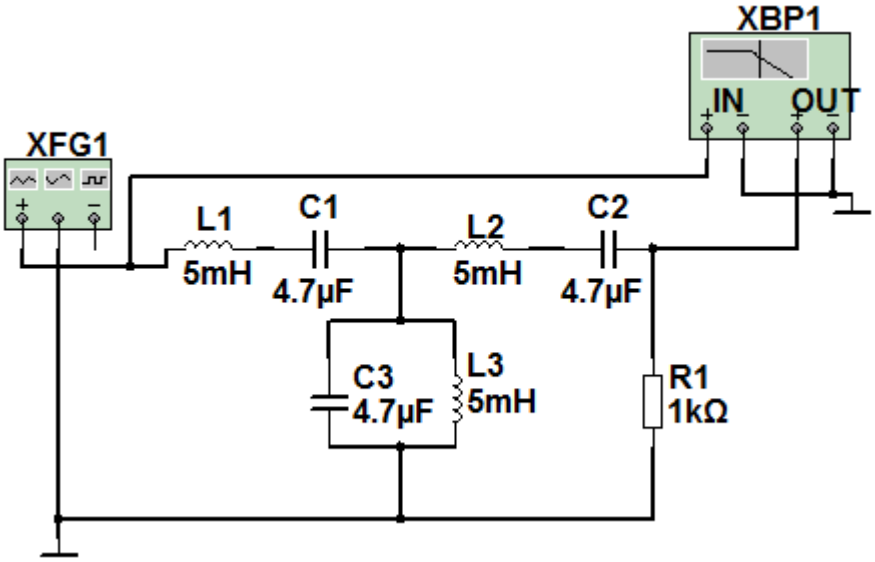


Рис. 11.9. Фильтр полосовой

2. Собрать схему заграждающего фильтра (рис. 11.10) или открыть файл lab11_ФЗ_toe.ms10; повторить измерения пункта 2 и 3 основных измерений, занести данные в таблицу 11.9, аналогичную таблице 11.4.

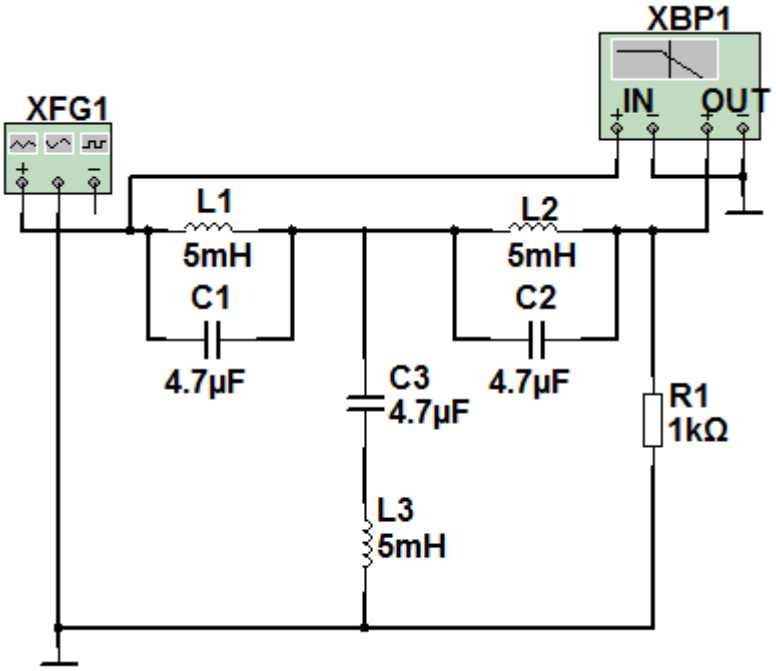


Рис. 11.10. Фильтр заграждающий

Обработка результатов измерений

1. Вычислить и занести в таблицы 11.3–11.6 следующие величины:

– действующие значения падения напряжения на выходе фильтра:

$$\mathbf{U_{вых}} = \frac{2\mathbf{U_{вых}}}{2\sqrt{2}};$$

– рабочая функция передачи фильтра: $\mathbf{F_р} = \frac{\mathbf{U_{вых}}}{\mathbf{U_{вх}}}$;

– коэффициент затухания фильтра: $\mathbf{A_р} = \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{U_{вх}}}{\mathbf{U_{вых}}}\right) = \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{F_р}}\right)$, Нп;

– частота среза ФНЧ: $\boldsymbol{\omega_{ср}} = \frac{2}{\sqrt{\mathbf{L_1 C_1}}}$, рад/с; $\mathbf{f_{ср}} = \frac{\boldsymbol{\omega_{ср}}}{2\boldsymbol{\pi}}$, Гц;

– частота среза ФВЧ: $\boldsymbol{\omega_{ср}} = \frac{1}{2\sqrt{\mathbf{L_1 C_1}}}$; $\mathbf{f_{ср}} = \frac{\boldsymbol{\omega_{ср}}}{2\boldsymbol{\pi}}$, Гц;

– модуль входного (характеристического) сопротивления фильтра:

$$\mathbf{Z_{вхТ}} = \sqrt{\frac{\mathbf{L_1}}{\mathbf{C_1}}} \cdot \sqrt{\left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{f_{ср}^2}}{\mathbf{f^2}}\right)}, \text{ Ом};$$

$$\mathbf{Z_{вхП}} = \sqrt{\frac{\mathbf{L_1}}{\mathbf{C_1}}} \cdot \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{f_{ср}^2}}{\mathbf{f^2}}\right)}}, \text{ Ом};$$

– номинальное характеристическое сопротивление фильтра:

$$\boldsymbol{\rho} = \sqrt{\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{C}}}, \text{ Ом.}$$

2. По результатам расчетов построить:

а) амплитудно-частотную характеристику рабочей функции передачи $\mathbf{F_р(f)}$;

б) амплитудно-частотную характеристику коэффициента затухания $\mathbf{A_р(f)}$;

в) амплитудно-частотную характеристику входного сопротивления фильтра **Z(f)**;

г) график функциональной зависимости напряжения на выходе $\mathbf{U_{вых}(f)}$;

д) фазо-частотную характеристику **φ(f)**.

Проанализировать построенные АЧХ и ФЧХ, сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим фильтром?
2. Какая существует классификация электрических фильтров?
3. На чем основан принцип работы ФНЧ и ФВЧ?
4. Пояснить суть работы исследуемых фильтров по их электрическим схемам.
5. Как по АЧХ можно установить тип фильтра?
6. Принцип работы полосовых и заграждающих фильтров.
7. Приведите основные схемы полосовых и заграждающих фильтров.
8. Что называется фильтром типа «k»?
9. В каких режимах работы электрических цепей LC-фильтр высокой частоты имеет лучшие характеристики?
10. В чем недостатки фильтров типа «k»?

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Переходные процессы в линейных электрических цепях»

Компьютерное моделирование

Основные измерения

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 14.6 или открыть файл lab14_toe.ms10.

2. Раскрыть панель генератора (XFG1), установить величину амплитуды и частоты генератора из таблицы 14.2 (вариант указывает преподаватель), тип сигнала – прямоугольный; дважды щелкнуть по соединению **A** (рис. 14.6), установить цвет красный, по соединению **B** – синий.

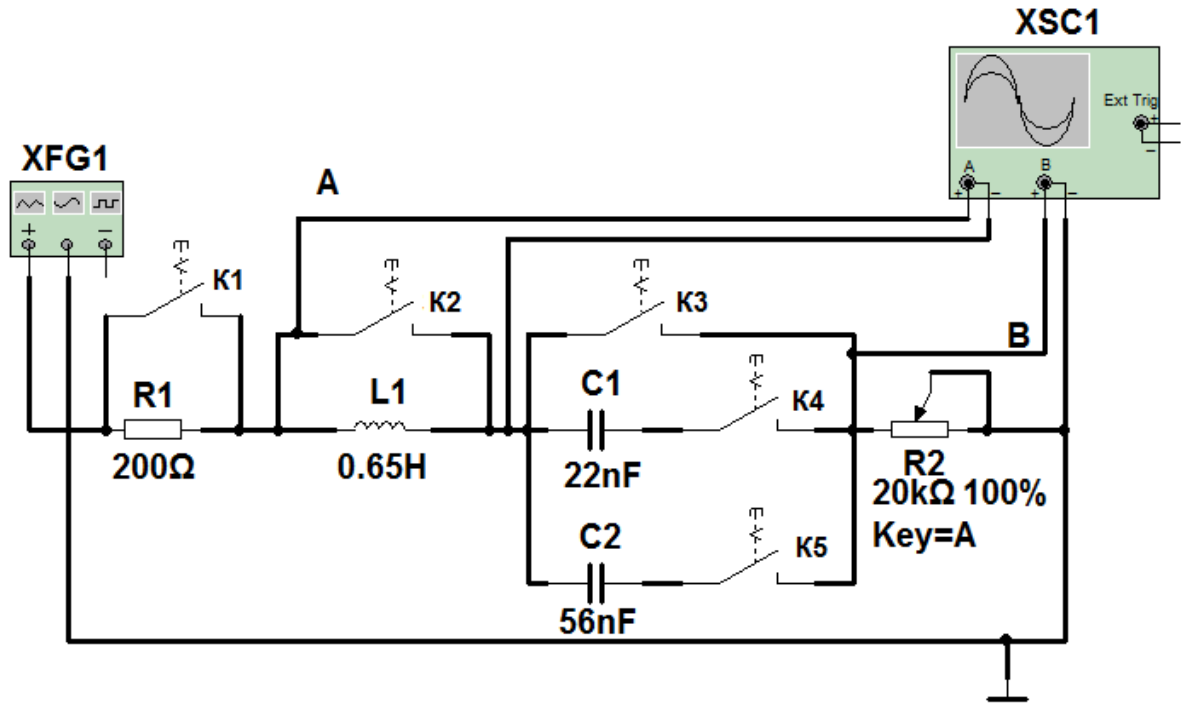


Рис. 14.6. Схема исследуемой цепи

3. Замкнуть ключи в соответствии с таблицей 14.3, режим **R**; раскрыть панель осциллографа (XSC1), установить масштаб по амплитуде и по времени достаточно удобный для наблюдения сигнала. Зарисовать форму выходного сигнала (канал **B**, синего цвета); указать параметры импульса (масштаб по напряжению и по времени).

4. Исследовать переходный процесс в цепи **R-L**: замкнуть ключи в соответствии с таблицей 14.3; с помощью осциллографа снять осциллограммы $\mathbf{u_R(t)}$, $\mathbf{u_L(t)}$ при двух значениях сопротивления R2; указать схему исследования, параметры импульса; значения **R2**, **L1**, **C** записать в таблицу 14.5.

Таблица 14.5

Цепь *R-L*, *R-C*. Компьютерное моделирование

Электрическая цепь	$\mathbf{R_2}$	$\mathbf{L_1}$	**C**	Расчет		Эксперимент	
				$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{расч}}$	$\mathbf{T_{пер}}$	$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{эксп}}$	$\mathbf{T_{пер}}$
	Ом	Гн	нФ	с	с	с	с
R-L							
R-C							

5. Исследовать переходный процесс в цепи **R-C**: замкнуть ключи в соответствии с таблицей 14.3; положение ключей S4 и S5 по указанию преподавателя (или оба замкнуты), снять осциллограммы $\mathbf{u_R(t)}$, $\mathbf{u_C\ (t)}$ при двух значениях сопротивления **R2**; указать схему исследования, параметры импульса; значения **R2** записать в таблицу 14.5.

6) Исследовать переходной процесс в цепи **R-L-C**: замкнуть ключи в соответствии с таблицей 14.3; положение ключей S4 и S5 по указанию преподавателя (или оба замкнуты); снять осциллограммы сигналов $\mathbf{u_R(t)}$, $\mathbf{u_{LC}(t)}$ при значениях R2, соответствующих апериодическому и колебательному характеру переходного процесса; значения R2, C4, C5 записать в таблицу 14.6.

Таблица 14.6

Цепь R-L-C. Компьютерное моделирование

Электрическая цепь	R_2	L_1	C	Вычислено				
				$\boldsymbol{\tau_1}$	$\boldsymbol{\tau_2}$	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\omega_{св}}$	$\mathbf{T_{пер}}$
	Ом	Гн	нФ	с	с	–	$с^{-1}$	с
1. **R-L-C** Апериодический переходный процесс						–	–	
2. **R-L-C** Колебательный переходный процесс				–	–			

Дополнительные измерения

1. Из графиков осциллограмм определить опытным путем постоянные времени, коэффициент затухания, частоту свободных колебаний и время переходного процесса; заполнить соответствующие графы таблицы 14.7;

Таблица 14.7

Цепь R-L-C. Дополнительные измерения. Компьютерное моделирование

Электрическая цепь	R_2	L_1	C	Снято с осциллограмм			
				τ_m	α	$\omega_{св}$	$T_{пер}$
	Ом	Гн	нФ	с	–	$с^{-1}$	с
1. **R-L-C** Апериодический переходный процесс					–	–	
2. **R-L-C** Колебательный переходный процесс				–			

2. Для рассматриваемых цепей показать выполнение законов коммутации на примере осциллограмм.

3. Используя интеграл Дюамеля, записать законы изменения $\mathbf{u_r}$ для рассматриваемых электрических цепей и проверить их на основе полученных осциллограмм.

Обработка результатов измерений

1. Для цепей **R-L** и **R-C** определить:

– постоянные времени по формулам:

$$\tau_{расч} = \frac{L_1}{R_2}$$ – для цепи **R-L**;

$$\tau_{расч} = C_1 \cdot R_2$$ – для цепи **R-C**.

– время переходного процесса: $T_{пер} = 4\tau$.

Полученные данные занести в соответствующие графы таблиц 14.3 и 14.5.

2. Для определения постоянных времени экспериментальным путем, осциллограммы цепей **R-L** и **R-C** оформить графически следующим образом: для каждой электрической цепи перевести на одном графике (в одном масштабе) полученные осциллограммы. При этом для графиков должен выполняться второй закон Кирхгофа в любой момент времени.

Пример построения графиков для цепи **R-L** показан на рисунке 14.7: $U_{вх}$ – осциллограмма входного прямоугольного импульса, $U_L(t)$ – осциллограмма напряжения на индуктивном элементе, $U_R(t)$ – на резистивном элементе. На рисунке 14.7 проведены касательные в момент времени для двух графиков $U_R(t)$, $U_L(t)$. При этом найденное значение $\tau_{эксп}$ занести в соответствующие графы таблиц 14.3 и 14.5.

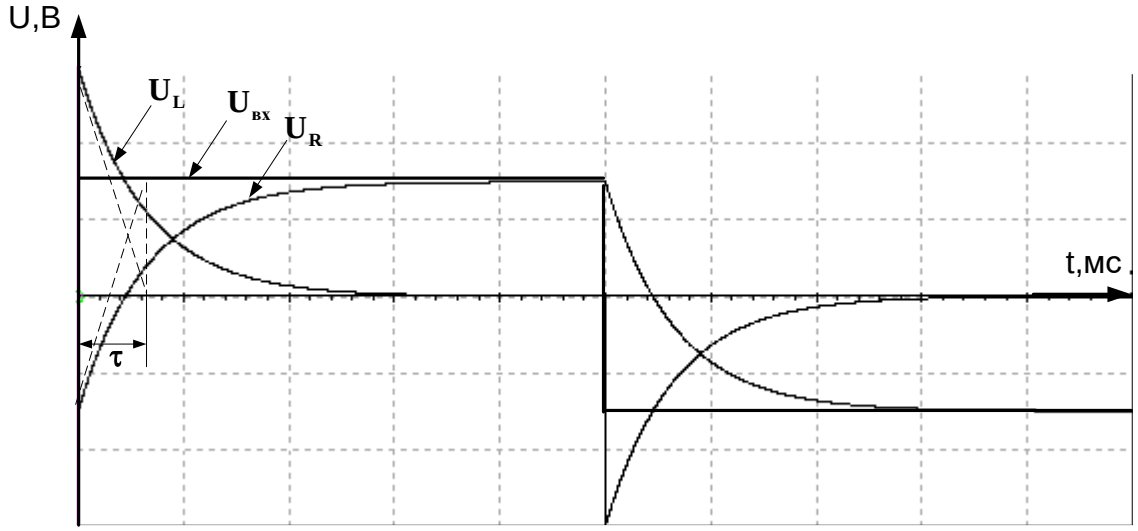


Рис. 14.7

3. Для цепи **R-L-C** определить корни характеристического уравнения, данные занести в соответствующие графы таблиц 14.4 и 14.6:

– апериодический процесс

$$\mathbf{p}_{1,2} = -\frac{\mathbf{R}}{2\mathbf{L}} \pm \sqrt{\frac{\mathbf{R}^2}{4\mathbf{L}^2} - \frac{1}{\mathbf{LC}}};$$

– колебательный процесс

$$\mathbf{p}_{1,2} = -\frac{\mathbf{R}}{2\mathbf{L}} \pm \mathbf{j}\sqrt{\frac{1}{\mathbf{LC}} - \frac{\mathbf{R}^2}{4\mathbf{L}^2}} = -\alpha \pm \mathbf{j}\omega_{\text{св}},$$

где $\alpha = \frac{\mathbf{R}}{2\mathbf{L}}$ – коэффициент затухания;

$\omega_{\text{св}} = \sqrt{\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{LC}} - \frac{\mathbf{R}^2}{4\mathbf{L}^2}}$ – частота свободных колебаний.

4. Используя значения корней $\mathbf{p_1}$ и $\mathbf{p_2}$, найти:

– постоянные времени апериодического процесса $\tau_1 = \frac{1}{|\mathbf{p_1}|}, \tau_2 = \frac{1}{|\mathbf{p_2}|}$;

– время переходного процесса при апериодическом характере $\mathbf{T_{пер} = 4\tau_m}$, где $\tau_m = \max\{\tau_1, \tau_2\}$;

– коэффициент затухания α и частоту свободных колебаний $\omega_{св}$ при колебательном характере переходного процесса $\alpha = \frac{\mathbf{R_2}}{2\mathbf{L_1}}$; $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\frac{1}{\mathbf{L_1 C}} - \frac{\mathbf{R_2^2}}{4\mathbf{L_1^2}}}$;

– время переходного колебательного процесса $\mathbf{T_{пер}} = \frac{4}{\alpha}$.

5. Сверить экспериментальные осциллограммы для цепей **R-L** и **R-C** с расчетными. Для этого операторным методом рассчитать $\mathbf{u_R(t)}$ для электрических

цепей рисунок 14.8, **а** и 14.8, **б** (параметры $\mathbf{L_1}$, **C**, $\mathbf{R_2}$ взять с рисунка 14.5, $\mathbf{U_{вх}}$ – по варианту).

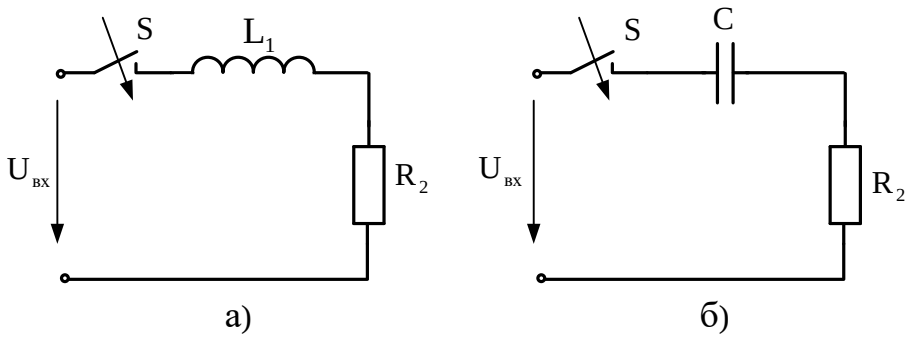


Рис. 14.8

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения лабораторной работы.
2. Назвать методы расчета переходных процессов.
3. Рассказать порядок расчета переходных процессов классическим методом.
4. Рассказать порядок расчета переходных процессов операторным методом.
5. Записать формулы интеграла Дюамеля, используемые для нахождения тока и падения напряжения.
6. Рассказать о законах коммутации и проверить полученные осциллограммы на их соблюдение.

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты
«Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока»

Компьютерное моделирование

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 15.10 или открыть файл lab15_1_toe.ms10.

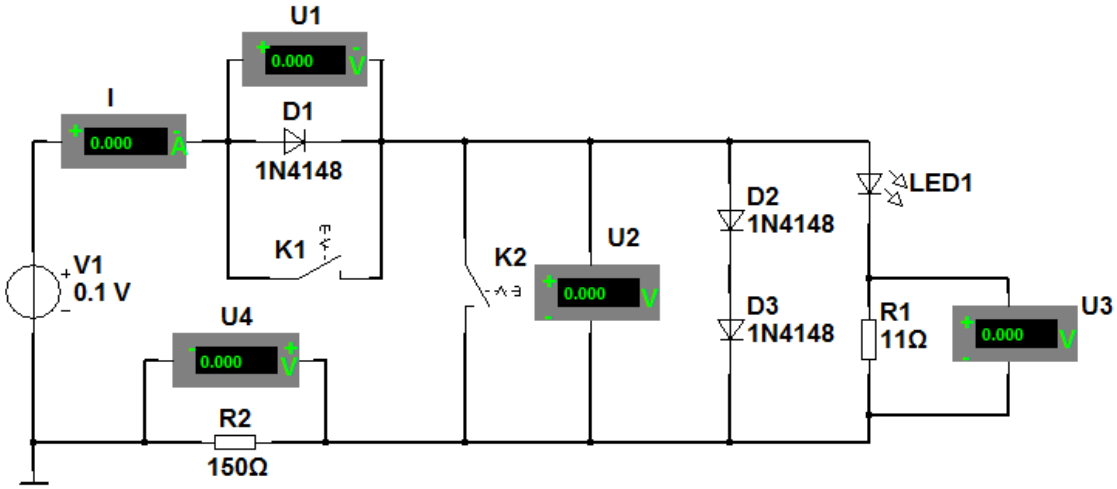


Рис. 15.10. Схема исследуемой цепи

Таблица 15.1

Измерено			Вычислено
U	U_1	U_4	I_1
В	В	В	А
0			
0,4			
0,8			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Таблица 15.2

Измерено				Вычислено		
U	U_2	U_3	U_4	I_1	I_2	I_3
В	В	В	В	А	А	А
0						
0,4						
0,8						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Таблица 15.3

Измерено					Вычислено		
U	U_1	U_2	U_3	U_4	I_1	I_2	I_3
В	В	В	В	В	А	А	А
0							
0,4							
0,8							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

2. Снять вольт-амперную характеристику последовательного соединения полупроводникового диода VD_1 и резистора R_1: замкнуть ключ $К_2$; изменяя входное напряжение U в диапазоне [0–10] В, снять показания приборов, занести в таблицу 15.4.

3. Вольт-амперная характеристика параллельного участка (диоды VD2, VD3 и светодиод Led1, линейное сопротивление R_1): ключ $К_1$ замкнуть, ключ $К_2$ разомкнуть; изменяя входное напряжение U в диапазоне [0–10] В, снять показания вольтметров V_2, V_3, V_4, записать в таблицу 15.5.

4. Вольт-амперная характеристика смешанного участка (диод VD1, диоды VD2, VD3, светодиод Led1, R_1): ключи $К_1$ и $К_2$ разомкнуты; изменяя входное напряжение U в диапазоне [0–10] В, снять показания вольтметров V_1, V_2, V_3, V_4, записать в таблицу 15.6.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблиц 15.1–15.6:

$$\mathbf{I_1 = \frac{U_4}{R_2}};\ \mathbf{I_3 = \frac{U_3}{R_1}};\ \mathbf{I_2 = I_1 - I_3}.$$

2. По данным таблиц 15.1, 15.4 построить ВАХ диода VD1 $I_1(U_1)$ и ВАХ линейного сопротивления R_2. Графически суммируя ВАХ диода и линейного сопротивления, построить ВАХ всей цепи.

3. По данным таблиц 15.2, 15.5 построить:

– ВАХ ветви VD2, VD3 – $I_2(U_2)$;

– ВАХ ветви LN1 (светодиод), R1 – $I_3(U_2)$;

– ВАХ линейного сопротивления R_2;

– графически суммируя ВАХ $I_2(U_2)$ и $I_3(U_2)$, построить ВАХ параллельного соединения $I_1(U_2)$;

– графически суммируя ВАХ параллельного соединения $I_1(U_2)$ и ВАХ линейного сопротивления R_2, построить ВАХ смешанного соединения $I_1(U)$.

4. По данным таблиц 15.2, 15.5 построить экспериментальную ВАХ параллельного соединения $I_1(U)$. Полученную экспериментальную характеристику сравнить с расчетной, полученной в предыдущем пункте.

5. По данным таблиц 15.3, 15.6 построить:

– ВАХ ветви VD1 – $I_1(U_1)$;

– ВАХ ветви VD2, VD3 – $I_2(U_2)$;

– ВАХ ветви LN1 (светодиод), R1 – $I_3(U_2)$;

– ВАХ линейного сопротивления R_2;

– графически суммируя ВАХ $I_2(U_2)$ и $I_3(U_2)$, построить ВАХ параллельного соединения $I_1(U_2)$;

– графически суммируя ВАХ диода VD1 $I_1(U_1)$, параллельного соединения $I_1(U_2)$ и ВАХ линейного сопротивления R_2, построить ВАХ смешанного соединения $I_1(U)$;

Таблица 15.4

Измерено			
U	U_1	U_4	I_1
В	В	В	А
0			
0,4			
0,8			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Таблица 15.5

Измерено					Вычислено	
U	U_2	U_3	U_4	I_1	I_2	I_3
В	В	В	В	А	А	А
0						
0,4						
0,8						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Таблица 15.6

Измерено						Вычислено	
U	U_1	U_2	U_3	U_4	I_1	I_2	I_3
В	В	В	В	В	А	А	А
0							
0,4							
0,8							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

6. По данным таблиц 15.3, 15.6 построить ВАХ смешанного соединения $I_1(U)$. Полученную экспериментальную характеристику сравнить с расчетной, полученной в предыдущем пункте.

7. Используя вольтамперную характеристику при смешанном соединении $I_1(U)$ и значении тока I_1, заданного преподавателем, определить значение токов I_2, I_3.

Дополнительное задание

Используя ВАХ диода VD1 $I_1(U_1)$ (п. 2), выбрать рабочую точку (соответствующую любому из опытов таблицы 15.4) и определить дифференциальные сопротивления для нелинейного элемента.

Аппроксимировать любую ВАХ степенным полиномом и определить статическое и дифференциальное сопротивления для фиксированной точки по полученной аналитической функции и по исходной ВАХ. Сравнить результат.

Контрольные вопросы

1. Какие элементы называются нелинейными, инерционными и безинерционными?
2. Написать уравнения, реализуемые графически при построении результирующих вольт-амперных характеристик при последовательном и параллельном соединениях двух нелинейных сопротивлений.
3. Дать определения статического ($r_{ст}$) и дифференциального ($r_{диф}$) сопротивлений нелинейного элемента. Как они определяются по вольт-амперным характеристикам?
4. Нарисовать схему замещения нелинейного сопротивления, используя $r_{диф}$ и E (ЭДС).

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Катушка с ферромагнитным сердечником»

Компьютерное моделирование

В работе исследуется катушка индуктивности с магнитным сердечником, размеры которого и основная кривая намагничивания B(H) могут задаваться произвольно.

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 16.11 или открыть файл lab16_toe.ms10.

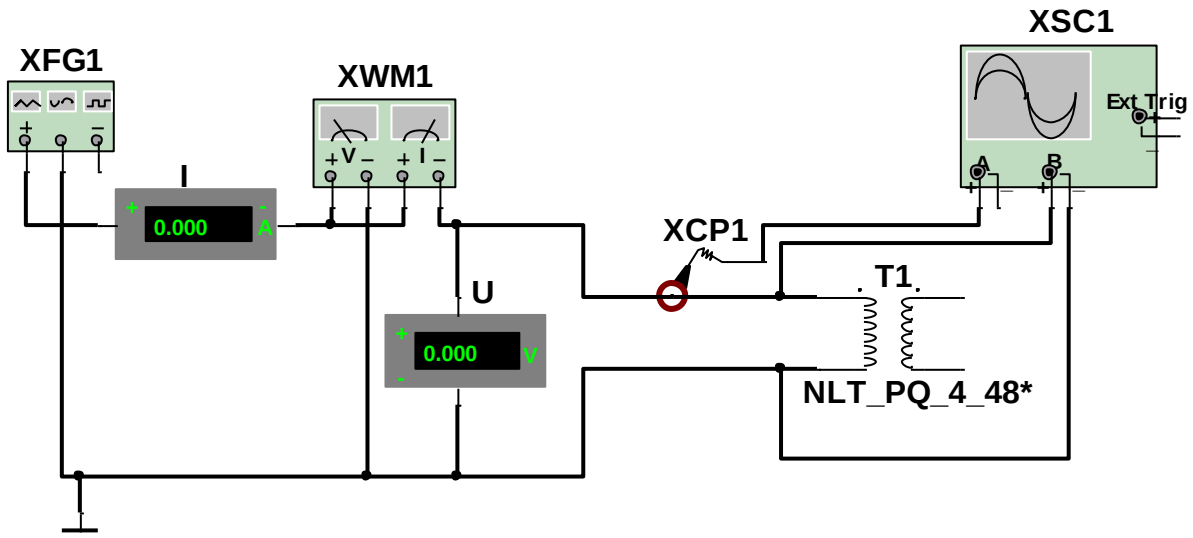


Рис. 16.11. Схема исследуемой цепи

Таблица 16.3

Результаты эксперимента. Выполнение на стенде

Измерено		Вычислено														
U_1	$U_2 = U_к$	I	z	x	φ	δ	P	I_a	$I_μ$	$Y_{ст}$	$g_{ст}$	$b_{ст}$	U_a	U_p	$z_{ст}$	$r_{ст}$	$x_{ст}$
В	В	А	Ом	Ом	град.	град.	Вт	А	А	см	См	См	В	В	Ом	Ом	Ом

2. Установить режим работы амперметра и вольтметра – для измерения переменного тока (AC); осциллограф подключен для снятия двух сигналов: канал A – несинусоидальный ток катушки (через бесконтактный пробник тока), канал B – входное синусоидальное напряжение.

3. Перед исследованием катушки с ферромагнитным сердечником необходимо ввести основную кривую намагничивания B(H) (табл. 16.4).

Таблица 16.4

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H, А/м	–800	–500	–300	–200	–100	–70	0	70	100	200	300	500	800
B, Тл	–0,39	–0,35	–0,3	–0,25	–0,15	–0,1	0	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35	0,39

Порядок ввода B(H) следующий:

– с помощью двойного щелчка войти в меню катушки (рис. 16.12);

– нажать «Редактировать модель»;

– ввести данные с таблицы 16.4 и изменить параметры area, length, input domain на значения, которые указаны на рисунке 16.13;

– нажать кнопку «Изменить модель компонента», далее «Ок».

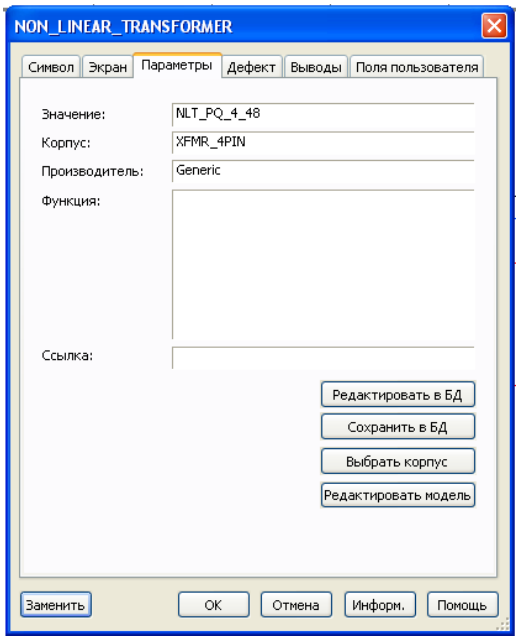


Рис. 16.12. Вкладка «Параметры»

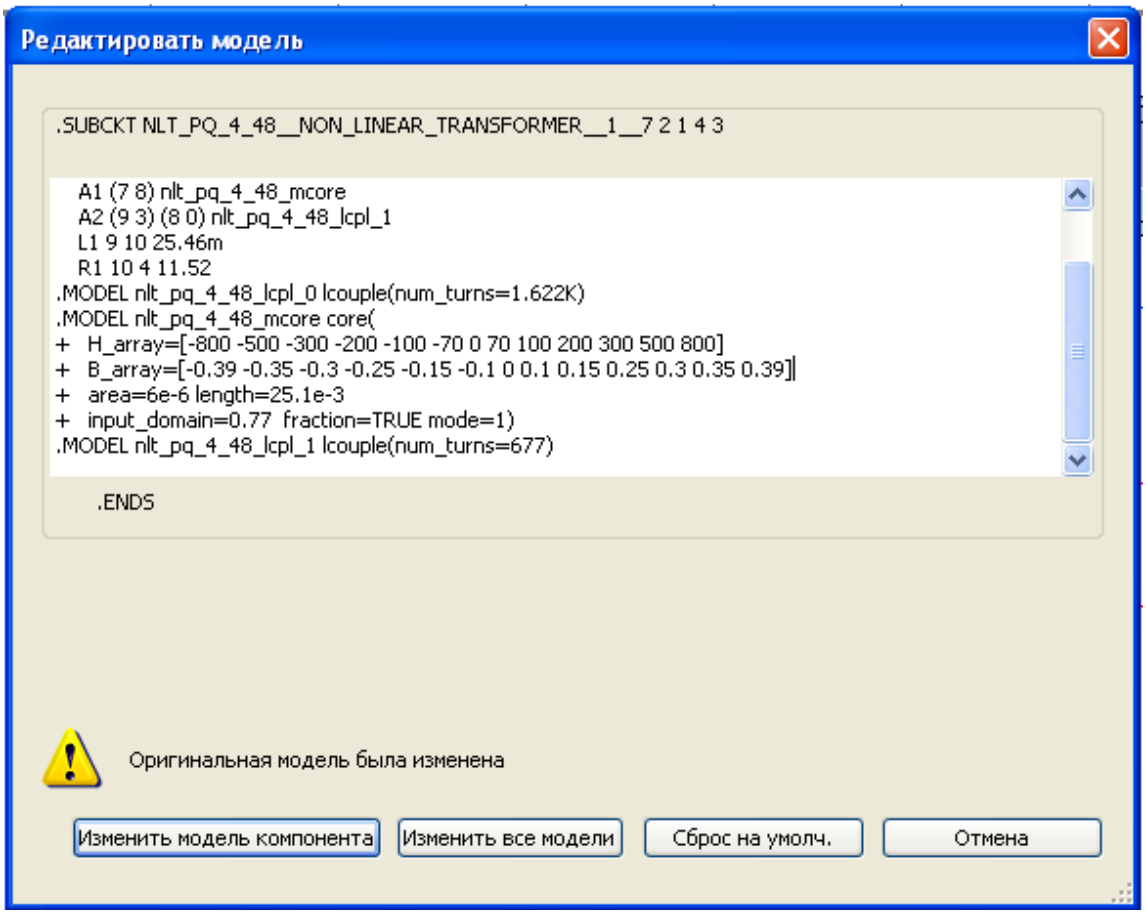


Рис. 16.13. Свойства нелинейной катушки

4. Установить параметры генератора: тип сигнала – синусоидальный, амплитуда 5 В, частота 50 Гц (или заданные преподавателем). Снять осциллограммы (осциллограф открывается двойным щелчком мыши) и записать показания приборов в соответствующие графы таблицы 16.5.

Таблица 16.5

Результаты эксперимента. Компьютерное моделирование

Измерено			Вычислено											
P	I	U	φ	δ	I_a	I_μ	$Y_{ст}$	$g_{ст}$	$b_{ст}$	U_a	U_p	$z_{ст}$	$r_{ст}$	$x_{ст}$
Вт	А	В	град.	град.	А	А	см	см	см	В	В	Ом	Ом	Ом

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений, полученных при выполнении на стенде

1. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблицы 16.2:

– ток в цепи: $\mathbf{I = \frac{U_1}{R_1}}$;

– падение напряжения на активном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_r = I \cdot R_к}$, где $R_к = 1$ Ом;

– падение напряжения на реактивном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_L = \sqrt{U_к^2 - U_r^2}}$;

– полное сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z = \frac{U_к}{I}}$.

По данным таблицы 16.2 построить графики зависимостей $U_к = f(I)$, $z = f(I)$.

2. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблицы 16.3:

– ток в цепи: $\mathbf{I = \frac{U_1}{R_1}}$;

– полное сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z = \frac{U_к}{I}}$;

– реактивное сопротивление катушки: $\mathbf{x = \sqrt{z^2 - R_к^2}}$;

– угол сдвига фазы между напряжением и током: $\mathbf{\varphi = arctg \frac{x}{R_к}}$;

– угол магнитных потерь: $\mathbf{\delta = 90^\circ - \varphi;}$

– активная мощность нелинейной катушки: $\mathbf{P = U_к I cos\varphi}$;

– активная составляющая тока: $\mathbf{I_a = I sin\delta = I cos\varphi;}$

– реактивная составляющая тока: $\mathbf{I_\mu = I cos\delta = I sin\varphi;}$

– полная статическая проводимость нелинейной катушки: $\mathbf{Y_{ст} = \frac{I}{U}}$;

– активная статическая проводимость нелинейной катушки: $\mathbf{g_{ст} = \frac{P}{U^2}}$;

– реактивная статическая проводимость нелинейной катушки:

$\mathbf{b_{ст} = \sqrt{Y_{ст}^2 - g_{ст}^2}}$;

– падение напряжения на активном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_a = U cos\varphi;}$

– падение напряжения на реактивном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_p = U sin\varphi;}$

– полное статическое сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z_{ст} = \frac{U}{I}}$;

– активное статическое сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{r_{ст} = \frac{P}{I^2}}$;

– реактивное статическое сопротивление нелинейной катушки:

$\mathbf{x_{ст} = \sqrt{z_{ст}^2 - r_{ст}^2}}$.

Пренебречь потерями меди и индуктивностью рассеивания, построить векторную диаграмму напряжений и токов. Примерный вид векторной диаграммы приведен на рисунке 16.14.

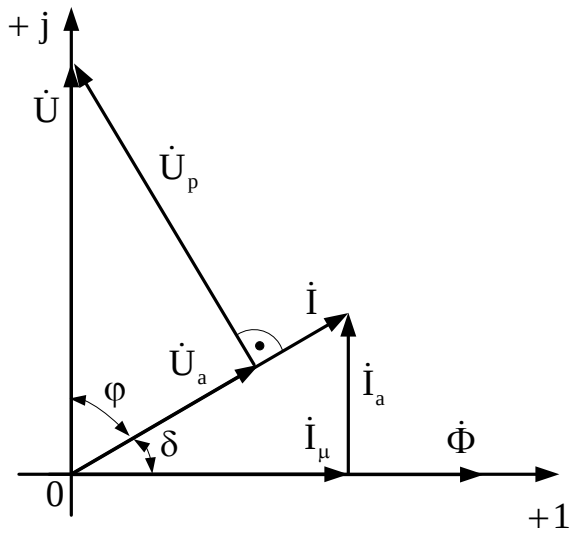


Рис. 16.14. Векторная диаграмма напряжений и токов

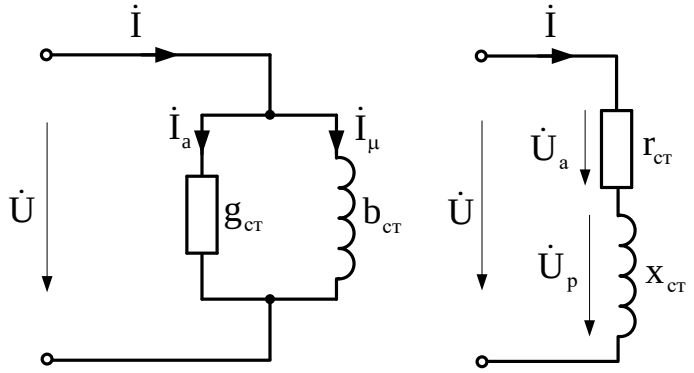


Рис. 16.15. Схемы замещения нелинейной катушки

Обработка результатов измерений, полученных
при компьютерном моделировании

Заменив несинусоидальный ток катушки эквивалентным по действующему значению синусоидальным, для каждого из опытов провести расчет по формулам, полученным на основе векторных диаграмм напряжения и тока (рис. 16.14) и соответствующих схем замещения (рис. 16.15), и заполнить соответствующие графы таблицы 16.5:

$$\varphi = \arccos\frac{P}{UI};\quad \delta = 90^{o} - \varphi;\quad I_a = I\sin\delta = I\cos\varphi;\quad I_\mu = I\cos\delta = I\sin\varphi;$$

$$Y_{ст} = \frac{I}{U};\ g_{ст} = \frac{P}{U^2};\ b_{ст} = \sqrt{Y_{ст}^2 - g_{ст}^2};\ U_a = U\cos\varphi;$$

$$U_p = U\sin\varphi;\ z_{ст} = \frac{U}{I};\ r_{ст} = \frac{P}{I^2};\ x_{ст} = \sqrt{z_{ст}^2 - r_{ст}^2}\ .$$

Используя данные таблицы 16.5, нарисовать векторную диаграмму напряжений и токов (аналогичную диаграмме рис. 16.14).

Дополнительное задание

Нарисовать полную схему замещения катушки со стальным сердечником.

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. Как влияет нелинейность B(H) на форму кривой тока?
3. Отчего зависит величина угла δ?

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты
«Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником»
Компьютерное моделирование

В работе исследуется катушка индуктивности с магнитным сердечником, размеры которого и основная кривая намагничивания B(H) могут задаваться произвольно.

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 16.11 или открыть файл lab16_toe.ms10.

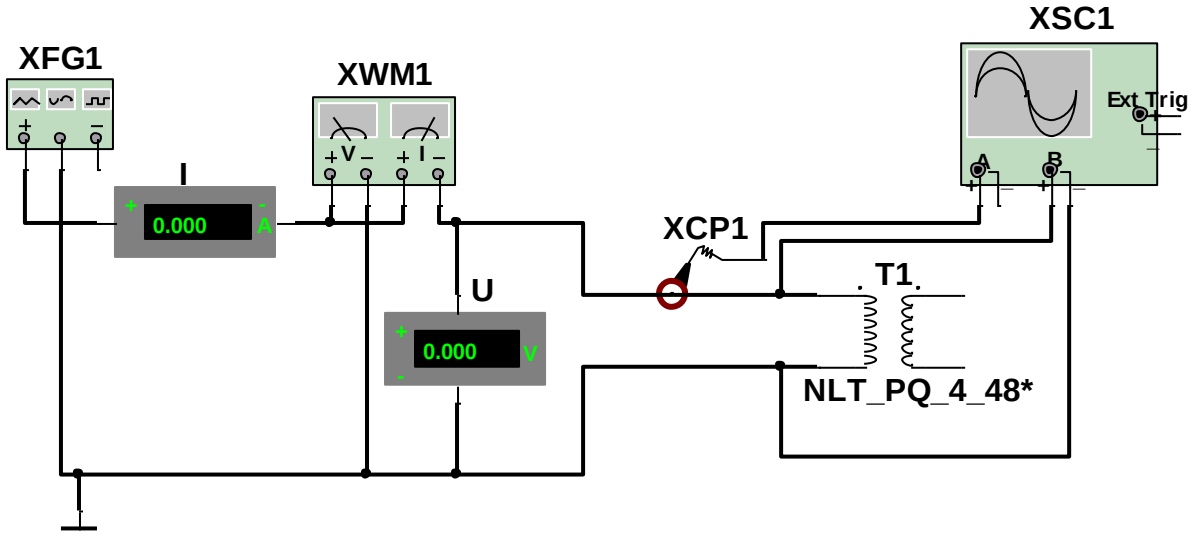


Рис. 16.11. Схема исследуемой цепи

Таблица 16.3

Результаты эксперимента. Выполнение на стенде

Измерено		Вычислено														
U_1	$U_2 = U_к$	I	z	x	φ	δ	P	I_a	$I_μ$	$Y_{ст}$	$g_{ст}$	$b_{ст}$	U_a	U_p	$z_{ст}$	$r_{ст}$	$x_{ст}$
В	В	А	Ом	Ом	град.	град.	Вт	А	А	см	См	См	В	В	Ом	Ом	Ом

2. Установить режим работы амперметра и вольтметра – для измерения переменного тока (AC); осциллограф подключен для снятия двух сигналов: канал A – несинусоидальный ток катушки (через бесконтактный пробник тока), канал B – входное синусоидальное напряжение.

3. Перед исследованием катушки с ферромагнитным сердечником необходимо ввести основную кривую намагничивания B(H) (табл. 16.4).

Таблица 16.4

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H, А/м	–800	–500	–300	–200	–100	–70	0	70	100	200	300	500	800
B, Тл	–0,39	–0,35	–0,3	–0,25	–0,15	–0,1	0	0,1	0,15	0,25	0,3	0,35	0,39

Порядок ввода B(H) следующий:

– с помощью двойного щелчка войти в меню катушки (рис. 16.12);

– нажать «Редактировать модель»;

– ввести данные с таблицы 16.4 и изменить параметры area, length, input domain на значения, которые указаны на рисунке 16.13;

– нажать кнопку «Изменить модель компонента», далее «Ок».

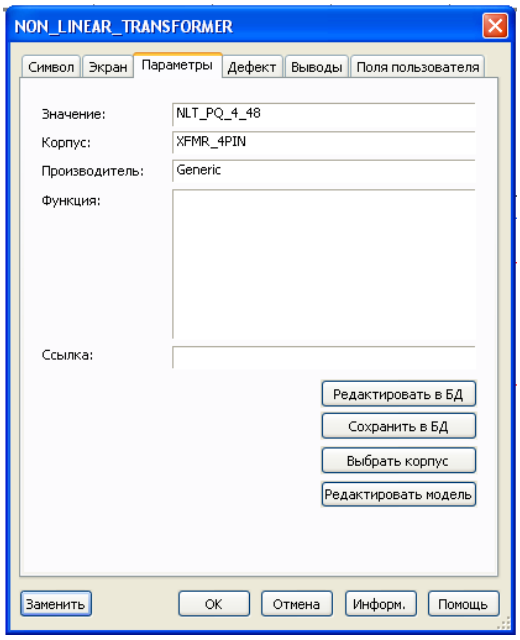


Рис. 16.12. Вкладка «Параметры»

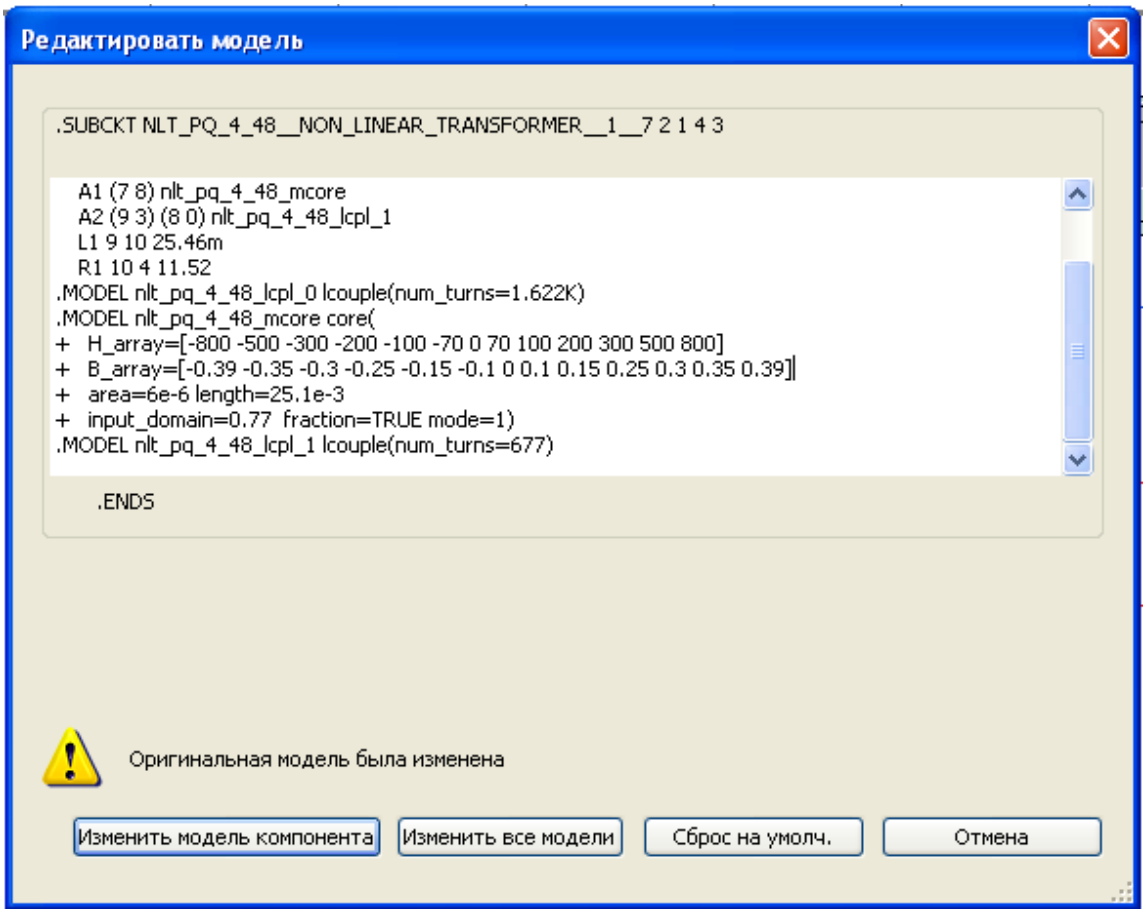


Рис. 16.13. Свойства нелинейной катушки

4. Установить параметры генератора: тип сигнала – синусоидальный, амплитуда 5 В, частота 50 Гц (или заданные преподавателем). Снять осциллограммы (осциллограф открывается двойным щелчком мыши) и записать показания приборов в соответствующие графы таблицы 16.5.

Таблица 16.5

Результаты эксперимента. Компьютерное моделирование

Измерено			Вычислено											
P	I	U	φ	δ	I_a	I_μ	$Y_{ст}$	$g_{ст}$	$b_{ст}$	U_a	U_p	$z_{ст}$	$r_{ст}$	$x_{ст}$
Вт	А	В	град.	град.	А	А	см	см	см	В	В	Ом	Ом	Ом

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений, полученных при выполнении на стенде

1. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблицы 16.2:

– ток в цепи: $\mathbf{I = \frac{U_1}{R_1}}$;

– падение напряжения на активном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_r = I \cdot R_к}$, где $R_к$ = 1 Ом;

– падение напряжения на реактивном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_L = \sqrt{U_к^2 - U_r^2}}$;

– полное сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z = \frac{U_к}{I}}$.

По данным таблицы 16.2 построить графики зависимостей $U_к$ = f(I), z = f(I).

2. Вычислить по формулам необходимые значения параметров и переменных и занести в соответствующие графы таблицы 16.3:

– ток в цепи: $\mathbf{I = \frac{U_1}{R_1}}$;

– полное сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z = \frac{U_к}{I}}$;

– реактивное сопротивление катушки: $\mathbf{x = \sqrt{z^2 - R_к^2}}$;

– угол сдвига фазы между напряжением и током: $\mathbf{\varphi = arctg \frac{x}{R_к}}$;

– угол магнитных потерь: $\mathbf{\delta = 90^\circ - \varphi;}$

– активная мощность нелинейной катушки: $\mathbf{P = U_к I cos\varphi}$;

– активная составляющая тока: $\mathbf{I_a = I sin\delta = I cos\varphi;}$

– реактивная составляющая тока: $\mathbf{I_\mu = I cos\delta = I sin\varphi;}$

– полная статическая проводимость нелинейной катушки: $\mathbf{Y_{ст} = \frac{I}{U}}$;

– активная статическая проводимость нелинейной катушки: $\mathbf{g_{ст} = \frac{P}{U^2}}$;

– реактивная статическая проводимость нелинейной катушки:

$\mathbf{b_{ст} = \sqrt{Y_{ст}^2 - g_{ст}^2}}$;

– падение напряжения на активном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_a = U cos\varphi;}$

– падение напряжения на реактивном сопротивлении нелинейной катушки: $\mathbf{U_p = U sin\varphi;}$

– полное статическое сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{z_{ст} = \frac{U}{I}}$;

– активное статическое сопротивление нелинейной катушки: $\mathbf{r_{ст} = \frac{P}{I^2}}$;

– реактивное статическое сопротивление нелинейной катушки:

$\mathbf{x_{ст} = \sqrt{z_{ст}^2 - r_{ст}^2}}$.

Пренебречь потерями меди и индуктивностью рассеивания, построить векторную диаграмму напряжений и токов. Примерный вид векторной диаграммы приведен на рисунке 16.14.

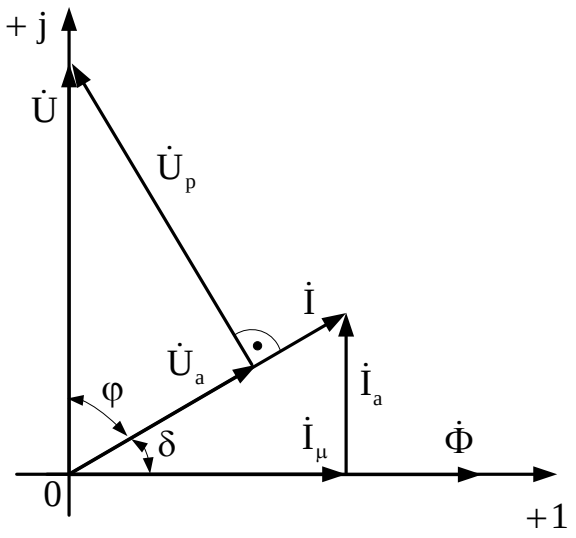


Рис. 16.14. Векторная диаграмма напряжений и токов

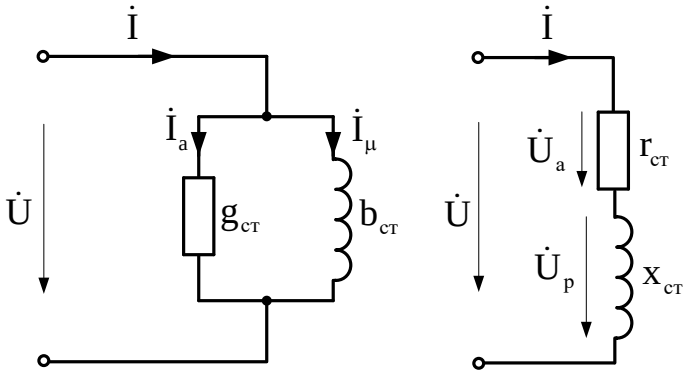


Рис. 16.15. Схемы замещения нелинейной катушки

Обработка результатов измерений, полученных при компьютерном моделировании

Заменив несинусоидальный ток катушки эквивалентным по действующему значению синусоидальным, для каждого из опытов провести расчет по формулам, полученным на основе векторных диаграмм напряжения и тока (рис. 16.14) и соответствующих схем замещения (рис. 16.15), и заполнить соответствующие графы таблицы 16.5:

$$\varphi = \arccos\frac{P}{UI};\ \ \delta = 90^{o} - \varphi;\ \ I_a = I\sin\delta = I\cos\varphi;\ \ I_\mu = I\cos\delta = I\sin\varphi;$$

$$Y_{ст} = \frac{I}{U};\ \ g_{ст} = \frac{P}{U^2};\ \ b_{ст} = \sqrt{Y_{ст}^2 - g_{ст}^2};\ U_a = U\cos\varphi;$$

$$U_p = U\sin\varphi;\ \ z_{ст} = \frac{U}{I};\ \ r_{ст} = \frac{P}{I^2};\ \ x_{ст} = \sqrt{z_{ст}^2 - r_{ст}^2}\ .$$

Используя данные таблицы 16.5, нарисовать векторную диаграмму напряжений и токов (аналогичную диаграмме рис. 16.14).

Дополнительное задание

Нарисовать полную схему замещения катушки со стальным сердечником.

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. Как влияет нелинейность B(H) на форму кривой тока?
3. Отчего зависит величина угла магнитных потерь δ?

Анализ однофазного трансформатора с ферромагнитным сердечником по действующим значениям тока и напряжения

Рассмотрим однофазный двух обмоточный трансформатор с ферромагнитным магнитопроводом. На замкнутый магнитопровод с одной катушкой (обмоткой) надевается вторая катушка (рис. 5.36). Магнитопровод применяется для усиления основного магнитного потока, пронизывающего витки второй катушки (обмотки).

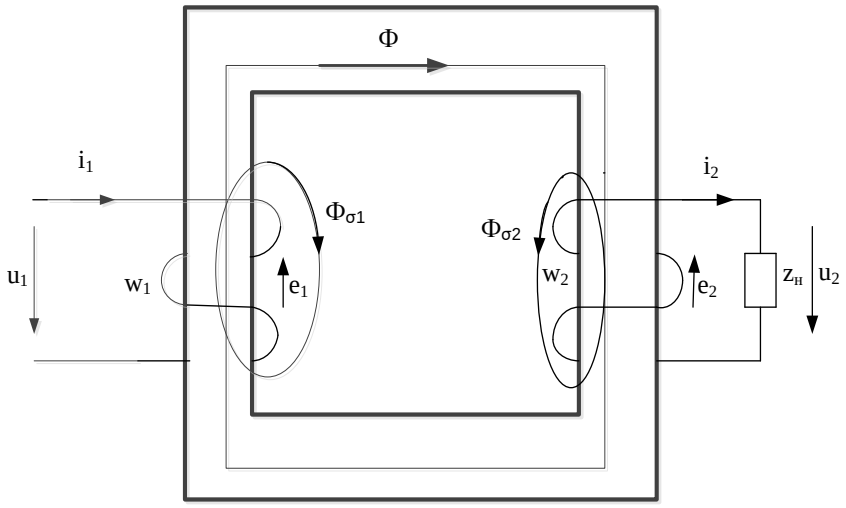


Рис. 5.36. Однофазный трансформатор (ссылка)

В трансформаторе при синусоидальном входном напряжении все остальные мгновенные электрические и магнитные величины будут изменяться по несинусоидальным законам изменения за счёт нелинейности магнитных характеристик магнитопровода. На основе алгоритма (5.29) запишем упрощенный алгоритм связей между указанными величинами при подаче на вход первичной катушки синусоидального напряжения. В алгоритме введены обозначения:

u_1, u_2 – мгновенные значения входного и выходного напряжений;

i_1, i_2 – мгновенные значения тока первой и второй катушек;

F_1, F_2 – мгновенные значения магнитодвижущей силы первой и второй катушек;

Ф – основной поток, протекающий по сердечнику магнитопровода;

ψ_{11}, ψ_{21}– мгновенные значения потокосцепления от основного магнитного потока первой и второй катушек;

w_1, w_2 – число витков первой и второй катушек;

e_1 , e_2 – мгновенные значения ЭДС вызванное основным потоком в первой и второй катушках;

u'_1, u'_2 – мгновенные значения падения напряжения вызванное основным потоком в первой и второй катушках;

u_{r1}, u_{r2} – мгновенные значения активного падения напряжения в проводах первой и второй катушек;

$\Phi_{\sigma1}$, $\Phi_{\sigma2}$ – мгновенные значения потоков рассеивания, замыкающихся по воздуху первой и второй катушек;

$\psi_{\sigma1}$, $\psi_{\sigma2}$ – мгновенные значения потокосцепления рассеивания первой и второй катушек;

$e_{\sigma1}$, $e_{\sigma2}$ – мгновенные значения ЭДС вызванные потоками рассеивания в первой и второй катушках;

$u_{\sigma1}$, $u_{\sigma2}$ – мгновенные значения падения напряжения вызванные потоками рассеивания в первой и второй катушках.

$$u_{r1} = ri_1; \quad \Phi_{\sigma1} \rightarrow \psi_{\sigma1} = \Phi_{\sigma1}w_1 \rightarrow e_{\sigma1} = -\frac{d\psi\sigma1}{dt} = -u_{\sigma1};$$

$$u_1 \rightarrow i_1 \rightarrow F_1 = i_1w_1 \rightarrow \Phi \rightarrow \psi_{11} = \Phi w_1 \rightarrow e_1 = -\frac{d\psi 11}{dt} = -u'_1; \qquad (5.54)$$

(Φ_2 ослабляет основной магнитный потокΦ)

$$\Phi_2$$

$$\Psi_{21} = \Phi w_2 \rightarrow e_2 = -\frac{d\psi 21}{dt} = -u'_2 \rightarrow i_2 \rightarrow F_2 = i_2w_2 \rightarrow \Phi_{\sigma2}$$

$$u_2$$

$$u_{r2} = ri_2; \quad \psi_{\sigma2} = \Phi_{\sigma2}w_2 \rightarrow e_{\sigma2} = -\frac{d\psi\sigma2}{dt} = -u_{\sigma2}.$$

Согласно ранее введённым обозначениям алгоритма (5.54) и уравнения для катушки с ферромагнитным сердечником (5.40) для первого и второго контуров можно записать:

$$u_1 = u_{r1} + u_{\sigma1} + u'_1, \qquad (5.55)$$

$$u_{r2} + u_{\sigma2} + u'_2 + u_2 = 0 \qquad (5.56)$$

или более подробно

$$u_1 = ri_1 + L_{\sigma1}\frac{di1}{dt} + w_1\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (5.57)$$

$$r_2\, i_2 + L_{\sigma2}\frac{di2}{dt} + w_2\frac{d\Phi}{dt} + + u_2 = 0 = 0, \qquad (5.58)$$

где u_2 – напряжение на нагрузке.

Применим метод расчёта по действующим значениям и заменим несинусоидальные токи, напряжения и магнитный поток эквивалентными синусоидальными токами, напряжениями и магнитным потоком. После этого, можно будет применить комплексный метод расчёта, построить векторные диаграммы, нарисовать схемы замещения получить соотношения между входными и выходными токами и напряжения. Перейдём от уравнений (5.55) - (5.58) к уравнениям в комплексной форме записи:

$$U_1 = U_{r1} + U_{\sigma1} + U'_1, \qquad (5.59)$$

$$U_{r2} + U_{\sigma2} + U'_2 + U_2 = 0, \qquad (5.60)$$

или

$$U_1 = r_1\, I_1 + j\omega L_{\sigma1}I_1 + jw_1\, \Phi_m/\sqrt{2}, \qquad (5.61)$$

$$0 = r_2\, I_2 + j\omega L_{\sigma2}I_2 + jw_2\, \Phi_m/\sqrt{2} + U_2. \qquad (5.62)$$

Для уравнений идеализированного трансформатора в уравнениях (5.61) и (5.62) пренебрегают величинами сопротивлений в силу их малости: $r_1 = 0$, $r_2 = 0$, $x_{\sigma1} = \omega L_{\sigma1} = 0$ и $x_{\sigma2} = \omega L_{\sigma2}$. Тогда, можно записать:

$$U_1 = jw_1\, \Phi_m/\sqrt{2}, \qquad (5.63)$$

$$U_2 = -jw_2\, \Phi_m/\sqrt{2}. \qquad (5.64)$$

Перепишем уравнения (5.63) и (5.64) для модулей действующих значений напряжений на входе и выходе трансформатора:

$$U_1 = w_1\, \Phi_m/\sqrt{2}, \qquad (5.65)$$

$$U_2 = w_2\, \Phi_m/\sqrt{2}. \qquad (5.66)$$

Разделим уравнение (5.65) на (5.66):

$$U_1/U_2 = w_1/w_2\,. \qquad (5.67)$$

Пропорциональное соотношение (5.67) может быть использовано для определения числа витков вторичной обмотки при заданных значениях входного U_1 и выходного U_2 напряжений, заданном значении максимальной индукции B_m для выбранного материала магнитопровода. По формуле (5.54) определим число витков первичной обмотки по формуле

$$w_1 = U_1/(4{,}44fSB_m),$$

затем, подставим значения заданных напряжений U_1 и U_2, а также найденное значение числа витков первичной обмотки w_1 в соотношение (5.67), и определим требуемое число витков вторичной обмотки w_2.

Для идеального трансформатора из выражения (5.65) следует, что основной магнитный поток Φ_m не зависит от режима работы трансформатора, и определяется только входным напряжением U_1. Т.е. для режима холостого хода и нагрузочном режиме основной магнитный поток остаётся постоянным. Отсюда следует, что магнитодвижущая сила первичной обмотки F_1 будет одной и той же в этих режимах.

Для режима холостого хода ($I_{20} = 0$) идеального трансформатора можно записать соотношения:

$$F_{10} = w_1 I_{10}, \qquad (5.68)$$

$$F_{20} = w_2 I_{20} = 0.$$

В нагрузочном режиме сумма магнитодвижущих сил F_{10} и F_{20} создаёт тот же основной магнитный поток, поэтому справедливы выражения:

$$F_{10} = F_1 + F_2$$

или

$$w_1 I_{10} = w_1 I_1 + w_2 I_2. \qquad (5.69)$$

Из решения уравнения (5.69) найдем вектор тока первичной обмотки:

$$I_1 = I_{10} + I'_2, \qquad (5.70)$$

где введено обозначение для приведённого тока (ток вторичной обмотки приведён к первичной обмотке)

$$I'_2 = - w_2 I_2 / w_1. \qquad (5.71)$$

У реальных трансформаторов значение тока холостого I_{10} незначительно по сравнению с током в нагрузочном режиме, поэтому им можно пренебречь, и выражение (5.70) можно представить в виде:

$$I_1 = I'_2. \qquad (5.72)$$

Из выражения (5.72) с учётом (5.71) запишем соотношение для модулей токов двух обмоток в нагрузочном режиме:

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1. \qquad (5.73)$$

Отметим, что соотношение для модулей токов (5.73) по сравнению с соотношением для модулей напряжений (5.67) будет обратным.

Нарисуем векторную диаграмму трансформатора. На комплексной плоскости реализуем комплексные уравнения (5.59)–(5.62), (5.70) и (5.71) с учётом построенной ранее векторной диаграммы для катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 5.35). Для определённости примем, что нагрузка трансформатора носит индуктивный характер $\underline{Z}_н = r_н + jx_н = Z_н e^{j\varphi_2}$, т.е. ток I_2 будет отставать по фазе от напряжения U_2 на угол φ_2.

Построение векторных диаграмм тока и напряжения начато с реализации уравнения (5.62), затем (5.70), далее (5.61) (рис. 5.37).

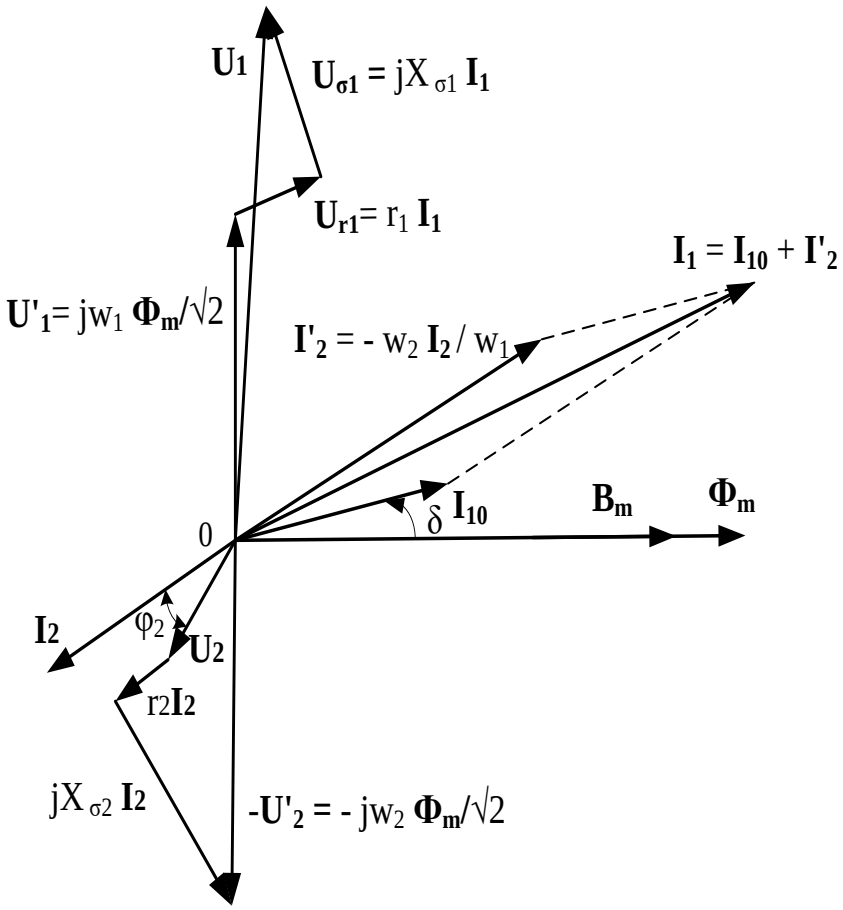


Рис. 5.37. Векторная диаграмма трансформатора

Нарисуем схему замещения трансформатора. Сделаем замену пере (5.63)–(5.67) и (5.71)–(5.73), а также воспользуемся схемой замещения катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 5.34).

Для простоты дальнейших выкладок введём обозначения для полных комплексных сопротивлений первичного и вторичного контуров:

$$\underline{Z}_1 = r_1 + j\,\omega\,L_{\sigma 1} = r_1 + jx_{\sigma 1};\ \underline{Z}_2 = r_2 + j\,\omega\,L_{\sigma 2} = r_2 + jx_{\sigma 2};$$

$$\underline{Z}_{ст} = r_{ст} + jx_{ст};\ \underline{Z}_н = r_н + jx_н.$$

Тогда уравнения (5.59) и (5.60) можно переписать в виде:

$$U_1 = \underline{Z}_1 I_1 + U'_1, \qquad (5.74)$$

$$\underline{Z}_2 I_2 + \underline{Z}_н I_2 + U'_2 = 0. \qquad (5.75)$$

В уравнении (5.75) сделаем замены переменных I_2 и U'_2 на I'_2 и U'_1 с помощью соотношений:

$$I_2 = - w_1 I'_2 / w_2 \text{ и } U'_2 = - w_2\,'_1 / w_1.$$

Перепишем уравнение (5.75) с учётом подстановки:

$$- I'_2\,\underline{Z}_2\,w_1 / w_2 - I'_2\,\underline{Z}_н\,w_1 / w_2 - U'_1\,w_2 / w_1 = 0. \qquad (5.76)$$

Умножим левую и правую части уравнения (5.76) на дробь w_1 / w_2:

$$- I'_2\,\underline{Z}_2\,(w_1 / w_2)^2 - I'_2\,\underline{Z}_н\,(w_1 / w_2)^2 - U'_1 = 0. \qquad (5.77)$$

Введём приведённые комплексные сопротивления вторичного контура к первичному контуру:

$$\underline{Z}'_2 = - \underline{Z}_2\,(w_1 / w_2)^2 \text{ и } \underline{Z}'_н = - \underline{Z}_н\,(w_1 / w_2)^2. \qquad (5.78)$$

С учётом (5.78) уравнение для вторичного контура примет вид:

$$\underline{Z}'_2 I'_2 + \underline{Z}'_н\,I'_2 - U'_1 = 0. \qquad (5.79)$$

Составим полную систему уравнений, записанную из уравнений (5.74), (5.79) и (5.70), по которой нарисуем схему замещения трансформатора (рис. 5.38):

$$U_1 = \underline{Z}_1\,I_1 + U'_1,$$

$$\underline{Z}'_2 I'_2 + \underline{Z}'_н\,I'_2 - U'_1 = 0.$$

$$I_1 = I_{10} + I'_2.$$

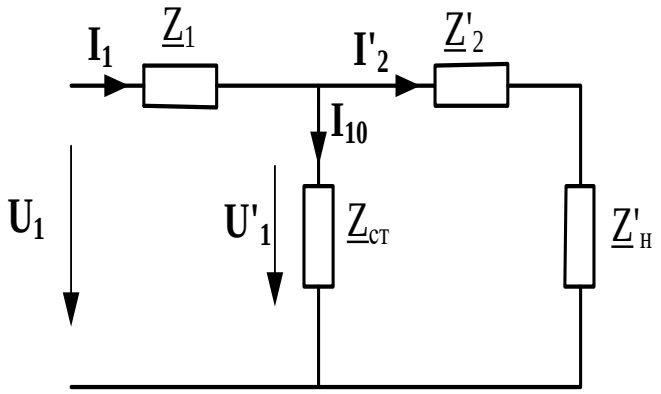


Рис. 5.38. Схема замещения трансформатора

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Феррорезонанс напряжения»

Цель работы

Исследование явления феррорезонанса напряжения при последовательном соединении нелинейной катушки индуктивности и линейной переменной ёмкости при неизменной частоте питающей сети.

Краткие теоретические сведения

Электрические цепи, содержащие нелинейную индуктивную катушку и линейный конденсатор, а также цепи с линейной индуктивной катушкой и нелинейным конденсатором называются феррорезонансными цепями. Для анализа явлений в таких цепях используют графические (или аналитические) методы расчёта по первым гармоникам токов и напряжений или по действующим значениям. В методе расчёта по действующим значениям несинусоидально изменяющиеся токи и напряжения заменяют их эквивалентными (в смысле действующих значений) синусоидальными переменными и используют ВАХ нелинейных элементов для действующих значений токов и напряжений.

Основные этапы расчёта этим методом в графическом варианте:

1. Расчётным или опытным путём построить ВАХ нелинейного элемента по действующим значениям $U_{НЭ} = f(I_{НЭ})$.

2. Используя символический метод расчета, произвольно, по полученной ранее ВАХ, зная действующее значение тока $I_{НЭ}$ (или напряжения $U_{НЭ}$), определить действующие значения напряжений (или токов) на всех элементах схемы, включая входное напряжение. При этом на нелинейных элементах учитывать сдвиги фаз так же, как на аналогичных линейных элементах.

3. Повторить расчёт п. 2 пять-семь раз и построить требуемую ВАХ.

Проведём анализ последовательной феррорезонансной цепи, изображённой на рисунке 17.1, а.

Для указанной электрической цепи задана ВАХ нелинейной катушки $U_{НК}(I)$ (рис. 17.1, б, кривая 1) и значения r, C.

Построение ВАХ всей цепи U(I) осуществляем в следующем порядке:

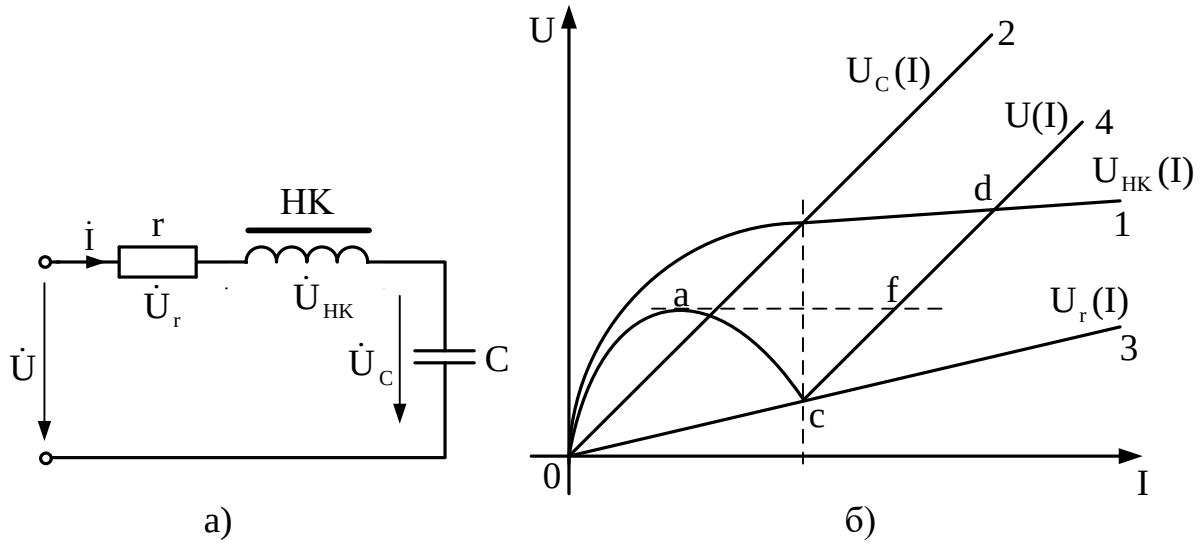


Рис. 17.1. Последовательная феррорезонансная цепь

1. Строим ВАХ линейного ёмкостного и резистивного элементов. Для этого произвольно задаём действующее значение тока в цепи и определяем значения напряжения на ёмкостном U_C и резистивном U_r элементах по формулам:

$$\mathbf{U_C} = \mathbf{I}\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\omega}\mathbf{C}};\ \mathbf{U_r} = \mathbf{Ir}\,. \qquad (17.1)$$

Так как ВАХ линейных элементов линейна, то достаточно найти напряжения при двух значениях тока в цепи. Например, на рисунке 17.1, б построены ВАХ ёмкостного элемента $U_C(I)$ (график 2) и резистивного элемента $U_r(I)$ (график 3).

2. Построим ВАХ всей цепи U(I). Для этого зададимся несколькими произвольными значениями тока I (достаточно пять-семь значений) и из графиков $U_{НК}(I)$, $U_C(I)$, $U_r(I)$ определяем значения напряжения на резистивном, ёмкостном и индуктивном элементах, соответствующие каждому значению тока.

Для определения действующего значения напряжения на входе цепи составим уравнения по второму закону Кирхгофа в комплексном виде

$$\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{r} + \dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{нк}} + \dot{\mathbf{U}}_\mathbf{C} = \dot{\mathbf{U}}\,. \qquad (17.2)$$

Реализуем уравнение (17.2) на комплексной плоскости для каждого заданного значения тока и определим напряжение U. На рисунке 17.2 приведены векторные диаграммы для случая $U_{НК} > U_C$ (рис. 17.2, а) и $U_{НК} < U_C$ (рис. 17.2, б).

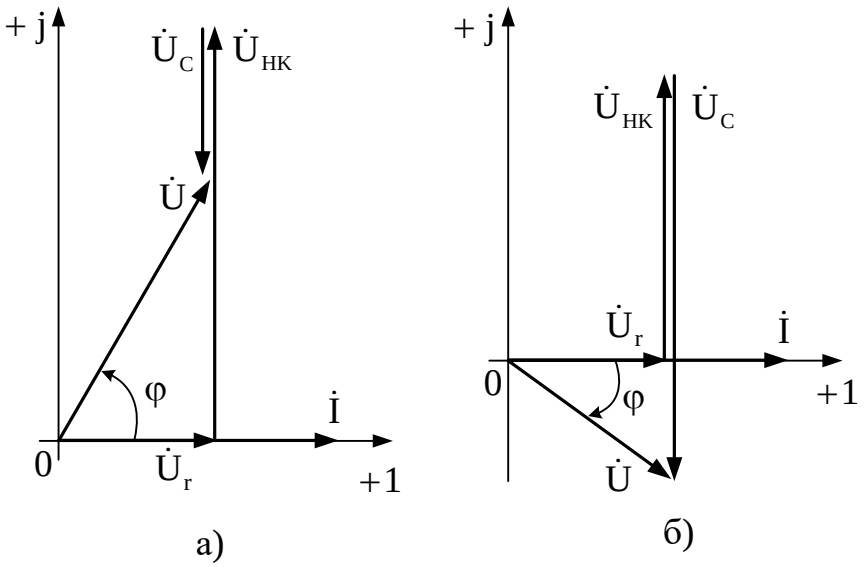


Рис. 17.2. Векторные диаграммы при $U_{НК} > U_C$ (а) и $U_{НК} < U_C$ (б)

Полученные значения входного напряжения и соответствующие им значения токов заносим в таблицу и строим ВАХ всей цепи U(I) – график 4, рисунок 17.1, б.

Как видно из графика 4 рисунка 17.1, б, результирующая ВАХ цепи U(I) имеет N-образную форму. При сравнительно малом r на ВАХ цепи имеется падающий участок ac. На этом участке с уменьшением напряжения U растёт ток I , а с повышением напряжения ток уменьшается. Падающий участок ac соответствует неустойчивому режиму работы последовательной феррорезонансной цепи. С увеличением r падающий участок на ВАХ исчезает.

На рисунке 17.3 отдельно представлена ВАХ последовательной феррорезонансной цепи U(I) (кривая 4, рис. 17.1, б).

При непрерывном увеличении напряжения на входе цепи (рис. 17.1, а) от нуля до значения U_a ток плавно увеличивается от нуля до значения I_a (участок 0a, рис. 17.3).

При дальнейшем самом малом увеличении входного напряжения $U > U_a$ ток в цепи изменяется скачком от значения I_a до значения I_f – наблюдается триггерный эффект. Затем с увеличением напряжения ток плавно растёт (участок fd, рис. 17.3).

При уменьшении входного напряжения ток плавно уменьшается до значения $\dot{I}_c$ (участок dc, рис. 17.3).

При значении напряжения $U = U_C$ ток скачком уменьшается до значения I_b и затем плавно падает (участок b0, рис. 17.3).

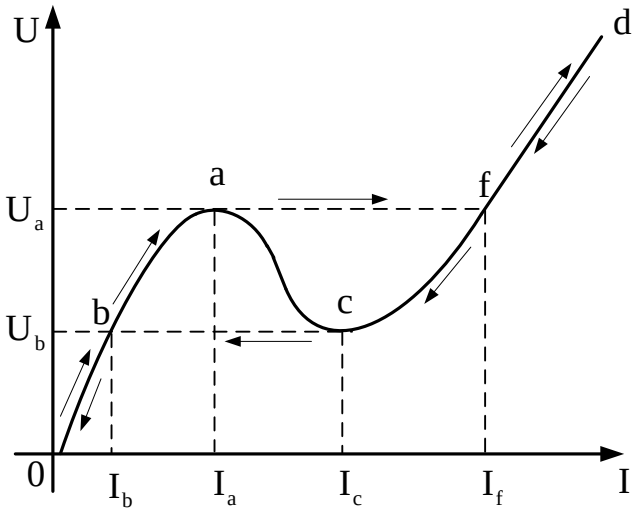


Рис. 17.3. ВАХ последовательной феррорезонансной цепи U(I)

Скачкообразное изменение тока (участки af, cb) сопровождается изменением угла сдвига фаз между током и общим напряжением. В точке a напряжение на нелинейной индуктивной катушке больше напряжения на ёмкости ($U_{НК} > U_C$), и потому ток $\dot{I}$ отстает от напряжения $\dot{U}$ (векторная диаграмма на рис. 17.2, а). В точке f напряжение на нелинейной индуктивной катушке меньше напряжения на ёмкости, потому ток опережает напряжение (векторная диаграмма на рис. 17.2, б).

Феррорезонансом напряжений называют режим работы цепи (рис. 17.1, а), при котором первая гармоника тока в цепи совпадает по фазе с напряжением источника питания. Феррорезонанс напряжений соответствует точке c на ВАХ всей цепи (рис. 17.3), для которой характерно равенство напряжений на нелинейной катушке индуктивности и линейной ёмкости $U_{НК} = U_C$.

Достичь феррорезонанса напряжений можно путём изменения напряжения или частоты источника питания цепи, а также путём изменения ёмкости и параметров катушки со стальным сердечником.

Схема компонентной цепи

Схема компонентной цепи для измерения ВАХ нелинейной катушки представлена на рисунке 17.4.

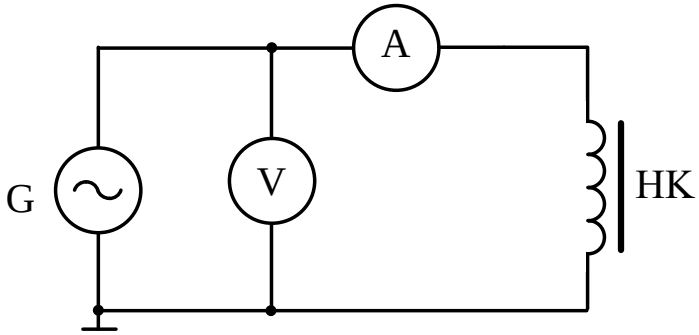


Рис. 17.4. Электрическая схема лабораторной работы для исследования ВАХ нелинейной катушки индуктивности

Схема компонентной цепи для проведения эксперимента представлена на рисунке 17.5.

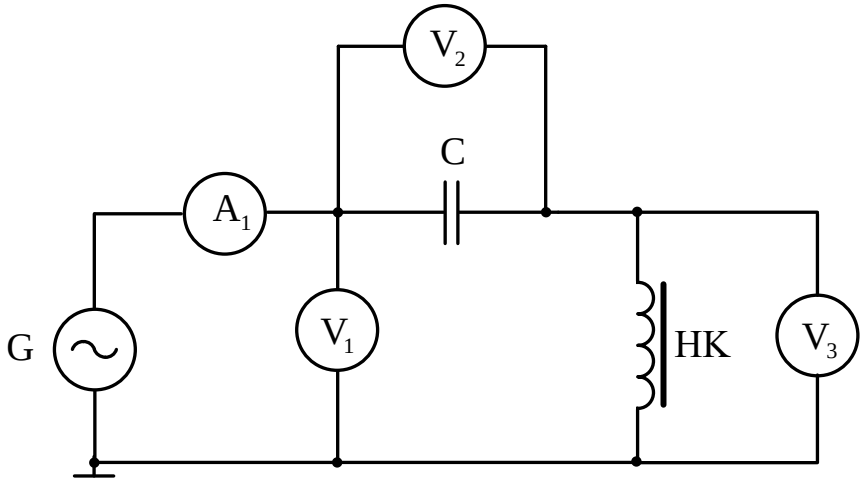


Рис. 17.5. Электрическая схема лабораторной работы (R_1 = 1 кОм, C_1 = 300 нФ)

Порядок проведения работы

Основные измерения

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 17.6 или открыть файл lab17_1_toe.ms10.

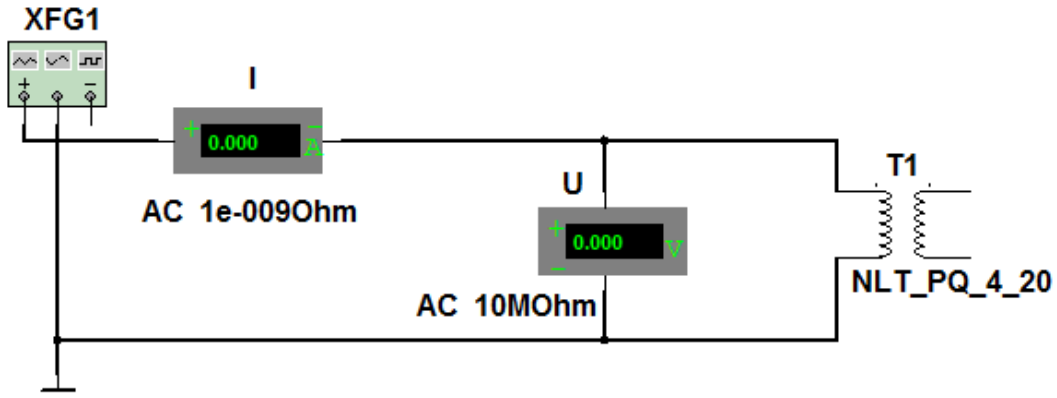


Рис. 17.6. Схема для исследования ВАХ нелинейной катушки индуктивности

2. Дважды щелкнуть по нелинейной катушке NLT_PQ_4_20, открыть вкладку Value, далее Edit Model. В открывшемся окне установить настройки в соответствии с рисунком 17.7.

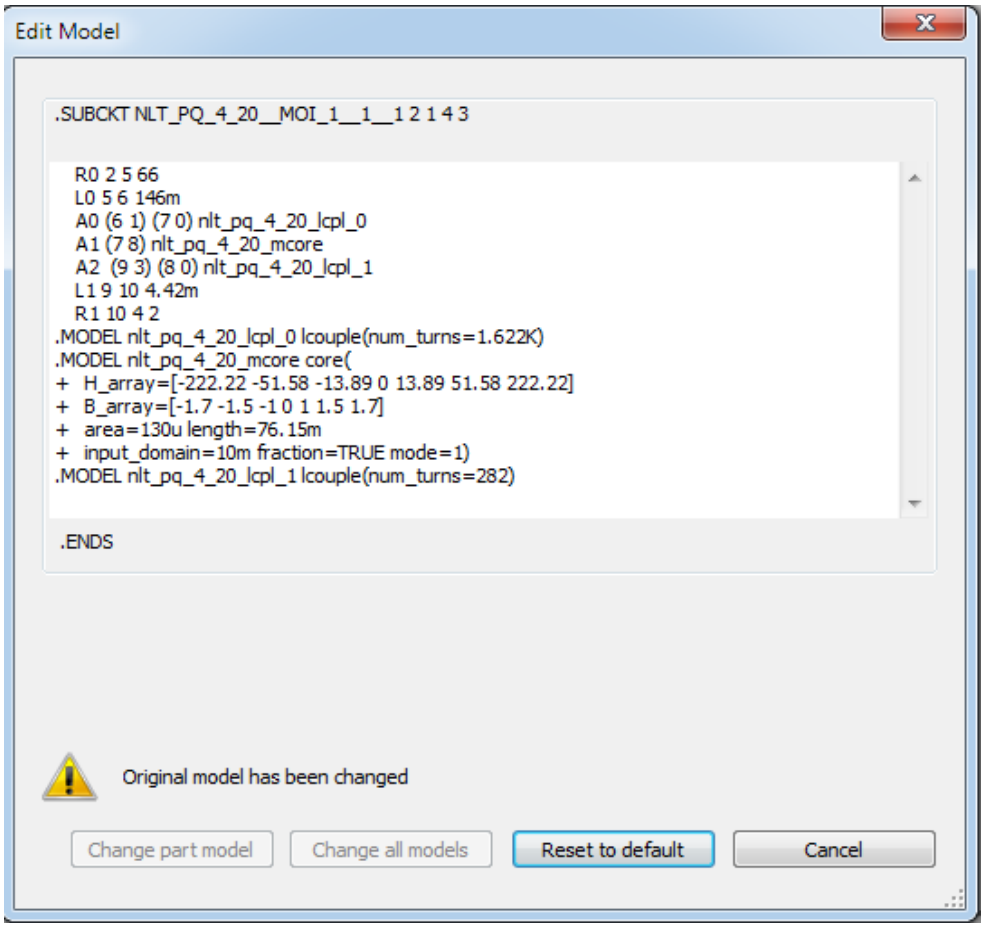


Рис. 17.7. Параметры нелинейной катушки

3. Открыть генератор, установить параметры: тип сигнала – синусоидальный, частота – 50 Гц, амплитуда – 2 В.

4. Плавно изменяя величину входного напряжения от 2 В до 180 В, записать показания приборов в таблицу 17.1.

Таблица 17.1

Результаты эксперимента. ВАХ нелинейной катушки

$U_{НК}$	В														
I	А														

5. Собрать схему рисунка 17.8 или открыть файл lab17 _2_toe.ms10.

6. Открыть генератор, установить параметры: тип сигнала – синусоидальный, частота – 50 Гц, амплитуда – 2 В.

7. Открыть осциллограф, установить масштаб по времени и амплитуде достаточно удобный для наблюдения сигнала.

8. Включить моделирование; в установившемся режиме работы цепи, увеличивая амплитуду напряжение на входе U от 2 В до 100 В, найти величину напряжения U_a, при которой происходит скачкообразное увеличение тока от I_a до I_f (в соответствии с рисунком 17.3); снять показания приборов в таблицу 17.2; кнопку STOP SIMULATION не нажимать до конца эксперимента!

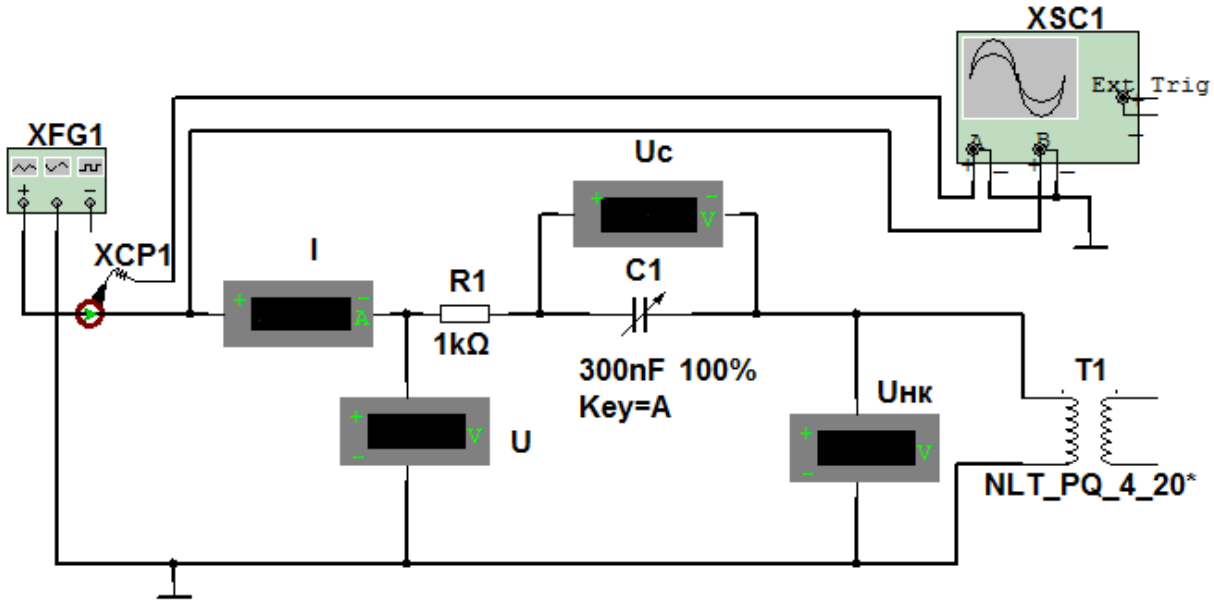


Рис. 17.8. Схема исследуемой цепи

9. Затем, плавно снижая входное напряжение от 100 В до 2 В, зафиксировать значения переменных в момент скачкообразного изменения тока I_c до I_d; записать показания приборов в таблицу 17.2.

Таблица 17.2

Результаты эксперимента

Режим работы	Измерено	U	I	U_C	$U_{НК}$
		В	А	В	В
При повышении напряжения	1	2			
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14	100			
При понижении напряжения	1	100			
	2				
	3				
	4				

	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				
	13				
	14	2			

Дополнительные измерения

Снять осциллограммы напряжения в моменты:

а) скачкообразного увеличение тока от I_a до I_f;

б) скачкообразного изменения тока I_c до I_d.

Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 17.1 построить ВАХ нелинейной катушки.

2. По данным таблицы 17.2 построить полученную опытным путём ВАХ всей цепи $U_{вх}(I)$ и теоретическую зависимость $U_{вх}(I)$. Для построения теоретической зависимости U(I) использовать графики $U_{НК}(I)$, $U_r(I)$, $U_C(I)$ и формулу

$$U_{вх}(I) = \left| U_{НК}(I) - U_C(I) + U_r(I) \right|. \qquad (17.3)$$

3. По данным таблицы 17.1 построить две векторные диаграммы напряжения: до и после скачка тока. При построении использовать метод засечек: выбирают масштабы тока и напряжения m_I, m_V; строят вектор тока $\dot{\mathbf{I}}$; вектор напряжения на ёмкостном элементе $\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{C}$ строят отстающим по фазе от вектора тока $\dot{\mathbf{I}}$ на 90º; циркулем из конца вектора $\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{C}$ проводят дугу окружности радиусом, равным значению $U_{НК}$, а из начала вектора $\dot{\mathbf{U}}_\mathbf{C}$ – дугу окружности радиусом, равным $U_{вх}$; точка пересечения окружностей даёт вершину треугольника напряжений. На рисунке 17.9 приведён пример построения векторной диаграммы напряжений.

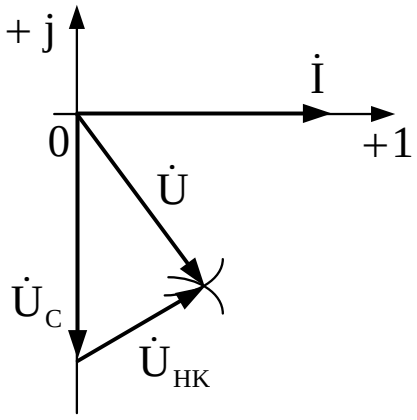


Рис. 17.9. Векторная диаграмма напряжений

Построить теоретическую векторную диаграмму напряжений для режима феррорезонанса напряжений (точка c, рис. 17.3).

4. Построить график зависимости $U_{НК}(U)$ по данным таблицы 17.2 (рис. 17.10).

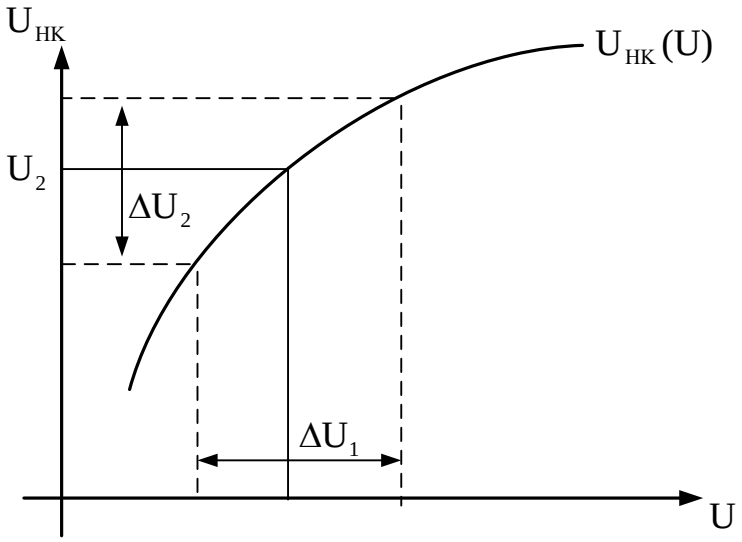


Рис. 17.10. Построить график зависимости $U_{НК}(U)$

Рассматривая схему рисунка 17.7 как схему простейшего стабилизатора напряжения при снятии выходного напряжения с нелинейной катушки индуктивности, определить коэффициент стабилизации по формуле

$$K_C = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}}, \qquad (17.6)$$

где числовые значения U_1, ΔU задаются преподавателем.

Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. В каких электрических цепях может возникнуть феррорезонанс напряжений?
3. При каких значениях параметров может возникнуть феррорезонанс напряжений?
4. За счет чего отличается реальная зависимость U(I) от теоретической. Пояснить по построенным графикам и векторным диаграммам.
5. По результирующей ВАХ постройте зависимость $r_{диф}$ от тока.
6. В чем заключается суть триггерного эффекта?
7. На экспериментальной кривой U(I) указать точку «резонанса».
8. Пояснить принцип работы простейшего стабилизатора напряжения.

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты

«Феррорезонанс тока»

Цель работы

Исследование явления феррорезонанса тока при параллельном соединении нелинейной катушки индуктивности и линейной переменной емкости при неизменной частоте питающей сети.

Краткие теоретические сведения

Феррорезонанс токов возникает при параллельном соединении нелинейной катушки индуктивности и линейного емкостного элемента.

Проведем анализ параллельной феррорезонансной цепи, изображенной на рисунке 18.1, **а**.

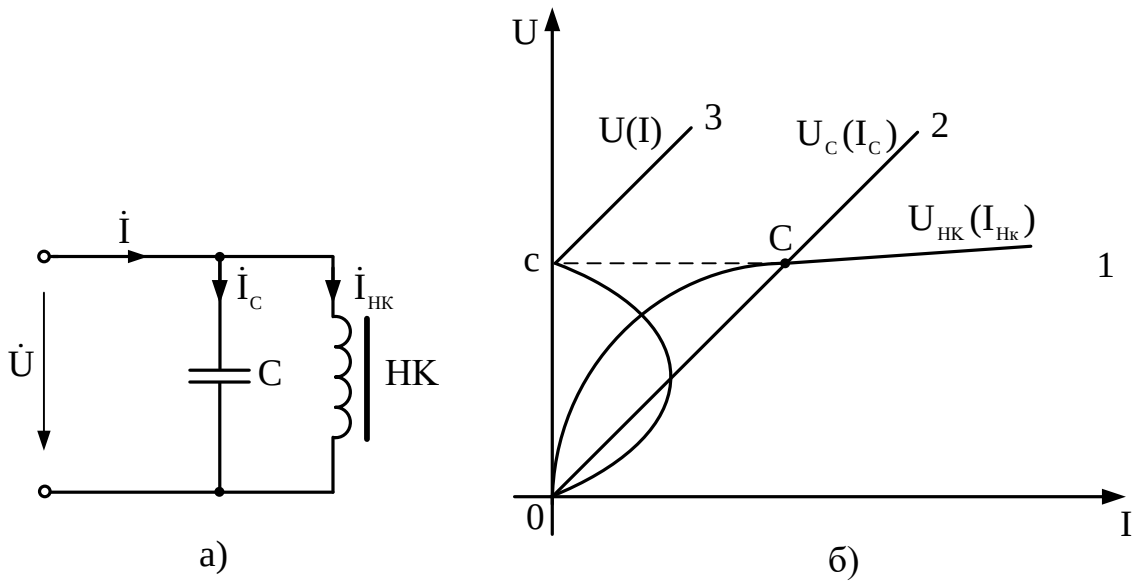


Рис. 18.1. Параллельная феррорезонансная цепь

Вольт-амперная характеристика линейного емкостного элемента – это прямая, проходящая через начало координат (график **2** на рисунке 18.1, **б**) параллельной феррорезонансной цепи **U(I)**.

Расчет осуществляем в следующем порядке:

1. Задаемся несколькими произвольными значениями напряжения на входе цепи.

2. Из графиков **Uнк(Iнк)** и **Uс(Iс)** определяем токи в параллельных ветвях **Iс** и **Iнк**, соответствующие заданным значениям напряжения.

3. Составляем уравнение по первому закону Кирхгофа и реализуем его на комплексной плоскости:

$$\dot{\mathbf{I}} = \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{НК}} + \dot{\mathbf{I}}. \qquad (18.1)$$

На рисунке 18.2 приведены векторные диаграммы токов для случаев: **Iс > Iнк** (рис. 18.2, **а**) и **Iс < Iнк** (рис. 18.2, **б**). Так как токи $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{C}}$ и $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{нк}}$ находятся в противофазе, то ток в неразветвленной части цепи определяется как арифметическая разность **Iнк** и **Iс**:

$$\mathbf{I} = \left|\mathbf{I}_{\mathbf{НК}} - \mathbf{I}_{\mathbf{C}}\right|. \qquad (18.2)$$

4. По заданным значениям напряжения на входе цепи **U** и полученным значениям тока неразветвленной части цепи **I** строим ВАХ **U(I)** – график **3** на рисунке 18.1, **б**.

Феррорезонанс токов имеет место при равенстве токов **Iс** и **Iнк** (точка **с** на графике **3**, рис. 18.1, **б**).

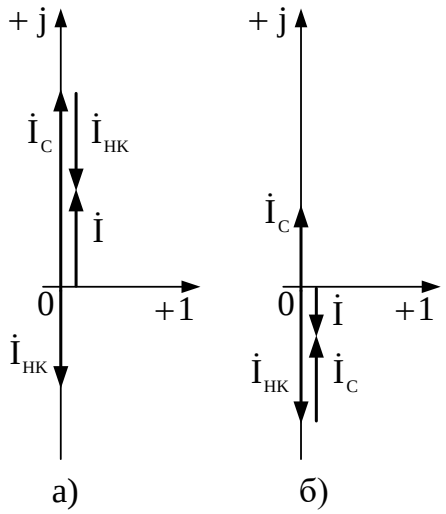


Рис. 18.2. Веторные диаграммы токов: $I_C > I_{НК}$ (а) и $I_C < I_{НК}$ (б)

На рисунке 18.3 повторена ВАХ параллельной феррорезонансной цепи с учетом того, что в режиме феррорезонанса ток **I** в неразветвленной части цепи не снижается до нуля за счет высших гармоник и активной составляющей первой гармоники в токе $\mathbf{I_{НК}}$.

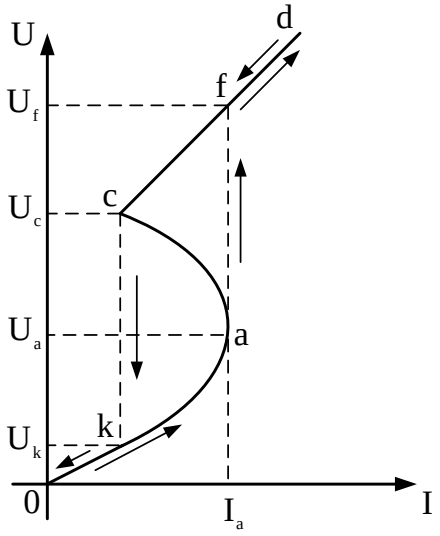


Рис. 18.3. ВАХ параллельной феррорезонансной цепи U(I)

Если схему рисунка 18.1, **а** запитывать от источника тока, то при плавном увеличении тока этого источника от нуля до значения $\mathbf{I = I_a}$, напряжение будет плавно увеличиваться от $\mathbf{U = 0}$ до $\mathbf{U = U_a}$ (участок **oa** на графике, рис. 18.3).

При дальнейшем незначительном увеличении тока источника напряжение изменится скачком от значения $\mathbf{U_a}$ до значения $\mathbf{U_f}$, после этого напряжение плавно растет (участок **fd**, рис. 18.3).

При плавном уменьшении тока источника напряжение плавно уменьшается до значения $\mathbf{U_C}$ (участок **dc**, рис. 18.3), затем скачком уменьшается до значения $\mathbf{U_K}$ и далее плавно уменьшается (участок **ko**, рис. 18.4).

Если цепь (рис. 18.1, **а**) подключить к источнику напряжения и плавно увеличить напряжение источника, то ток неразветвленной части цепи будет изменяться без скачков в соответствии с ВАХ **U(I)** (рис. 18.3, кривая **oa** с **fd**). Таким образом, триггерный эффект в параллельной феррорезонансной кривой можно наблюдать только при подключении цепи к источнику тока.

Схема компонентной цепи

Схема компонентной цепи для измерения ВАХ нелинейной катушки представлена на рисунке 18.4.

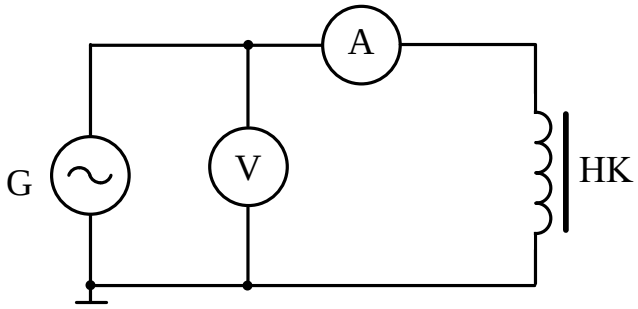


Рис. 18.4. Электрическая схема лабораторной работы для исследования ВАХ нелинейной катушки индуктивности

Схема компонентной цепи для проведения эксперимента представлена на рисунке 18.5.

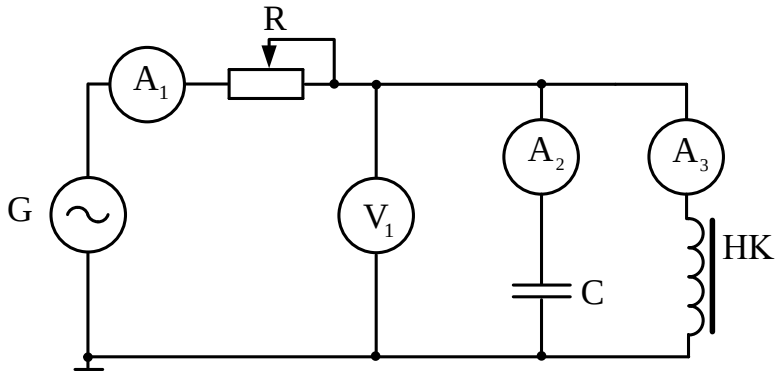


Рис. 18.5. Электрическая схема лабораторной работы
(R_1 = 150 кОм, C_1 = 300 нФ)

Порядок проведения работы

Основные измерения

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 18.6 или открыть файл lab18_1_toe.ms10.

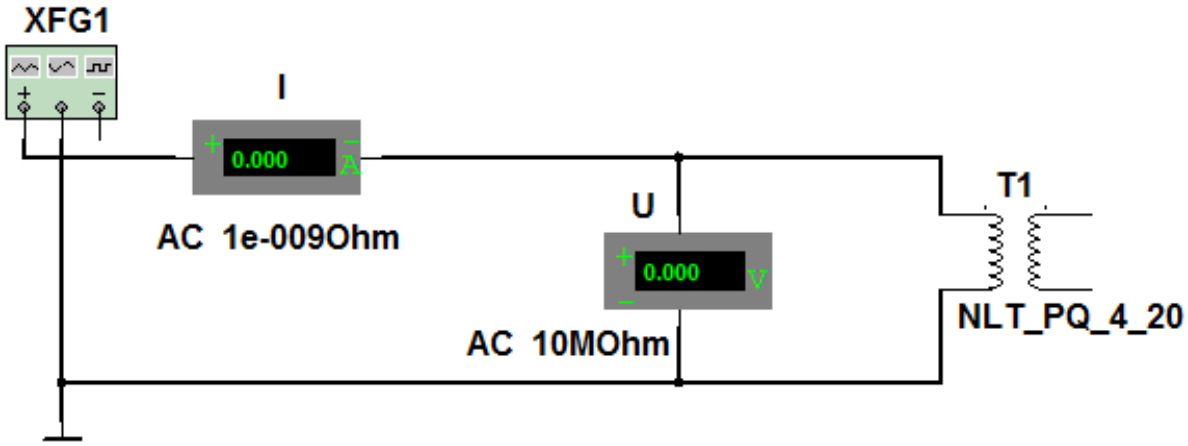


Рис. 18.6. Схема для исследования ВАХ нелинейной катушки индуктивности

2. Дважды щелкнуть по нелинейной катушке NLT_PQ_4_20, открыть вкладку Value, далее Edit Model. В открывшемся окне установить настройки в соответствии с рисунком 17.7.

3. Двойным щелчком мыши открыть генератор, установить параметры: тип сигнала – синусоидальный, частота – 50 Гц, амплитуда – 2 В.

4. Плавно изменяя величину входного напряжения от 2 В до 180 В, записать показания приборов в таблицу 18.1.

Таблица 18.1

Результаты эксперимента. ВАХ нелинейной катушки

Uнк	В														
I	А														

5. Собрать схему рисунка 18.7 или открыть файл lab18 _2_toe.ms10.

6. Открыть генератор, установить параметры: тип сигнала – синусоидальный, частота – 50 Гц, амплитуда – 150 В.

7. Открыть осциллограф, установить масштаб по времени и амплитуде достаточно удобный для наблюдения сигнала; открыть свойства переменного резистора R_1, установить шаг изменения величины сопротивления (вкладка value, параметр increment) – 1 %.

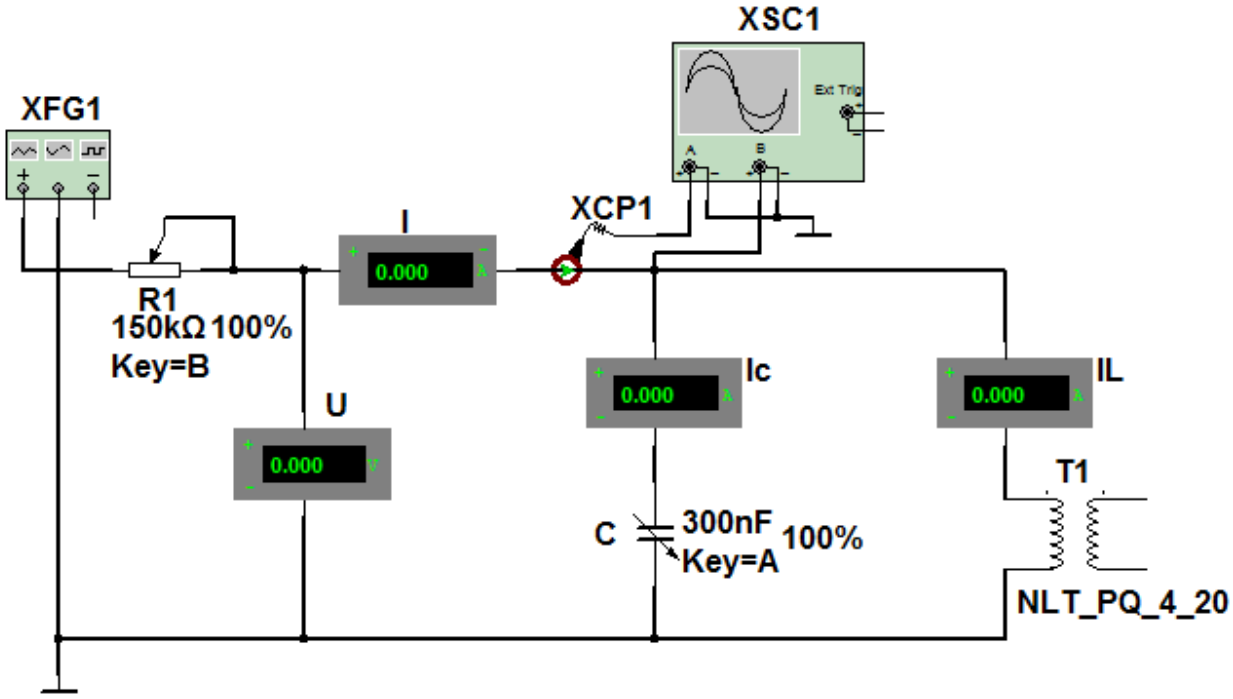


Рис. 18.7. Схема исследуемой цепи

8. Включить моделирование; в установившемся режиме, уменьшая величину сопротивления переменного резистора с помощью управляющей клавиши, найти величину тока I_a, при которой происходит скачкообразное увеличение напряжения от U_a до U_f (в соответствии с рис. 18.3); записать показания приборов в таблицу 18.2; кнопку **STOP SIMULATION** не нажимать до конца эксперимента!

9. Затем плавно увеличивая величину сопротивления переменного резистора с помощью управляющей клавиши, зафиксировать значения переменных в момент скачкообразного изменения напряжения U_c до U_k; записать показания приборов в таблицу 18.2.

Дополнительные измерения

Снять осциллограммы напряжения в моменты:
а) скачкообразного увеличение напряжения от U_a до U_f;
б) скачкообразного изменения напряжения U_c до U_k.

Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 18.1 построить ВАХ нелинейной катушки.

2. По данным таблицы 18.2 построить полученную опытным путём ВАХ всей цепи $I(U_{вх})$ и теоретическую зависимость $I(U_{вх})$. Для построения теоретической $I(U_{вх})$ использовать графики $I(U_{НК})$, $I(U_C)$ и формулу

$$I_p(U) = |I_{НК}(U) - I_C(U)|.$$

Сделать анализ полученных зависимостей.

3. Построить две векторные диаграммы токов до и после скачка напряжения. Построить векторную диаграмму для точки резонанса.

Таблица 17.2

Результаты эксперимента

Режим работы	Измерено	R_1	U	I	I_C	$I_{НК}$
		%	В	А	А	А
При уменьшении сопротивления переменного резистора	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					
	9					
	10					
	11					
	12					
	13					
	14					
При увеличении сопротивления переменного резистора	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					
	8					

	9						Контрольные вопросы
	10						
	11						
	12						
	13						
	14						

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. В каких электрических цепях может возникнуть явление феррорезонанса тока?
3. При каком условии может возникнуть явление феррорезонанса тока?

Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты
«Электрическое поле в проводящих средах»
Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты
«Магнитное поле постоянного тока»
Образец заданий для выполнения лабораторных работ и примерный перечень вопросов для их защиты
«Поверхностный эффект в пластине»

Лабораторная работа 1

«Моделирование электростатического поля в пространстве

вокруг проводов двухпроводной

линии электропередач»

Цель работы:

1. Получить картину электростатического поля в металлическом листе с двумя круглыми клеммами (электродами).
2. С помощью этой картины смоделировать картину электростатического поля в пространстве вокруг проводов двухпроводной ЛЭП.
3. Определить напряженность электрического поля в точке, заданной преподавателем.

Краткие теоретические сведения

Графическое изображение электростатического поля (картина поля)

Картина электростатического поля это совокупность силовых линий вектора напряженности электрического поля E и перпендикулярных к ним эквипотенциальных поверхностей.

Силовая линия вектора E это линия, проведенная в пространстве так, что в каждой точке линии вектор E направлен по касательной к линии. Силовые линии вектора E начинаются на положительно заряженных, а заканчиваются на отрицательно заряженных телах, создающих поле.

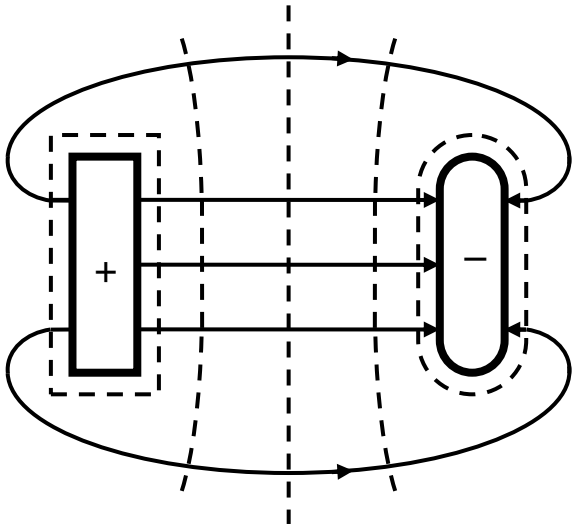
Эквипотенциальная поверхность это поверхность, проведенная в пространстве так, что в каждой точке данной поверхности потенциал поля φ одинаков.

Перпендикулярность силовых линий и эквипотенциальных поверхностей следует из формулы связи E и φ :

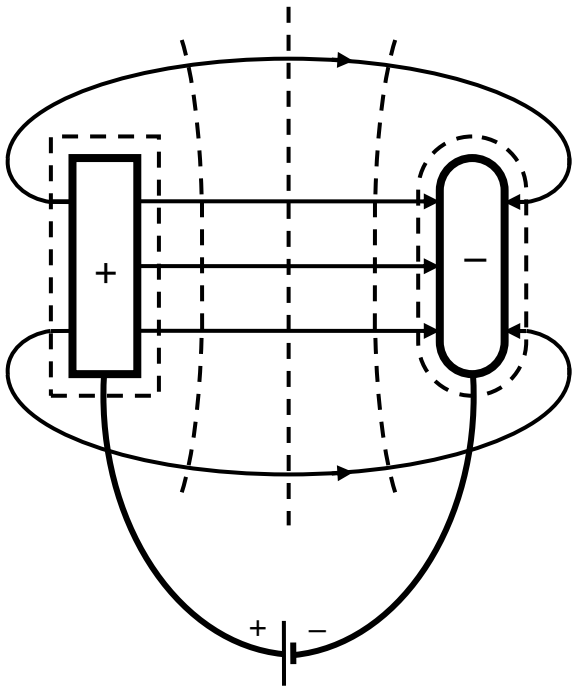
$$E = -\operatorname{grad} \varphi .$$

Картина электростатического поля в пространстве вокруг двух заряженных электродов произвольной формы

Потенциал электростатического поля в пространстве вокруг двух заряженных электродов, как в случае а), так и в случае б) (Рис. 1)удовлетворяет уравнению Лапласа. Решения этого дифференциального уравнения второго порядка по координатам определяются граничными условиями на границах раздела сред. В обоих случаях граница раздела сред совпадает с поверхностью электродов. Если форма, размеры электродов и расстояния между электродами в обоих случаях одинаковы, то граничные условия в случаях а) и б) оказываются похожими. Похожими оказываются и картины электростатического поля в обоих случаях. А если еще и разности потенциалов между электродами одинаковы в случаях а) и б), то картины электростатического поля в обоих случаях одинаковы.



а) заряженные электроды находятся в непроводящей среде (вакууме, воздухе)



б) заряженные электроды находятся в проводящей среде (например, в электролите или, как в настоящей работе, электроды из металла с малым удельным сопротивлением окружены металлической средой с большим удельным сопротивлением)

Рис. 1. Картина электростатического поля в пространстве между двумя заряженными электродами.

Закон Ома в дифференциальной форме

Этот закон справедлив в любой точке проводящей среды и записывается в виде

$$j = \gamma E.$$

Здесь

j – вектор плотности тока. В каждой точке проводящей среды этот вектор направлен в ту сторону, куда движутся (двигались бы) положительные заряды в этой точке, участвующие в протекании тока. В металлической среде отрицательные заряды (свободные электроны) движутся в обратную сторону.

γ - удельная проводимость среды.

Из закона Ома в дифференциальной форме следует, что силовые линии вектора j расположены в пространстве так же, как силовые линии вектора E.

При протекании тока положительные заряды в проводящей среде движутся (двигались бы) по путям вдоль силовых линий векторов j и E. В металлической среде электроны движутся по путям вдоль силовых линий векторов j и E в обратном направлении.

Качественное построение картины электростатического поля в пространстве вокруг двух заряженных электродов произвольной формы

Поверхности электродов эквипотенциальны. Поэтому силовые линии векторов E и j начинаются на поверхности положительного электрода, а заканчиваются на поверхности отрицательного электрода, причем силовые линии в начале и в конце перпендикулярны поверхностям электродов.

Качественно представить картину силовых линий векторов j и E в проводящей среде можно, если представить себе, по каким путям движутся (двигались бы) положительные заряды от положительно заряженного электрода к отрицательному, причем эти пути не пересекаются. После того, как качественно представлено расположение в пространстве силовых линий векторов j и E, можно представить расположение в пространстве эквипотенциальных поверхностей как поверхностей, перпендикулярных силовым линиям в любой точке их пересечения.

В непроводящей среде (случай а) картина электростатического поля (совокупность силовых линий вектора E и эквипотенциальных поверхностей) будет такой же, как и в случае б), если форма, размеры электродов и расстояния между электродами в обоих случаях одинаковы и, кроме того, одинакова разность потенциалов между электродами в обоих случаях.

Моделирование картины электростатического поля в пространстве вокруг проводов ЛЭП постоянного тока

Как видно из рисунков 2 и 3, в плоскости Σ заряженными «электродами» являются сечения проводов. То есть, если диаметры проводов (рис. 2) и диаметры клемм (рис. 3) а также расстояния между проводами и клеммами одинаковы, то картины электростатических полей в плоскости Σ и в металлическом листе с круглыми клеммами оказываются похожими. А если еще и разность потенциалов между проводами и между клеммами одинакова, то картины полей в обоих случаях одинаковы.

Сказанное справедливо, если размеры используемого в работе металлического листа велики (много больше расстояния между клеммами), поскольку мысленно проведенная в пространстве плоскость Σ бесконечно велика.

Таким образом, зная картину электростатического поля в металлическом листе с круглыми клеммами, между которыми протекает постоянный электрический ток, нетрудно представить (смоделировать) картину поля в плоскости Σ. Такое сопоставление будет тем лучше, чем больше геометрические размеры используемого металлического листа.

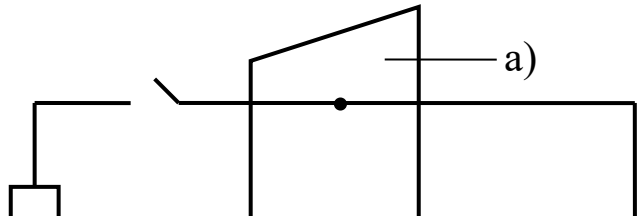
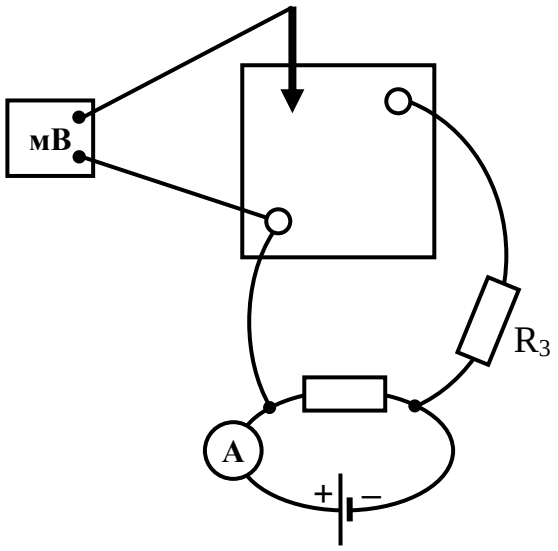


Рис. 2 Схематическое изображение двухпроводной ЛЭП. Один из проводов заряжен положительно, другой отрицательно. Σ - бесконечно большая плоскость, мысленно проведенная перпендикулярно проводам. И, Пр - источник и приемник электрической энергии.



б)

Рис. 3. Металлический лист с круглыми клеммами (электродами), между которыми протекает постоянный электрический ток. Один из электродов заряжен положительно, другой отрицательно. Одна клемма цифрового милливольтметра присоединена к электроду, другая – к зонду.

Если мы мысленно пересечем длинные провода ЛЭП любой другой перпендикулярной проводам плоскостью в месте, удаленном от источника или приемника энергии, в том числе плоскостью, бесконечно близкой к плоскости Σ, то картина поля в этой плоскости будет, очевидно, такой же, как в плоскости Σ. Можно поступить также следующим образом. Зная форму и размеры эквипотенциальных поверхностей в плоскости Σ, (те же, что и в металлическом листе), мы можем мысленно «передвигать» плоскость Σ вдоль проводов, представляя себе общую картину эквипотенциальных поверхностей в пространстве вокруг проводов.

Исследование эквипотенциальных поверхностей в плоскости металлического листа с круглыми клеммами

Для выполнения лабораторной работы собирается схема (Рис.3). Через плоский квадратный лист проводника пропускается постоянный ток. В проводнике возникает электрическое поле. С помощью цифрового милливольтметра и зонда измеряется напряжение между точкой пластины и одной клеммой источника. Перемещая зонд таким образом, чтобы милливольтметр показывал одно и то же значение потенциала, можно

отыскать эквипотенциальную поверхность, точнее – ее сечение горизонтальной поверхностью, по которой перемещается зонд. Поместив зонд в точку поля с другим потенциалом, можно таким же способом отыскать другую эквипотенциальную поверхность и далее исследовать эквипотенциальные поверхности в металлическом листе с круглыми клеммами.

Определение напряженности поля в произвольной точке

Через точку, заданную преподавателем, проведем часть силовой линии вектора E. Это дуга, проходящая через заданную точку между найденными эквипотенциальными поверхностями, между которыми оказалась заданная точка. Начинается дуга на одной из эквипотенциальных поверхностей, а заканчивается на другой поверхности, причем в начале и в конце эта дуга перпендикулярна эквипотенциальным поверхностям. Расстояние между поверхностями (длину дуги) обозначим через Δn. Искомый вектор E в заданной точке направлен по касательной к изображенной части силовой линии в сторону убывания потенциала.

Для приближенного определения модуля вектора напряженности электрического поля воспользуемся декартовой системой координат с началом в рассматриваемой точке. В декартовой системе координат с началом в рассматриваемой точке и осью z, направленной перпендикулярно эквипотенциальной поверхности, проходящей через эту точку, формула связи $E= -\mathrm{grad}\,\varphi$ между напряженностью поля и потенциалом запишется в виде

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}\mathbf{k} \quad .$$

Изменяя мысленно расстояние между эквипотенциальными поверхностями, получим приближенную формулу для определения модуля напряженности электрического поля в рассматриваемой точке

$$\left|\mathbf{E}\right| = E \approx \left|\frac{\Delta \varphi}{\Delta n}\right| = \frac{\left|\varphi_2 - \varphi_1\right|}{\Delta n}.$$

Здесь $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ - разность потенциалов поверхностей, между которыми находится рассматриваемая точка.

Порядок проведения работы

1. Собрать схему (рис. 3).
2. С помощью цифрового милливольтметра и зонда проверить симметрию поля относительно диагоналей квадратного металлического листа.
3. Экспериментально найти несколько эквипотенциальных поверхностей. Изобразить экспериментальные точки на бумаге в клеточку.
4. Пересчитать потенциал (выбором постоянного слагаемого) так, что бы а)потенциал в центре металлического листа был равен нулю, б) потенциал одной из клемм был равен нулю.
5. Изобразить силовые линии вектора E.
6. На основании полученных результатов смоделировать картину электростатического поля в пространстве вокруг проводов двухпроводной ЛЭП.
7. Определить напряженность поля в точке, заданной преподавателем.

При выполнении пункта 6 необходимо учитывать следующее. Из результатов эксперимента, полученных при выполнении пункта 3, видно, что эквипотенциали в плоскости металлического листа с круглыми клеммами (при больших геометрических размерах листа) представляют собой окружности. Центры окружностей не совпадают с центрами клемм. Посередине между клеммами имеется эквипотенциаль в виде прямой линии. Передвигая мысленно плоскость Σ (рис. 2) вдоль проводов, убедимся,

что эквипотенциальные поверхности в пространстве вокруг проводов двухпроводной ЛЭП представляют собой цилиндрические поверхности с осями вдоль проводов. Оси этих поверхностей не совпадают с осями проводов. Посередине между проводами имеется эквипотенциальная поверхность в виде плоскости, параллельной проводам.

Лабораторная работа 2

«Определение коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей в системе заряженных тел»

Цель работы

Найти значения коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей для трех жил трехжильного кабеля.

Краткие теоретические сведения

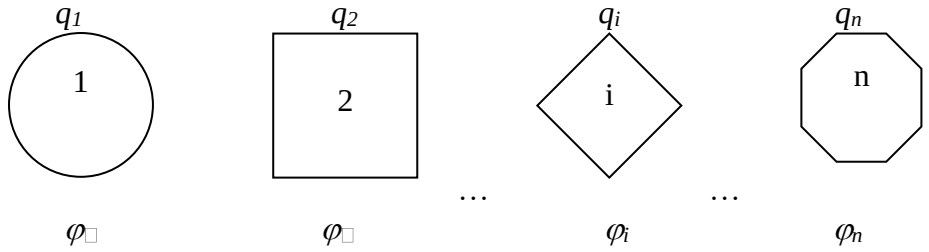


Рис. 1. Система заряженных тел. Заряженные тела *1,2, …i, … n* расположены недалеко друг от друга, взаимодействуют друг с другом. $\varphi_{\square}$ □□ $\varphi_{\square}$ □□□□□□□□□□□□ φ_n □□потенциалы тел, $q_1, q_2, \ldots\ldots q_n$ - заряды тел.

В системе заряженных тел потенциал каждого тела определяется не только зарядом данного тела, но также и зарядами всех остальных тел. При этом, если диэлектрическая проницаемость среды, в которой находятся эти тела, не зависит от напряженности электрического поля (ε_a = const), то потенциалы тел являются линейными функциями зарядов и наоборот. Это утверждение записывается с помощью формул, называемых формулами Максвелла (первая группа формул Максвелла):

$$
\begin{aligned}
\varphi_1 &= \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \ldots \alpha_{1i}q_i + \ldots \alpha_{1n}q_n \\
\varphi_2 &= \alpha_{21}q_1 + \alpha_{22}q_2 + \ldots \alpha_{2i}q_i + \ldots \alpha_{2n}q_n \\
&\ldots\ldots\ldots \\
\varphi_i &= \alpha_{i1}q_1 + \alpha_{i2}q_2 + \ldots \alpha_{ii}q_i + \ldots \alpha_{in}q_n \\
&\ldots\ldots\ldots \\
\varphi_n &= \alpha_{n1}q_1 + \alpha_{n2}q_2 + \ldots \alpha_{ni}q_i + \ldots \alpha_{nn}q_n \quad .
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Эти формулы представляют собой систему линейных уравнений, где α_{ik} – коэффициенты связи между зарядами и потенциалами тел. В электротехнике эти коэффициенты называются потенциальными коэффициентами.

α_{ik} при $i = k$ – собственные потенциальные коэффициенты,
α_{ik} при $i \neq k$ – взаимные потенциальные коэффициенты.
Без вывода: $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$.

Выразив заряды тел через потенциалы тел, получим вторую группу формул Максвелла:

$$
\begin{aligned}
q_1 &= \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \ldots \beta_{1i}\varphi_i + \ldots \beta_{1n}\varphi_n \\
q_2 &= \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \ldots \beta_{2i}\varphi_i + \ldots \beta_{2n}\varphi_n \\
&\ldots\ldots\ldots
\end{aligned}
$$

$$q_i = \beta_{i1}\varphi_1 + \beta_{i2}\varphi_2 + \dots \beta_{ii}\varphi_i + \dots \beta_{in}\varphi_n \qquad (2)$$
$$\dots\dots\dots$$
$$q_n = \beta_{n1}\varphi_1 + \beta_{n2}\varphi_2 + \dots \beta_{ni}\varphi_i + \dots \beta_{nn}\varphi_n .$$

Коэффициенты связи в этих формулах называются коэффициентами электростатической индукции.
β_{ik} при $i = k$ – собственные коэффициенты электростатической индукции,
β_{ik} при $i \neq k$ – взаимные коэффициенты электростатической индукции.
Без вывода: $\beta_{ik} = \beta_{ki}$.
Первую и вторую группы формул Максвелла можно записать в матричном виде:

$(\varphi) = (\alpha)(q)$
$(q) = (\beta)(\varphi)$

Матрицы (α) и (β) связаны соотношениями:

$$(\beta) = (\alpha)^{-1}$$
$$(\alpha) = (\beta)^{-1} .$$

То есть, если известна одна из матриц (α) или (β), то другую можно найти, транспонируя соответствующую матрицу.
Можно выразить заряды тел не через потенциалы тел (как во второй группе), а через разности потенциалов тел. Соответствующая система уравнений называется третьей группой формул Максвелла:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_{11}(\varphi_1 - 0) + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \dots c_{1i}(\varphi_1 - \varphi_i) + \dots c_{1n}(\varphi_1 - \varphi_n) \\ q_2 &= c_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + c_{22}(\varphi_2 - 0) + \dots c_{2i}(\varphi_2 - \varphi_i) + \dots c_{2n}(\varphi_2 - \varphi_n) \\ &\dots\dots\dots \\ q_i &= c_{i1}(\varphi_i - \varphi_1) + c_{i2}(\varphi_i - \varphi_2) + \dots c_{ii}(\varphi_i - 0) + \dots c_{in}(\varphi_i - \varphi_n) \\ &\dots\dots\dots \\ q_n &= c_{n1}(\varphi_n - \varphi_1) + c_{n2}(\varphi_n - \varphi_2) + \dots c_{ni}(\varphi_n - \varphi_i) + \dots c_{nn}(\varphi_n - 0) . \end{aligned} \qquad (3)$$

Коэффициенты связи c_{ik} называются частичными ёмкостями.
c_{ik} при $i = k$ – собственные частичные ёмкости,
c_{ik} при $i \neq k$ – взаимные частичные ёмкости.

В диагональных членах этой системы уравнений содержатся разности потенциалов соответствующего тела и потенциала точки, соединённой с землёй (потенциал равен нулю).
Все три группы формул Максвелла справедливы, если ноль потенциала выбран на земле или на бесконечности (в точках, бесконечно удалённых от всех зарядов $q_1, q_2, \dots q_i, \dots q_n$).
Коэффициенты связи $\alpha_{ik}, \beta_{ik}, c_{ik}$ зависят от формы, размеров тел, от взаимного расположения тел (от конфигурации тел), от расстояний между телами, а также от значения диэлектрической проницаемости среды, в которой находятся эти тела. То есть совокупность этих коэффициентов является характеристикой данной конкретной системы тел (так же, как ёмкость одного или двух одинаковых тел).
Коэффициенты $\alpha_{ik}, \beta_{ik}, c_{ik}$ не изменятся (мало изменятся), если тела соединить произвольным образом между собой и землёй тонкими проводниками с малой ёмкостью. На этом основаны экспериментальные методы определения коэффициентов.
При определении коэффициентов электростатической индукции одно из тел заряжается, все другие соединяются с землёй (их потенциалы равны нулю). При определении частичных ёмкостей все тела соединяются между собой (их потенциалы одинаковы), и заряжаются, например, путём присоединения к положительному полюсу батареи.
В лабораторной работе в качестве системы заряженных тел используются три жилы трёхжильного кабеля. Предполагается, что эти жилы имеют большие размеры (диаметры), а

их присоединение к батарее или земле осуществляется тонкими соединительными проводниками. В этом случае системы уравнений в каждой группе формул Максвелла включают в себя по три уравнения, причём в правой части каждого уравнения содержится по три слагаемых. В зависимости от способа соединения жил эти уравнения существенным образом упрощаются.

Определение β_{ik} при $i = k$

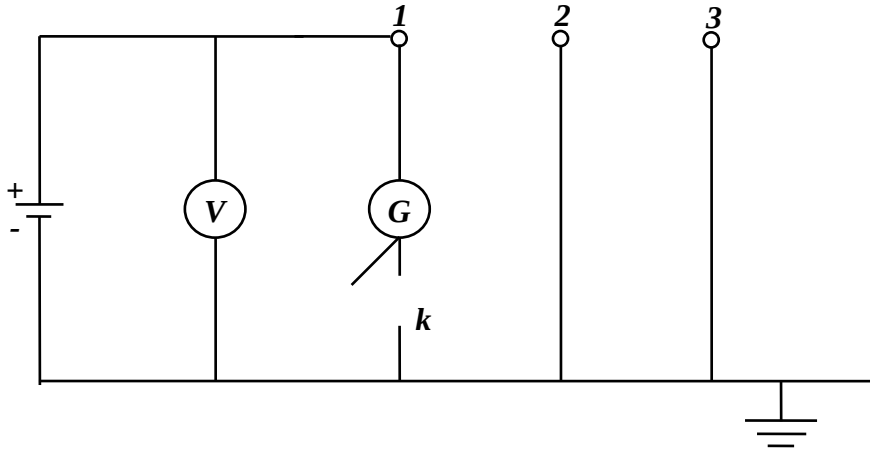


Рис. 2 Принципиальная схема для определения β_{11}.

1,2,3 – жилы трехжильного кабеля.

При соединении жил, как на Рис.2,

$q_1 > 0, q_2 < 0, q_3 < 0, \varphi_1 > 0, \varphi_2 = \varphi_3 = 0.$

$q_1 > 0, \varphi_1 > 0$ потому, что первая жила присоединена к положительному полюсу батареи (заряжена). $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ потому, что вторая и третья жилы заземлены. $q_2 < 0, q_3 < 0$ (несмотря на то, что $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) потому, что заземленные вторая и третья жилы находятся близко к заряженной первой жиле. Электростатическое поле, существующее во всем пространстве вокруг заряженной первой жилы, индуцирует отрицательные заряды на второй и третьей жиле, притягивая их «из земли». Если бы заземленные вторая и третья жилы находились далеко от заряженной первой жилы, имело бы место $\varphi_2 = \varphi_3 = 0, q_2 = q_3 = 0.$

Используем первое уравнение второй группы при $n=3, \varphi_2 = \varphi_3 = 0$. Видим, что при выполнении условия $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ это уравнение упростилось и имеет вид

$$q_1 = \beta_{11} \varphi_1 .$$

Отсюда

$$\beta_{11} = \frac{q_1}{\varphi_1} . \qquad (4)$$

Последнее справедливо лишь в схеме на Рис.2, которую мы специально собрали для экспериментального определения β_{11}.

φ_1 найдем по показаниям вольтметра (вольтметр показывает $\varphi_1 = \varphi_1 - 0$, так как одна из клемм вольтметра заземлена). q_1 найдем по показаниям гальванометра. Величина отклонения стрелки баллистического гальванометра (число делений, на которые отклоняется стрелка) прямо пропорциональна заряду, прошедшему через гальванометр за короткий промежуток времени (в лабораторной работе в момент замыкания ключа k).

То есть заряд q_1 можно найти по отклонению стрелки гальванометра после его градуировки и определения характеристики гальванометра, называемой постоянная гальванометра. Зная q_1 и φ_1, найдем β_{11} по формуле (4).

Определение β_{ik} при $i \neq k$

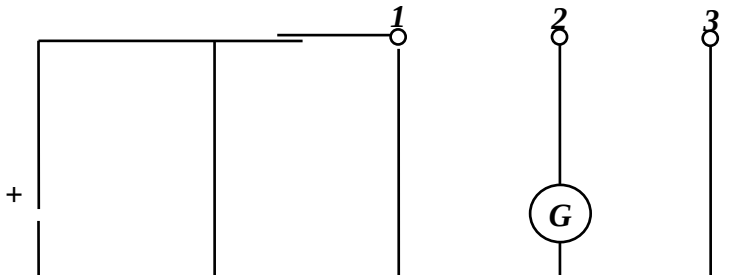


Рис. 3. Принципиальная схема для определения β_{21} .

Изобразим схему, такую же, как на Рис.2, но гальванометр поместим в другое место (Рис. 3). В этой схеме, как и в схеме, изображенной на Рис.2, $q_1 > 0$, $\varphi_1 > 0$, $q_2 < 0$, $q_3 < 0$, $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$. Используем второе уравнение второй группы при $n = 3$ и при $\varphi_1 = \varphi_3 = 0$, Получим

$$q_2 = \beta_{21}\,\varphi_1 .$$

$$\beta_{21} = \frac{q_2}{\varphi_1} = -\frac{|q_2|}{\varphi_1} \quad .$$

При записи последней формулы вспомним, что ранее мы обосновали наличие отрицательного заряда $q_2 < 0$ на второй жиле, если $q_1 > 0$.

φ_1 найдем по показаниям вольтметра. При замыкании ключа в схеме на Рис. 2 и на Рис. 3 заряд первой жилы q_1 за короткий промежуток времени «уйдет на землю». При этом исчезнет электрическое поле, индуцирующее заряд $q_2 < 0$. Таким образом, в момент замыкания ключа заряд $q_2 < 0$ также за короткий промежуток времени «уйдет на землю» через гальванометр.

Как и β_{21}, все β_{ik} при $i \neq k$ оказываются отрицательными.

Определение c_{ik} при $i = k$

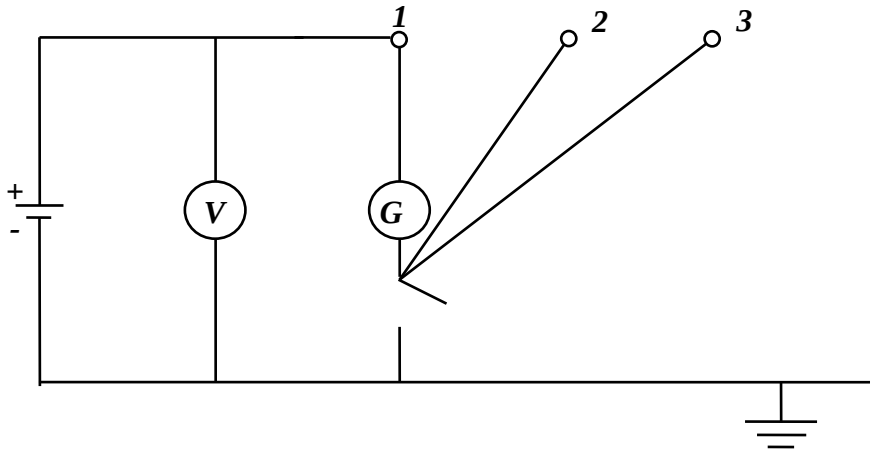


Рис. 4. Принципиальная схема для определения c_{11} .

В схеме, изображенной на Рис.4, ни одна из жил не заземляется, а все жилы соединяются между собой (в одну точку). При этом $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$. Гальванометр расположен таким образом, чтобы в момент замыкания ключа через него проходил на землю заряд лишь одной первой жилы.

Используем первую формулу третьей группы при $n=3$ и при $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$.

Получим $q_1 = c_{11}\varphi_1$,

$$c_{11} = \frac{q_1}{\varphi_1} \quad . \qquad (6)$$

Определение c_{ik} при $i \neq k$

Без вывода: c_{ik} при $i \neq k = -\beta_{ik}$ при $i \neq k$.
Поэтому в нашем случае определять экспериментально c_{ik} при $i \neq k$ нет необходимости. Они будут равны (с обратным знаком) коэффициентам
β_{ik} при $i \neq k$. Так как последние отрицательны, то c_{ik} при $i \neq k > 0$.

Определение постоянной гальванометра (градуировка гальванометра)

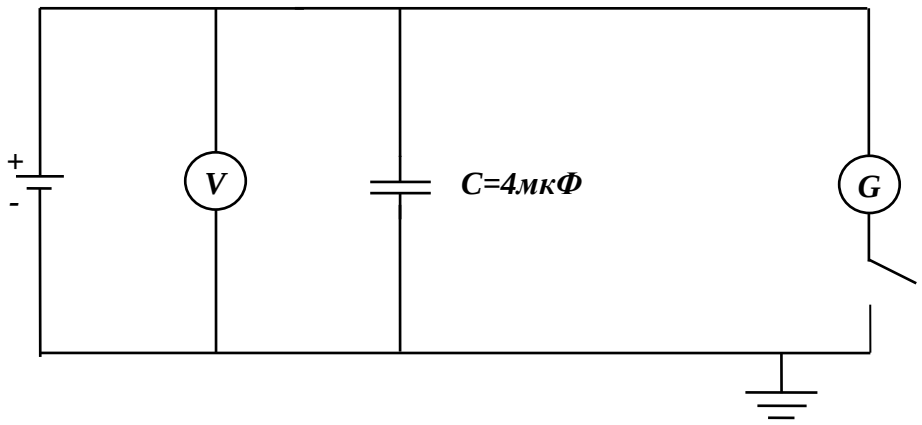


Рис. 5. Принципиальная схема для определения постоянной гальванометра.

В схеме, изображенной на Рис. 5, при разомкнутом ключе на конденсаторе с известной емкостью $c = 4$ *мкФ* накапливается заряд $q=cU$, где U – напряжение на обкладках конденсатора, измеряемое вольтметром. В момент замыкания ключа этот заряд за короткий промежуток времени «уйдет на землю» через гальванометр. Величина отклонения стрелки гальванометра (в делениях шкалы) N прямо пропорциональна заряду, прошедшему через гальванометр:

$$N = \frac{1}{G} q$$ - для любого баллистического гальванометра.

$\frac{1}{G}$ - коэффициент пропорциональности между q и N, G – постоянная гальванометра - характеристика конкретного гальванометра.
Если для данного гальванометра известна G, то заряд, прошедший через гальванометр, можно экспериментально найти, умножив G на число делений N, на которые отклонилась стрелка гальванометра

$$q = GN.$$

Так как в нашем случае $q = cU$, то $G = \frac{q}{N} = \frac{cU}{N}$ - в схеме на Рис.5.

После определения G в схеме Рис.5 этот же гальванометр включаем во все предыдущие схемы и заряд, прошедший через гальванометр, определяем по формуле $q=GN$.
Мы привели по одной принципиальной схеме для определения β_{11}, β_{21}, c_{11}. Следует научиться на основании этих схем мысленно представлять себе принципиальные схемы для определения других коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей. Рассмотрим этот процесс на примере определения β_{ik} при $i = k$. Имея схему на Рис.2 для определения β_{11} , можно представить схему для определения β_{33}, «перетащив» гальванометр и ключ, изображенные на Рис. 2, к третьей жиле. Гораздо удобнее представить схему для определения β_{33} , изменив номера жил на Рис. 2 : $1 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 1$. Пример такой схемы приведен на Рис. 6.

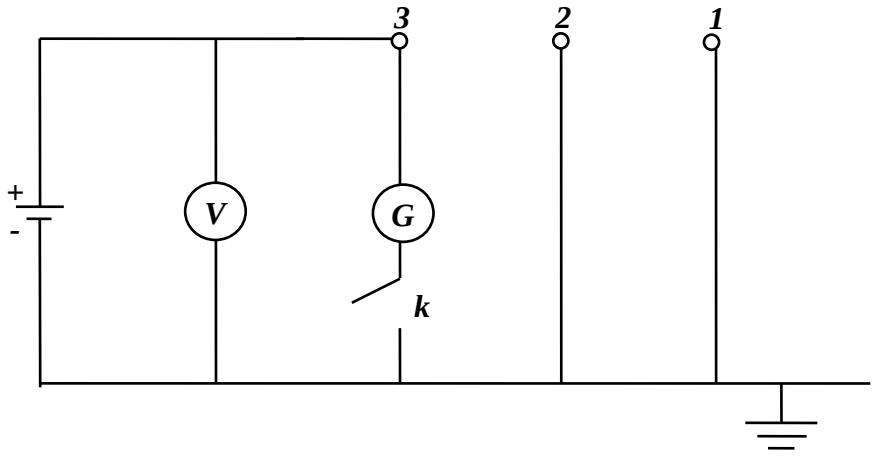


Рис. 6. Принципиальная схема для определения β_{33}.

Мы рассмотрели упрощенные принципиальные схемы, необходимые для понимания различных способов соединения тел (жил) для экспериментального определения коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей.

При выполнении работы на стенде используются практически те же схемы, но различные способы соединения реализуются с помощью переключающего устройства. Кроме того, считается, что заземленным является корпус стенда (или хорошо проводящая металлическая шина).

Порядок проведения работы

1. Определение постоянной гальванометра (градуировка гальванометра)

Сравнивая схемы, изображенные на Рис 6 и на Рис. 7, убедитесь, что на Рис. 7 изображена схема для определения постоянной гальванометра. Зная, что $c = 4мкФ$, измерив вольтметром величину U, а с помощью гальванометра величину N в делениях, найдите постоянную гальванометра $G = \frac{cU}{N}$.

2. Определение β_{ik} при $i = k$

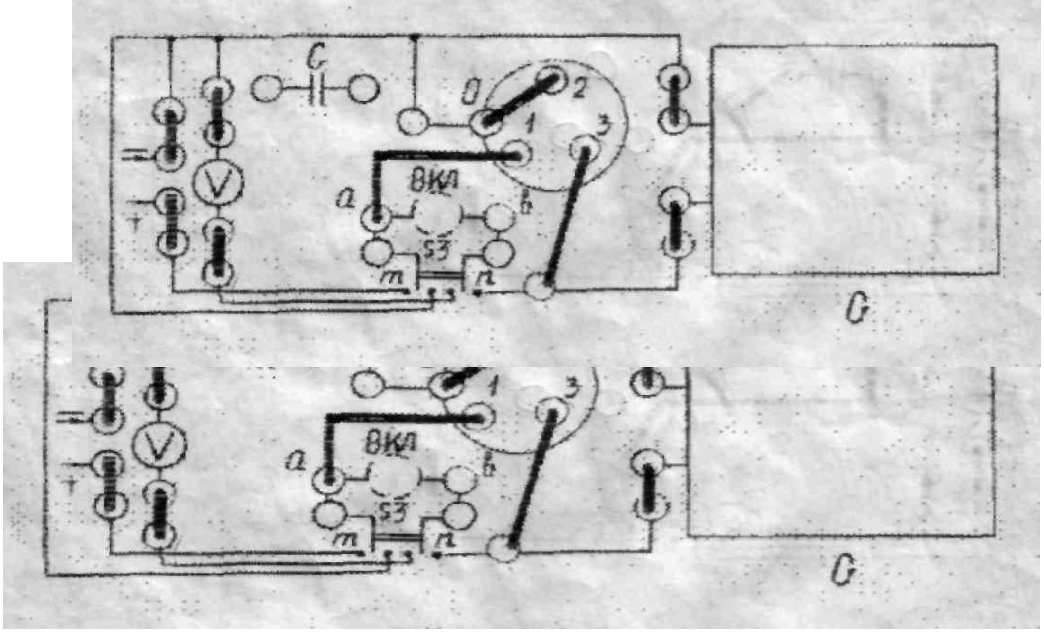
На основании схемы, изображенной на Рис.2, мысленно представьте себе принципиальную схему для определения β_{33} (можно воспользоваться схемой на Рис.6). Соберите схему, изображенную на Рис. 8. Рис. 7. Схема для определения постоянной гальванометра. Рис. 8.

Схема для определения β_{33}.

Убедитесь, что на Рис. 8 изображена схема для определения β_{33}. Измерив с помощью вольтметра величину φ_3, а с помощью гальванометра заряд q_3 ($q_3 = GN$), найдем β_{33} по формуле $\beta_{33} = \frac{q_3}{\varphi_3}$.

Для определения β_{11} преобразуем схему, изображенную на Рис. 8, следующим образом. С клеммой, к которой была присоединена третья жила, соединяем первую жилу. Третью жилу присоединяем к клемме, к которой на Рис. 8, была присоединена первая жила. То есть, для определения β_{11} в схеме, изображенной на Рис. 8, осуществляем замену $3 \leftrightarrow 1$. Коэффициент β_{11} находим по формуле $\beta_{11} = \frac{q_1}{\varphi_1}$

3. Определяем β_{ik} при $i \neq k$



На основании схемы, изображенной на Рис.3, мысленно представьте себе принципиальную схему для определения β_{31}. Соберите схему, изображенную на Рис.9.

Рис. 9. Схема для определения β_{31}.

Убедитесь, что на Рис.9 изображена схема для определения β_{31}. Измерив q_3 и φ_1, коэффициент β_{31} найдем по формуле $\beta_{31} = -\dfrac{|q_3|}{\varphi_1}$.

Для экспериментального определения оставшихся пяти β_{ik}.при $i \neq k$ при определении каждого коэффициента вместо схемы, изображенной на Рис.9, собираем схемы, в которых осуществляются замены $3 \leftrightarrow i$, $1 \leftrightarrow k$. Измерив потенциалы и заряды, оставшиеся пять коэффициентов β_{ik} при $i \neq k$ найдем по формуле $\beta_{ik} = -\dfrac{|q_i|}{\varphi_k}$.

Без вывода: $\beta_{ik} = \beta_{ki}$.

Поэтому полученные экспериментально β_{ik} при $i \neq k$ следует округлить таким образом, чтобы выполнялось соотношение $\beta_{ik} = \beta_{ki}$.

4. Определение c_{ik} при $i = k$.

На основании схемы, изображенной на Рис. 4, мысленно представьте себе принципиальную схему для определения c_{33}. Соберите схему, изображенную на Рис. 10. Убедитесь, то на Рис 10 изображена схема для определения c_{33}.

Измерив q_3 и φ_3, частичную емкость c_{33}. найдем по формуле $c_{33} = \dfrac{q_3}{\varphi_3}$.

Для определения частичных ёмкостей c_{11} и c_{22} вместо схемы, изображенной на Рис.10, собираем схемы, в которых осуществляются замены $3 \leftrightarrow 1$ и $3 \leftrightarrow 2$. Измерив потенциалы и заряды, оставшиеся две частичные найдем по формуле $c_{ii} = \dfrac{q_i}{\varphi_i}$ (i = 1,2).

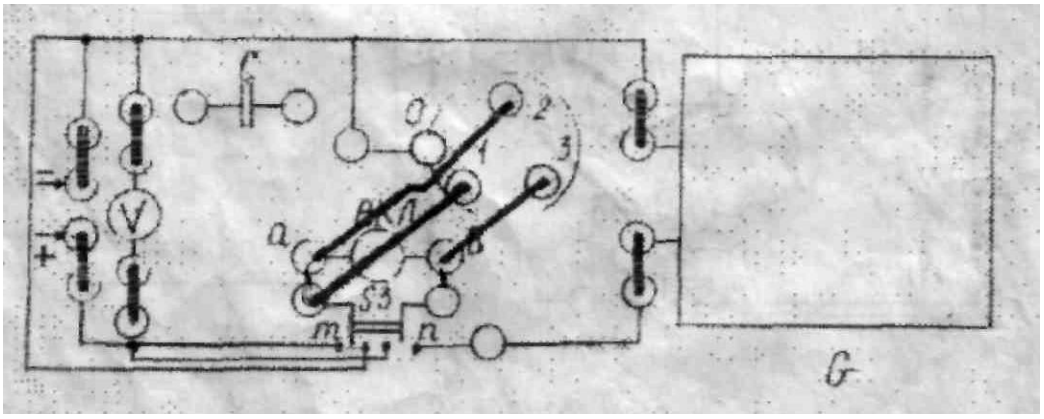


Рис. 10. Схема для определения c_{33}.

5. Определение c_{ik} при $i \neq k$

Поскольку c_{ik} при $i \neq k = -\beta_{ik}$ при $i \neq k$, то c_{ik} при $i \neq k$ находим, используя ранее найденные экспериментально β_{ik} при $i \neq k$.

6. Определение потенциальных коэффициентов.
Потенциальные коэффициенты найдем, транспонируя в среде MATHCAD матрицу (β) с округленными β_{ik} при $i \neq k$.
То есть $(\alpha) = (\beta)^{-1}$.

Лабораторная работа 3

«Явление электромагнитной индукции.

Коэффициент взаимной индукции двух катушек»

Цель работы:
сравнить полученные теоретически и экспериментально зависимости коэффициента взаимной индукции двух катушек от расстояния между катушками.

Приборы и принадлежности:
схема на стенде, две круглые катушки, амперметр, гальванометр, стержень с делениями для измерения расстояния между катушками, соединительные проводники.

Таблица 1. Характеристики измерительных приборов

Название прибора	Класс точности	Номинальное значение	Число делений (самых мелких)	Цена деления

$\gamma = \frac{\Delta x}{x_н} \cdot 100\%$ - наиболее употребительное определение класса точности – цифра на панели прибора.

x – измеряемая величина,

Δx – абсолютная погрешность измерения,

$x_н$ – номинальное значение – наибольшее значение величины, которое можно измерить прибором при данном положении переключателя номинальных значений. При наличии такого переключателя номинальных значений не одно, несколько.

Краткие теоретические сведения и основные расчётные формулы

Закон электромагнитной индукции

Для произвольного контура L

$$\Phi = \int_S \bar{B}\, d\bar{s} - \textit{магнитный поток, сцеплённый с контуром L,}$$

$\bar{B}$ – магнитная индукция – основная характеристика, магнитного поля в каждой точке пространства, где находится контур L.

s – поверхность, мысленно натянутая на контур L.

t – время.

Для катушки из w – витков

$$E_{инд} = -\frac{d\psi}{dt}\ (1') - \textit{ЭДС индукции в катушке,}$$

ψ = w·Ф – потокосцепление катушки.

Существование магнитного поля (отличие от нуля $\overline{B}$, а следовательно, отличие от нуля Ф и ψ) может быть обусловлено протеканием любых токов, в том числе токов в близкорасположенных контурах и катушках.

Явление взаимной индукции двух контуров

Рассмотрим два близко расположенных контура L_1 и L_2, причём в контуре L_1 протекает ток I_1.

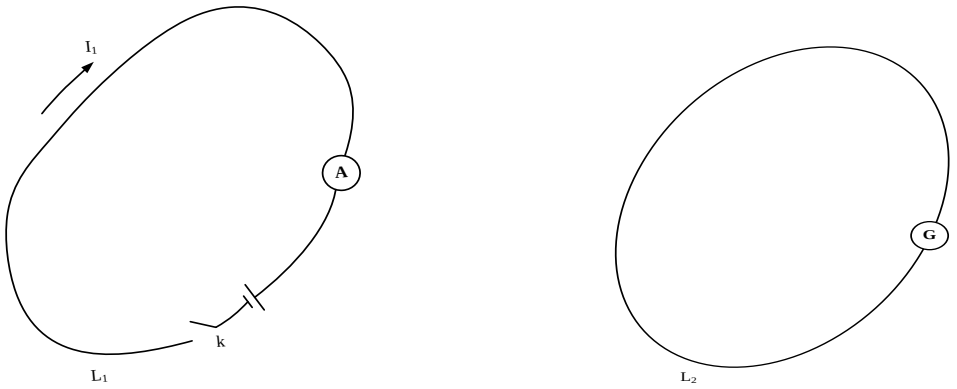


Рис. 1. Два взаимодействующих контура.

Применим закон (1) к контуру L_2.

Φ_{21} – магнитный поток, пронизывающий контур L_2, возникающий за счёт протекания тока I_1 в контуре L_1.

Поскольку Φ_{21} возникает за счёт протекания тока I_1, то Φ_{21} тем больше, чем больше I_1:

$$\Phi_{21} = \mathrm{M}\, I_1\ .\ (2)$$

Здесь M – коэффициент пропорциональности между I_1 и Φ_{21} – коэффициент взаимной индукции двух контуров. Его значение зависит от формы, размеров, взаимного расположения контуров, расстояния между ними, а также от значения магнитной проницаемости среды, в которой находятся эти контуры.

В случае, когда все эти величины не зависят от времени (не изменяются во времени), M = const. Тогда из (1) и (2) имеем (при M = const)

То есть, если M не изменяется во времени, то ЭДС индукции в контуре L_2 возникает при изменении тока I_1 в контуре L_1.

Явление взаимной индукции двух катушек

Рассмотрим две близкорасположенные катушки 1 и 2 с числом витков w_1 и w_2, причём в катушке 1 протекает ток I_1.

Применим закон (1') к катушке 2

$$E_{инд} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} \quad - ЭДС\ индукции, возникающая\ в\ катушке\ 2,$$

– потокосцепление катушки 2.

Поскольку ψ_{21} возникает за счёт протекания тока I_1, то ψ_{21} тем больше, чем больше I_1:

Здесь M' - коэффициент пропорциональности между I_1 и ψ_{21} – коэффициент взаимной индукции двух катушек. Его значение зависит от формы, размеров, взаимного расположения (конфигурации) катушек, расстояния между ними, а также от значения магнитной проницаемости среды, в которой находятся катушки.

Кроме того, M' зависит от числа витков катушек. В простейшем случае, если все витки катушки 1 практически одинаковы и все витки катушки 2 практически одинаковы, то $M' \approx w_1 \cdot w_2 \cdot M$.

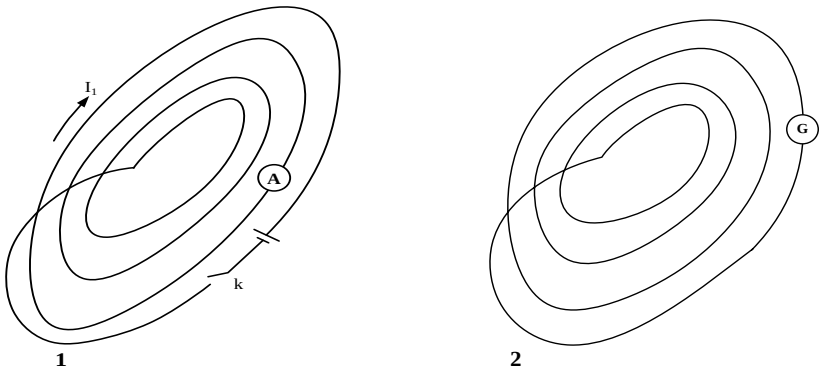


Рис. 2. Две взаимодействующие катушки.

В случае, когда все перечисленные величины, определяющие значение M', не зависят от времени (не изменяются во времени), M' = const. Тогда из (1') и (2') имеем (при M' = const)

То есть, если M' не изменяется во времени, то ЭДС индукции в катушке 2 возникает при изменении тока I_1 в катушке 1.

Проще всего осуществить изменение тока I_1 в катушке 1 можно, замыкая или размыкая ключ k в катушке 1. При замыкании ключа ток I_1 изменяется за короткий промежуток времени от нуля до его стационарного значения. Именно в этот короткий промежуток времени в катушке 2 возникает ЭДС индукции, и по катушке 2 протекает кратковременный ток I_2.

Обозначим t_0 – момент замыкания ключа в катушке 1, t_1 – момент установления в катушке 1 стационарного тока I_1.

Интегрируем обе части (3') по времени от t_0 до t_1.

$$\int_0^{I_1} M' dI_1 = -\int_{t_0}^{t_1} E_{инд}\ dt,$$

В любой момент времени, когда $E_{инд} \neq 0$ и во второй катушке протекает ток I_2, выполняется закон Ома.

,

где R_2 - сопротивление катушки 2 вместе с гальванометром. Вынесем R_2 из под знака интеграла, получим

$$M' I_1 = -R_2 \cdot \int_{t_0}^{t_1} I_2 \, dt.$$

Что представляет собой интеграл в правой части этого выражения?

Вспомним, что изменяющийся во времени ток I_2 можно записать в любой момент времени в виде:

$$I_2 = \frac{dq}{dt},$$

где q – заряд, протекающий через поперечное сечение провода катушки 2. В то же время этот же заряд протекает через гальванометр G, включённый в цепь катушки 2. То есть имеем

$$M' I_1 = -R_2 \int_0^Q dq_2 = -R_2 \cdot Q$$

$$M' I_1 = -R_2 \cdot |Q|.$$

Здесь Q – заряд, прошедший через гальванометр за весь короткий промежуток времени $t_1 - t_0$. Отсюда

$$M' = \frac{R_2 \cdot |Q|}{I_1}.$$

Для измерения величины заряда, прошедшего по цепи за короткий промежуток времени, используются баллистические гальванометры. Отклонеение стрелки этих приборов тем больше, чем больше заряд, «проскочивший» через гальванометр за короткий промежуток времени.

То есть

$$|Q| = G \cdot n.$$

Здесь n – отклонение стрелки гальванометра (в делениях шкалы),
G – коэффициент пропорциональности между n и – постоянная гальванометра. Теперь

$$M' = \frac{R_2 \, G \, n}{I_1}.$$

Если бы было известно сопротивление R_2, то, используя эту формулу, можно было бы найти экспериментальное значение M'. Поскольку R_2 обычно мало и точно его измерить достаточно сложно, часто поступают следующим образом. Обозначим

$$C = R_2 \, G.$$

Эта величина является характеристикой катушки 2 вместе с гальванометром. Тогда

$$M' = \frac{C \, n}{I_1}. \quad (4)$$

Формально выражение (4) можно переписать в виде

$$C = \frac{M' I_1}{n}. \quad (5)$$

Теперь, если известна постоянная величина C, используя формулу (4) можно найти M'. Но для того, чтобы по формуле (5) определить C, необходимо использовать дополнительно полученное не экспериментально, а теоретически значение M' при одном конкретном взаимном расположении катушек.

Теоретически вычислить M' для двух круглых катушек, расположенных на одной оси в воздухе, можно по формуле:

$$M' = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} \cdot f(k) \cdot w_1 \cdot w_2. \quad (6)$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м* – магнитная постоянная,
$w_1 и \, w_2$ – число витков в катушках 1 и 2,
$R_1 \, и \, R_2$ – радиусы катушек 1 и 2.

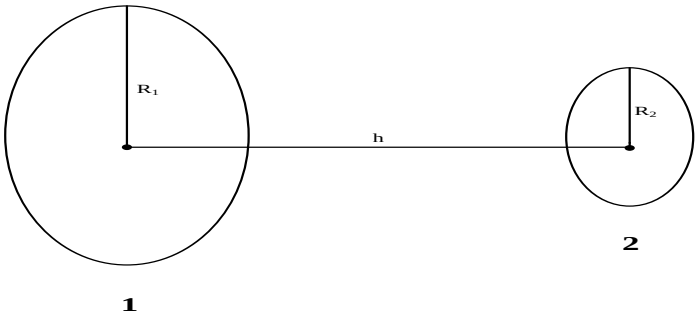


Рис. 3. Две взаимодействующие близко расположенные катушки на одной оси.

Безразмерная величина k определяется взаимным расположением таких катушек и даётся выражением

$$k^2 = \frac{4\,R_1\,R_2}{h^2 + (R_1 + R_2)^2}. \quad (7)$$

Здесь h – расстояние между катушками.

В расчётную формулу (6) входит функция этой величины

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K - \frac{2}{k} E. \quad (8)$$

В этой формуле k = + $\sqrt{k^2}$, K – эллиптический интеграл первого рода, E – эллиптический интеграл второго ряда. Эллиптические интегралы являются функциями k^2.

Эти функции хорошо известны и часто приводятся в табличном виде.

Таблица 2. Зависимости от k^2 эллиптических интегралов первого рода K и второго рода E.

k^2	$K(k^2)$	$E(k^2)$		k^2	$K(k^2)$	$E(k^2)$		k^2	$K(k^2)$	$E(k^2)$
0	1,5708	1,5708		0,41	1,78452	1,39465		0,81	2,28055	1,1717
0,01	1,57475	1,56686		0,42	1,79165	1,38988		0,82	2,30523	1,1648
0,02	1,57874	1,56291		0,43	1,79892	1,38509		0,83	2,33141	1,15779
0,03	1,58278	1,55895		0,44	1,80633	1,38026		0,84	2,35926	1,15066
0,04	1,58687	1,55497		0,45	1,81388	1,3754		0,85	2,38092	1,1434
0,05	1,591	1,55097		0,46	1,82159	1,37051		0,86	2,42093	1,136
0,06	1,59519	1,54697		0,47	1,82946	1,3656		0,87	2,45534	1,12845
0,07	1,59942	1,54294		0,48	1,83749	1,36064		0,88	2,49264	1,12074
0,08	1,60371	1,53889		0,49	1,84569	1,36566		0,89	2,53333	1,11286
0,09	1,60805	1,53483		0,5	1,85407	1,35064		0,9	2,57809	1,10477
0,1	1,61244	1,53076		0,51	1,86264	1,34559		0,91	2,62777	1,09648
0,11	1,61689	1,52666		0,52	1,8714	1,34051		0,92	2,68355	1,08794
0,12	1,62139	1,52256		0,53	1,88036	1,33538		0,93	2,74707	1,07912
0,13	1,62595	1,51843		0,54	1,88953	1,33022		0,94	2,82075	1,06999
0,14	1,63058	1,51428		0,55	1,89892	1,32502		0,95	2,90834	1,06047
0,15	1,63526	1,51012		0,56	1,90855	1,31979		0,96	3,01611	1,0505
0,16	1,64	1,50594		0,57	1,91841	1,31451		0,97	3,15587	1,03995
0,17	1,64484	1,50174		0,58	1,92853	1,30919		0,98	3,35414	1,02859
0,18	1,64968	1,49753		0,59	1,93891	1,30383		0,99	3,69564	1,01599
0,19	1,65462	1,49329		0,6	1,94957	1,29843		1		1
0,2	1,65962	1,48903		0,61	1,96052	1,29298				
0,21	1,6647	1,48476		0,62	1,97178	1,28748				
0,22	1,66985	1,48047		0,63	1,98337	1,28194				
0,23	1,67507	1,47615		0,64	1,9953	1,27635				
0,24	1,68037	1,47182		0,65	2,0076	1,27071				
0,25	1,68575	1,46746		0,66	2,02028	1,26501				

0,26	1,69121	1,46309		0,67	2,03337	1,25926				
0,27	1,69675	1,45869		0,68	2,04689	1,25346				
0,28	1,70237	1,45427		0,69	2,06088	1,24759				
0,29	1,70809	1,44983		0,7	2,07536	1,24167				
0,3	1,71389	1,44536		0,71	2,09037	1,23568				
0,31	1,71978	1,44088		0,72	2,10595	1,22963				
0,32	1,72578	1,43637		0,73	2,12213	1,22351				
0,33	1,73186	1,43183		0,74	2,13897	1,21732				
0,34	1,73806	1,42727		0,75	2,15652	1,21106				
0,35	1,74435	1,42269		0,76	2,17483	1,20471				
0,36	1,75075	1,41808		0,77	2,19397	1,19829				
0,37	1,75727	1,41345		0,78	2,21402	1,19178				
0,38	1,7639	1,40879		0,79	2,23507	1,18518				
0,39	1,77065	1,4041		0,8	2,25721	1,17849				

3.4 Типовые контрольные задания для проведения тестирования

Фонд тестовых заданий по дисциплине содержит тестовые задания, распределенные по разделам и темам, с указанием их количества и типа.

Структура фонда тестовых заданий по дисциплине

Количество тестовых заданий, типы ТЗ	Характеристика ТЗ	Тема в соответствии с РПД	
5	A	Пассивные четырехполюсники	ПК-1.1
20	B		
10	A	Электрические цепи при несинусоидальных периодических напряжениях и токах	ПК-1.1
18	B		
10	A	Электрические фильтры	ПК-1.1
18	B		
6	A	Переходные процессы в линейных электрических цепях	ПК-1.1
18	B		
5	A	Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока	ПК-1.1
18	B		
5	A	Методы расчёта магнитных цепей	ПК-1.1
18	B		
7	A	Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока	ПК-1.1
4	B		
4	A	Катушка с ферромагнитным сердечником	ПК-1.1
4	B		
3	A	Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником	ПК-1.1
3	B		
4	A	Феррорезонанс напряжения	ПК-1.1

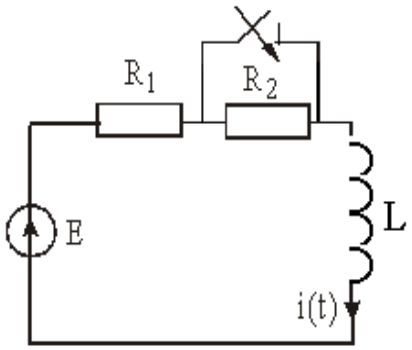
4	B		
4	A	Феррорезонанс тока	ПК-1.1
4	B		
		Электрическое поле в проводящих средах	ПК-1.1
7	A		
5	A	Магнитное поле постоянного тока	ПК-1.1
5	A	Электромагнитное поле	
5	A	Плоские электромагнитные волны	ПК-1.1
5	A	Поверхностный эффект в пластине	ПК-1.1
A 86 B 125	Итого		

Полный комплект ФТЗ хранится в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС и обучающийся имеет возможность ознакомиться с демонстрационным вариантом ФТЗ.

Ниже приведен образец типового варианта итогового теста, предусмотренного рабочей программой дисциплины.

Кафедра	*ТЕСТОВОЕ ЗАДАНИЕ* *по курсу «Теоретические основы электротехники»* *Вариант №*42	УТВЕРЖДЕНО

1. Явление феррорезонанса напряжений.
2. Соотношение между активной и полной мощностями в цепи переменного тока.
3. Определить i(t) классическим методом, если R_1=100 Ом, R_2=50 Ом, L=4 Гн, E=150 В.



Защита лабораторных работ

Порядок записи:

1. Вопрос.
2. Не правильный ответ.

3. Правильный ответ.
4. Неверно.
5. Верно.

По мере прохождения теста 2 и 3 меняются местами случайным образом.

Исследование пассивного 4-х полюсника
5 вопросов

1. Что такое 4-х полюсник?

Это замкнутая электрическая цепь.
Это электрическая цепь любой конфигурации, имеющая четыре свободных зажима.
Неправильно. 4-х полюсник должен иметь два входных и два выходных зажима.
Правильно.

2. Какие схемы замещения Вы знаете?

"Т"-образная схема замещения.
"Т", "Г", "П"-образные схемы замещения.
Неправильно. Ваш ответ неполный.
Правильно.

3. Укажите, какие уравнения 4-х полюсника соответствуют прямому включению.

U2 = DU1 + BI1; I2 = CU1 + AI1.
U1 = AU2 + BI2; I1 = CU2 + DI2.
Неправильно. Эти уравнения 4-х полюсника записаны для обратного включения.
Правильно.

4. Какие опыты необходимо провести для определения коэффициентов 4-х полюсника A, B, C, D? Если все элементы 4-х полюсника резисторы.

Для определения коэффициентов A, B, C, D необходимо провести опыты холостого хода при прямом и обратном включениях.
Для определения коэффициентов A, B, C, D необходимо провести опыты холостого хода и короткого замыкания для прямого включения.
Неправильно. При условии, что все эдементы 4-х полюсника резисторы и сдвига фаз между напряжениями и токами поэтому нет, то достаточно провести опыты ХХ и КЗ только для прямого включения.
Правильно.

5. Показать способы определения параметров схем замещения при известных коэффициентах 4-х полюсника A, B, C, D на примере "Г"-образной схемы.

Проводим опыт холостого хода для обратного включения: Z2x = C/A; Z2x = Z2z = Z1 + Z2 = C/A.
Проводим опыт короткого замыкания для обратного включения: Z2k = D/B; Z2k = Z2z = Z2 = D/B.
Проводим опыт холостого хода для прямого включения: Z1x = A/C; Z1x = Z11 = Z1 + Z2 = A/C.
Проводим опыт короткого замыкания для прямого включения: Z1k = B/D; Z1k = Z11 = Z1 = B/D, следовательно: Z1 = B/D; Z2 = A/C - B/D.
Неправильно. Для определения коэффициентов проводят опыты ХХ и КЗ для прямого включения.5.2.1.
Правильно.

Исследование линейных электрических цепей
при несинусоидальном входном напряжении
10 вопросов

1. Напряжение какой формы можно разложить в ряд Фурье?

Только напряжения заданные не периодическими аналитическими функциями.
Напряжение любой формы, подчиняющееся периодическому закону.
Неверно. Закон изменения напряжения должен быть периодическим и может быть задан не только аналитическими функциями.

Правильно. Закон изменения напряжения может быть задан не только аналитическими функциями, он может быть представлен в виде графиков, таблиц, осциллограмм.

2. Укажите виды симметрии при разложении в ряд Фурье.

Симметрия относительно осей координат [F(x)=F(x+), F(x)=F(-x)] и их сочетание.
Симметрия относительно осей координат, относительно начала координат [F(x)=-F(-x)] и их сочетание.
Неверно. Указаны не все виды симметрии.
Правильно. F(x)=F(x+) - относительно оси абцисс, F(x)=F(-x) - относительно оси ординат, F(x)=-F(-x) - относительно начала координат.

3. Указать члены ряда Фурье (гармоники) в зависимости от вида симметрии разлагаемых сигналов.

Отн.оси абцисс:все sin гармоники.Отн.оси ординат:пост.составляющая и все sin гармоники.Отн.начала координат: все cos гармоники.
Отн.оси абцисс:нечётные sin гармоники.Отн.оси ординат:пост.составляющая и все cos гармоники. Отн.начала координат: все sin гармоники.
Неверно.
Правильно.

4. Как изображаются графики линейчатых спектров?

В виде непрерывной зависимости напряжения или тока от частоты.
В виде дискретной зависимости разложенного в ряд Фурье сигнала в зависимости от частоты.
Неверно.
Верно.

5. Как найти действующее значение несинусоидального напряжения, заданного в виде ряда Фурье?

U=sqrt{sum[Um(k)^2]}; U=sqrt[Um(0)^2+Um(1)^2+Um(2)^2+Um(3)^2+...+Um(k)^2], где Um(k) - ампдлитудные значения напряжения гармоник (k=0, 1,2,...).
U=sqrt{sum[U(k)^2]}, где U(k) - действующие значения напряжения гармоник (k=0,1,2,...).
Неверно. В этой формуле не хватает еще одного сомножителя 1/sqrt(2).
Правильно. Действующее значение несинусоидального тока находится аналогично.

6. Как найти активную, реактивную, полную мощности в электрической цепи при несинусоидальных токах и напряжениях, если они заданы в виде ряда Фурье? Здесь Uk, Ik - действующие значения.

P=SUM(Uk*Ik*CosФk), Q=SUM(Uk*Ik*SinФk), S=SQRT(P^2+Q^2) при k=1,2,... .
P=SUM(Uk*Ik*CosФk) при k=0,1,2,... ; Q=SUM(Uk*Ik*SinФk), S=U*I при k=1,2,... ,где U и I - действующие значения.
Неверно указаны индексы: у активной мощности должно быть k=0, у реактивной k=1; неверна формула определения полной мощности S, эта формула не учитывает мощность искажения T.
Правильно.

7. Укажите формулу определения коэффициента формы для напряжения (где V-действующее значение, Vср-среднее значение)?

Кф = Vср / V
Кф = V / Vср
Неверно.
Верно. Для синусоиды Кф = 1.11

8. Укажите формулу определения коэффициента амплитуды для напряжения (где Vм - max значение, V - действующее значение)?

Ка = V / Vм
Ка = Vм / V
Неверно.
Верно. Для синусоиды Ка = 1.41

9. Укажите формулу определения коэф. искажения для напряжения (где V1-действ.значение первой гармоники, V-действ.значение)?

Ku = V / V1
Ku = V1 / V
Неверно.
Верно. Для синусоиды Ку = 1

10. Укажите формулу определения коэф.гармоник Кг для напряжения?

Отношение действующих значений высших гармоник к действующему значению всего сигнала.
Отношение действующих значений высших гармоник к действующему значению основной (первой) гармоники.
Неверно.
Верно. Для синусоиды К = 0.

Исследование катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником

5 вопросов

1. На каком участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) катушка с ферромагнитным сердечником будет ярко выраженным нелинейным элементом ?

На начальном участке ВАХ.
На конечном участке ВАХ.
Неправильно.
Правильно.

2. На каком участке ВАХ катушки индуктивности будет наибольшее эквивалентное сопротивление ?

На участке насыщения ВАХ.
На начальном участке ВАХ.
Неправильно.
Правильно.

3. На каком участке ВАХ катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником будет наибольшая эквивалентная индуктивность ?

На участке насыщения ВАХ.
На начальном участке ВАХ.
Неправильно.
Правильно.

4. Для какого участка ВАХ нелинейной катушки индуктивности зависимость тока от времени будет более синусоидальна ?

Для участка насыщения ВАХ.
Для начального участка ВАХ.
Неправильно.
Правильно.

5. Для какого участка ВАХ нелинейной катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником будет наибольший угол магнитных потерь?

Для начального участка ВАХ.
Для участка насыщения ВАХ.
Неправильно.
Правильно.

Феррорезонанс напряжения

5 вопросов

1. В каких электрических цепях может возникнуть явление феррорезонанса напряжения ?

В цепях с параллельно соединенными конденсатором и нелинейной катушкой индуктивности.
В цепях с последовательно соединенным конденсатором и нелинейной катушкой индуктивности.
Неверно.

Правильно.

2. При каком условии может возникнуть явление феррорезонанса напряжения?

Если ВАХ батареи конденсаторов будет касательной к ВАХ нелинейной катушки индуктивности в начале координат.
Если ВАХ батареи конденсаторов пересекает ВАХ нелинейной катушки индуктивности.
Неправильно.
Правильно.

3. Как определить критическую величину емкости конденсаторной батареи?

Провести прямую через начало координат и последнюю точку ВАХ нелинейной катушки индуктивности. Полученную прямую использовать как ВАХ емкостного элемента с критической величиной емкости.
Провести касательную к ВАХ нелинейной катушки индуктивности в точке начала координат. Полученную касательную использовать как ВАХ емкостного элемента с критической величиной емкости.
Неверно.
Верно.

4. При каком соотношении емкостей в цепи может наступить явление феррорезонанса напряжения?

При емкости меньше критической.
При емкости больше критической.
Неверно.
Верно.

5. При тригерном эффекте какие из перечисленных электрических величин изменяются скачком?

Ток, сдвиг фаз между входным напряжением и током, входное напряжение, падение напряжения на катушке и на батарее конденсаторов.
Ток, сдвиг фаз между напряжением и током, падение напряжения на катушке и на батарее конденсаторов.
Неверно.
Верно.

Феррорезонанс тока

6 вопросов

1. В каких электрических цепях может возникнуть явление феррорезонанса токов?

В электрических цепях с последовательно соединенными нелинейной катушкой индуктивности и батареи конденсаторов.
В электрических цепях с параллельно соединенными нелинейной катушкой индуктивности и батареи конденсаторов.
Неверно.
Верно.

2. Укажите условие, при котором в параллельной электрической цепи возникает явление феррорезонанса тока.

Когда ампер-вольтная характеристика конденсаторной батареи является касательной амперВольтной характеристике нелинейной катушки индуктивности.
Когда ампер-вольтная характеристика конденсаторной батареи пересекается с амперВольтной характеристикой нелинейной катушки индуктивности.
Неверно.
Верно.

3. Как определить величину критической емкости, если известна ВАХ нелинейной катушки индуктивности?

Необходимо провести прямую через первую и последнюю точки ВАХ нелинейной катушки индуктивности. По наклону прямой определить величину критической емкости.
Необходимо провести касательную к ВАХ нелинейной катушки индуктивности в начальной точке. По наклону касательной определить величину критической емкости.

Неверно.
Верно.

4. При какой величине емкости в цепи может возникнуть явление феррорезонанса тока?

При величине емкости меньше критической.
При величине емкости больше критической.
Неверно.
Верно.

5. Какой характер носит электрическая цепь до скачка при повышении напряжения?

Индуктивный.
Емкостный.
Неверно.
Верно.

6. За счет каких факторов реальная результирующая характеристика отличается от теоретической?

За счет разброса характеристик из-за нестабильности параметров нелинейной катушки индуктивности и батареи конденсаторов.
За счет пренебрежения активными сопротивлениями цепи при построении результирующей ВАХ.
Неверно.
Верно.

Теория поля

1. В некоторой точке вектор **E** направлен вверх, вектор **H** от нас. В какую сторону электромагнитное поле переносит энергию в данной точке?

а) направо,

б) вверх,

в) налево,

г) вниз.

Правильный ответ – в) налево.

2. Какие из перечисленных характеристик не относятся к электрическому полю:

а) E, [В/м]; б) Ф, [Вб]; в) H, [А/м];

Правильный ответ - в) H, [А/м]

3. Какие из перечисленных характеристик не относятся к магнитному полю:

а) E, [В/м]; б) B, [Тл]; в) H, [А/м]; г) Ф, [Вб] .

Правильный ответ - а) E, [В/м]

4. Электростатическое поле создается:

а) неподвижными телами с переменным зарядом;

б) движущимися зарядами;

в) неподвижными телами с постоянным зарядом;

г) проводниками с электрическим током.

Правильный ответ - в) неподвижными телами с постоянным зарядом

5. Закон Кулона определяет:

а) силу взаимодействия проводников с током;

б) силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля;

в) силу взаимодействия точечных зарядов;

г) напряженность поля точечного заряда.

Правильный ответ - силу взаимодействия точечных зарядов

6. Единица измерения объемной плотности заряда:

а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/м^3

Правильный ответ - г) Кл/м^3

7. Единица измерения линейной плотности заряда:

а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/$м^3$ Правильный ответ - б) Кл/м

8. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме имеет вид:

а)j=уЕб)р=у$Е^2$,в)р=[ЕХН],

Правильный ответ - б) р - у$Е^2$

9. Выберите наиболее полный ответ. Магнитное поле создается:

а) неподвижными постоянными зарядами;

б) проводниками с электрическим током;

в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем;

г) переменным электрическим полем.

Правильный ответ - в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем

10. Стоячие волны в линии возникают:

а) в согласованном режиме;

б) при холостом ходе в линии с потерями;

в) при коротком замыкании в линии с потерями;

г) при холостом ходе в линии без потерь.

Правильный ответ - г) при холостом ходе в линии без потерь.

11. Какой параметр равен нулю при согласованном режиме длинной линии: а)коэффициент распространения; б) коэффициент отражения; в)волновое сопротивление; г) фазовая скорость.

Правильный ответ - б) коэффициент отражения

12. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц фазовая скорость равна:

а) 30 км/с; б) 3000 км/с; в) 6000 км/с; г) 300000 км/с

Правильный ответ - г) 300000 км/с

13. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц длина волны равна:

а) 3000 км; б) 5000 км; в) 6000 км; г) 60 км

Правильный ответ - в) 6000 км

14. Узлом стоячей волны называется точка, в которой напряжение или ток имеют:

а) положительное значение;

б) максимальное значение;

в) нулевое значение;

г) отрицательное значение.

Правильный ответ - в) нулевое значение

15. Вектор Пойнтинга задается соотношением:

а)**р** = [**Н**х **В**], б) **р** = [**Е** х **В**], в) **р** = [**Е** х **Н**], г) **р** = [**Н** х **Е**]

Правильный ответ - в) **р** = [**Е**х**Н**]

16. Плоский контур площадью 100 см расположен перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией В - 0.2 Тл. Магнитный поток в контуре равен:

а) 0.002 Вб; б)20 Вб; в) 500 Вб; г)5 Вб Правильный ответ - а) 0.002 Вб

17. Изменение энергии электромагнитного поля в некотором объеме можно рассчитать с помощью:

а) закона электромагнитной индукции;

б) теоремы У мова-Пойнтинга;

в) теоремы Гаусса;

г) закона полного тока.

Правильный ответ - б) теоремы Умова-Пойнтинга

18. Векторы Е и Н электромагнитного поля перпендикулярны друг другу. Чему равен вектор Пойнтинга, если Н =1,5 А/м, Е= 10 В/м?

а) 15 ВА/м^2; б) 0.015 ВА/м^2; в) 66.7 ВА/м^2; г) 225 ВА/м^2 Правильный ответ - а) 15 ВА/м^2

19. Градиент потенциала точечного положительного заряда направлен:

а) вдоль силовых линий от заряда;

б) вдоль силовых линий к заряду;

в) перпендикулярно силовой линии;

г) под углом 45^o к силовой линии.

Правильный ответ - б) вдоль силовых линий к заряду

20. Скалярное произведение двух векторов имеет максимальное значение:

а) при расположении векторов под углом 90^o;

б) при расположении векторов под углом 45^o;

в) при расположении векторов под углом 60^o;

г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - г) при параллельном расположении векторов

21. Векторное произведение двух векторов имеет максимальное значение:

а) при расположении векторов под углом 90^o;

б) при расположении векторов под углом 45^o;

в) при расположении векторов под углом 60^o;

г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - а) при расположении векторов под углом 90^o

3.5 Типовые контрольные задания для выполнения проверочных работ

Контрольные варианты заданий выложены в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет.

Ниже приведен образец типовых вариантов заданий для выполнения проверочных работ.

Образец типового варианта проверочной работы
«Методы расчёта нелинейных электрических цепей постоянного тока»

Пояснить суть методов расчёта простых нелинейных цепей постоянного тока.

1. Графические методы расчета.
2. Аналитические методы расчета.
3. Моделирование.

Образец типового варианта проверочной работы
«Методы расчёта магнитных цепей»

Пояснить суть методов расчёта простых магнитных цепей.

1. Графические методы расчета. Прямая и обратная задачи при расчёте неразветвлённой магнитной цепи. Метод двух узлов.
2. Аналитические методы расчета.
3. Моделирование.

Образец типового варианта проверочной работы
«Методы расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока»

Пояснить суть методов расчёта нелинейных электрических цепей переменного тока.

1. Графический метод расчета по мгновенным значениям.

2. Метод аналитической аппроксимации.
3. Метод кусочно-линейной аппроксимации.
4. Метод расчета по действующим значениям несинусоидальных напряжений и токов или по их первым гармоникам.

Образец типового варианта проверочной работы
«Катушка с ферромагнитным сердечником»

Анализ катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником по действующим значениям тока и напряжения.

Образец типового варианта проверочной работы
«Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником»

Анализ однофазного трансформатора с ферромагнитным сердечником по действующим значениям тока и напряжения.

Образец типового варианта проверочной работы
«Феррорезонанс напряжения»

Анализ феррорезонанса напряжений по действующим значениям тока и напряжения.

Образец типового варианта проверочной работы
«Феррорезонанс тока»

Анализ феррорезонанса тока по действующим значениям тока и напряжения.

Образец типового варианта проверочной работы
«Магнитное поле постоянного тока»
Образец типового варианта проверочной работы
«Электромагнитное поле»
Образец типового варианта проверочной работы
«Плоские электромагнитные волны»

1. В некоторой точке вектор **E** направлен вверх, вектор **H** от нас. В какую сторону электромагнитное поле переносит энергию в данной точке?
а) направо,
б) вверх,
в) налево,
г) вниз.
Правильный ответ – в) налево.
2. Какие из перечисленных характеристик не относятся к электрическому полю:
а) E, [В/м]; б) Ф, [Вб]; в) H, [А/м];
Правильный ответ - в) H, [А/м]
3. Какие из перечисленных характеристик не относятся к магнитному полю:
а) E, [В/м]; б) B, [Тл]; в) H, [А/м]; г) Ф, [Вб] .
Правильный ответ - а) E, [В/м]
4. Электростатическое поле создается:
а) неподвижными телами с переменным зарядом;
б) движущимися зарядами;
в) неподвижными телами с постоянным зарядом;

г) проводниками с электрическим током.

Правильный ответ - в) неподвижными телами с постоянным зарядом

5. Закон Кулона определяет:

а) силу взаимодействия проводников с током;

б) силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля;

в) силу взаимодействия точечных зарядов;

г) напряженность поля точечного заряда.

Правильный ответ - силу взаимодействия точечных зарядов

6. Единица измерения объемной плотности заряда:

а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/м^3

Правильный ответ - г) Кл/м^3

7. Единица измерения линейной плотности заряда:

а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/м^3 Правильный ответ - б) Кл/м

8. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме имеет вид:

а)j=уЕб)р=уЕ^2,в)р=[ЕХН],

Правильный ответ - б) р - уЕ^2

9. Выберите наиболее полный ответ. Магнитное поле создается:

а) неподвижными постоянными зарядами;

б) проводниками с электрическим током;

в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем;

г) переменным электрическим полем.

Правильный ответ - в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем

10. Стоячие волны в линии возникают:

а) в согласованном режиме;

б) при холостом ходе в линии с потерями;

в) при коротком замыкании в линии с потерями;

г) при холостом ходе в линии без потерь.

Правильный ответ - г) при холостом ходе в линии без потерь.

11. Какой параметр равен нулю при согласованном режиме длинной линии: а)коэффициент распространения; б) коэффициент отражения; в)волновое сопротивление; г) фазовая скорость.

Правильный ответ - б) коэффициент отражения

12. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц фазовая скорость равна:

а) 30 км/с; б) 3000 км/с; в) 6000 км/с; г) 300000 км/с

Правильный ответ - г) 300000 км/с

13. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц длина волны равна:

а) 3000 км; б) 5000 км; в) 6000 км; г) 60 км

Правильный ответ - в) 6000 км

14. Узлом стоячей волны называется точка, в которой напряжение или ток имеют:

а) положительное значение;

б) максимальное значение;

в) нулевое значение;

г) отрицательное значение.

Правильный ответ - в) нулевое значение

15. Вектор Пойнтинга задается соотношением:

а)**р** = [**Н**х **В**], б) **р** = [**Е** х **В**], в) **р** = [**Е** х **Н**], г) **р** = [**Н** х **Е**]

Правильный ответ - в) **p** = [**E**x**H**]

16. Плоский контур площадью 100 см расположен перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией В - 0.2 Тл. Магнитный поток в контуре равен:

а) 0.002 Вб; б)20 Вб; в) 500 Вб; г)5 Вб Правильный ответ - а) 0.002 Вб

17. Изменение энергии электромагнитного поля в некотором объеме можно рассчитать с помощью:

а) закона электромагнитной индукции;

б) теоремы У мова-Пойнтинга;

в) теоремы Гаусса;

г) закона полного тока.

Правильный ответ - б) теоремы Умова-Пойнтинга

18. Векторы Е и Н электромагнитного поля перпендикулярны друг другу. Чему равен вектор Пойнтинга, если Н =1,5 А/м, Е= 10 В/м?

а) 15 ВА/м^2; б) 0.015 ВА/м^2; в) 66.7 ВА/м^2; г) 225 ВА/м^2 Правильный ответ - а) 15 ВА/м^2

19. Градиент потенциала точечного положительного заряда направлен:

а) вдоль силовых линий от заряда;

б) вдоль силовых линий к заряду;

в) перпендикулярно силовой линии;

г) под углом 45^o к силовой линии.

Правильный ответ - б) вдоль силовых линий к заряду

20. Скалярное произведение двух векторов имеет максимальное значение:

а) при расположении векторов под углом 90^o;

б) при расположении векторов под углом 45^o;

в) при расположении векторов под углом 60^o;

г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - г) при параллельном расположении векторов

21. Векторное произведение двух векторов имеет максимальное значение:

а) при расположении векторов под углом 90^o;

б) при расположении векторов под углом 45^o;

в) при расположении векторов под углом 60^o;

г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - а) при расположении векторов под углом 90^o

3.6 Перечень теоретических вопросов к зачету

(для оценки знаний)

1.Закон Кулона. Напряженность электростатического поля

2.Напряженность электростатического поля, создаваемого точечным электрическим зарядом, и напряженность поля, создаваемого n зарядами

3.Потенциал электростатического поля. Эквипотенциальные поверхности

4.Графическое изображение электростатического поля. Картина поля

5.Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля. Определение напряженности поля в произвольной точке из картины поля

6.Поток напряженности электростатического поля. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме в интегральной форме

7.Теорема Гаусса для электростатического поля в ди-
электрической среде в интегральной форме

8.Электростатическое поле внутри и на поверхности проводящего тела при отсутствии токов

9.Поляризованность диэлектрика. Диэлектрическая восприимчивость.
Абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости
10.Теорема Гаусса для электростатического поля в
вакууме в дифференциальной форме
11.Теорема Гаусса для электростатического поля в
диэлектрической среде в дифференциальной форме
12.Уравнения Пуассона и Лапласа для электростатического поля в диэлектрической среде
13.Граничные условия для электростатического поля. Теорема единственности решения уравнений Пуассона и Лапласа
14.Метод зеркальных изображений для электростатического поля
15.Характеристики электрического поля в проводящей среде. Плотность тока и ток
16.Закон Ома в дифференциальной форме
17.Первый закон Кирхгофа в дифференциальной форме
18.Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме
19.Уравнение Лапласа для электрического поля в проводящей среде.
Граничные условия при переходе тока из одной проводящей среды в другую
20.Аналогия между электростатическими полями в проводящей среде и в диэлектрике
21.Соотношение между проводимостью и емкостью
22.Характеристики магнитного поля постоянного тока и связь между ними
23.Закон Био-Савара-Лапласа
24.Сила Ампера
25.Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции
26.Закон полного тока в интегральной и дифференциальной формах
27.Векторный потенциал магнитного поля. Выражение магнитного потока через циркуляцию векторного потенциала
28.Магнитное поле в областях, занятых и незанятых постоянными токами
29.Магнитный потенциал. Уравнение Лапласа для магнитного потенциала и граничные условия на границе раздела однородных и изотропных магнитных сред
30.Взаимное соответствие электростатического и магнитного полей
31.Применение метода зеркальных изображений для расчета магнитных полей, создаваемых линейными токами, протекающими вблизи стальных масс
32.Первое уравнение Максвелла
33.Второе уравнение Максвелла
34.Уравнение непрерывности плотности полного тока и закон сохранения заряда
35.Ток смещения
36.Уравнения Максвелла в комплексной форме записи
37.Теорема Умова-Пойнтинга для мгновенных значений
38.Перенос энергии по линии электропередач
39.Перенос энергии по коаксиальному кабелю
40.Плоская линейно поляризованная электромагнитная волна в проводящей среде
41.Магнитный поверхностный эффект в проводящем листе
42.Электрический поверхностный эффект в проводящем листе
43.Электрический поверхностный эффект в цилиндрическом проводе

3.7 Перечень типовых простых практических заданий к зачету
(для оценки умений)

Решить практические задачи на каждую тему. Выполнить РГР и КР. Решить задачи по стационарному магнитному полю. Выполнить лабораторные работы.

3.8 Перечень типовых практических заданий к зачету
(для оценки навыков и (или) опыта деятельности)

1. В некоторой точке вектор **E** направлен вверх, вектор **H** от нас. В какую сторону электромагнитное поле переносит энергию в данной точке?
а) направо,
б) вверх,
в) налево,
г) вниз.
Правильный ответ – в) налево.
2. Какие из перечисленных характеристик не относятся к электрическому полю:
а) Е, [В/м]; б) Ф, [Вб]; в) Н, [А/м];
Правильный ответ - в) Н, [А/м]
3. Какие из перечисленных характеристик не относятся к магнитному полю:
а) Е, [В/м]; б) В, [Тл]; в) Н, [А/м]; г) Ф, [Вб] .
Правильный ответ - а) Е, [В/м]
4. Электростатическое поле создается:
а) неподвижными телами с переменным зарядом;
б) движущимися зарядами;
в) неподвижными телами с постоянным зарядом;
г) проводниками с электрическим током.
Правильный ответ - в) неподвижными телами с постоянным зарядом
5. Закон Кулона определяет:
а) силу взаимодействия проводников с током;
б) силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля;
в) силу взаимодействия точечных зарядов;
г) напряженность поля точечного заряда.
Правильный ответ - силу взаимодействия точечных зарядов
6. Единица измерения объемной плотности заряда:
а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/$м^3$
Правильный ответ - г) Кл/$м^3$
7. Единица измерения линейной плотности заряда:
а) Кл; б) Кл/м; в) Кл/В; г) Кл/$м^3$ Правильный ответ - б) Кл/м
8. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме имеет вид:
а)j=уЕб)р=у$Е^2$,в)р=[ЕХН],
Правильный ответ - б) р - у$Е^2$
9. Выберите наиболее полный ответ. Магнитное поле создается:
а) неподвижными постоянными зарядами;
б) проводниками с электрическим током;
в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем;
г) переменным электрическим полем.
Правильный ответ - в) движущимися зарядами или переменным электрическим полем
10. Стоячие волны в линии возникают:
а) в согласованном режиме;
б) при холостом ходе в линии с потерями;

в) при коротком замыкании в линии с потерями;
г) при холостом ходе в линии без потерь.
Правильный ответ - г) при холостом ходе в линии без потерь.
11. Какой параметр равен нулю при согласованном режиме длинной линии: а)коэффициент распространения; б) коэффициент отражения; в)волновое сопротивление; г) фазовая скорость.
Правильный ответ - б) коэффициент отражения
12. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц фазовая скорость равна:
а) 30 км/с; б) 3000 км/с; в) 6000 км/с; г) 300000 км/с
Правильный ответ - г) 300000 км/с
13. В двухпроводной воздушной линии без потерь при частоте 50 Гц длина волны равна:
а) 3000 км; б) 5000 км; в) 6000 км; г) 60 км
Правильный ответ - в) 6000 км
14. Узлом стоячей волны называется точка, в которой напряжение или ток имеют:
а) положительное значение;
б) максимальное значение;
в) нулевое значение;
г) отрицательное значение.
Правильный ответ - в) нулевое значение
15. Вектор Пойнтинга задается соотношением:
а)$\mathbf{p} = [\mathbf{H} \times \mathbf{B}]$, б) $\mathbf{p} = [\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$, в) $\mathbf{p} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$, г) $\mathbf{p} = [\mathbf{H} \times \mathbf{E}]$
Правильный ответ - в) $\mathbf{p} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$
16. Плоский контур площадью 100 см расположен перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля с индукцией В - 0.2 Тл. Магнитный поток в контуре равен:
а) 0.002 Вб; б)20 Вб; в) 500 Вб; г)5 Вб Правильный ответ - а) 0.002 Вб
17. Изменение энергии электромагнитного поля в некотором объеме можно рассчитать с помощью:
а) закона электромагнитной индукции;
б) теоремы У мова-Пойнтинга;
в) теоремы Гаусса;
г) закона полного тока.
Правильный ответ - б) теоремы Умова-Пойнтинга
18. Векторы Е и Н электромагнитного поля перпендикулярны друг другу. Чему равен вектор Пойнтинга, если Н =1,5 А/м, Е= 10 В/м?
а) 15 ВА/м^2; б) 0.015 ВА/м^2; в) 66.7 ВА/м^2; г) 225 ВА/м^2 Правильный ответ - а) 15 ВА/м^2
19. Градиент потенциала точечного положительного заряда направлен:
а) вдоль силовых линий от заряда;
б) вдоль силовых линий к заряду;
в) перпендикулярно силовой линии;
г) под углом 45^o к силовой линии.
Правильный ответ - б) вдоль силовых линий к заряду
20. Скалярное произведение двух векторов имеет максимальное значение:
а) при расположении векторов под углом 90^o;
б) при расположении векторов под углом 45^o;
в) при расположении векторов под углом 60^o;
г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - г) при параллельном расположении векторов

21. Векторное произведение двух векторов имеет максимальное значение:

а) при расположении векторов под углом 90^o;

б) при расположении векторов под углом 45^o;

в) при расположении векторов под углом 60^o;

г) при параллельном расположении векторов.

Правильный ответ - а) при расположении векторов под углом 90^o

3.9 Перечень теоретических вопросов к экзамену

(для оценки знаний)

1. Определение. Уравнения четырехполюсника для прямого и обратного включений Первичные параметры четырехполюсника.
2. Схемы замещения четырехполюсника. Параметры холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника.
3. Определение параметров четырехполюсника.
4. Вторичные параметры четырехполюсника. Характеристические сопротивления и постоянная передачи четырехполюсника.
5. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях.
6. Определение периодических несинусоидальных токов и напряжений, их изображение с помощью рядов Фурье.
7. Некоторые свойства периодических кривых, обладающих симметрией.
8. Действующие значения несинусоидальных токов и напряжений. Коэффициенты гармоник, нелинейных искажений, среднее значение величины.
9. Активная, реактивная и полная мощности несинусоидального тока.
10. Влияние элементов цепи на форму несинусоидальных токов и напряжений.
11. Расчет цепей при несинусоидальных источниках питания.
12. Электрические фильтры. Общая характеристика и классификация фильтров.
13. Переходные процессы в линейных электрических цепях.
14. Определение переходных процессов. Законы коммутации.
15. Независимые и зависимые начальные условия.
16. Характеристическое уравнение, тип переходного процесса, время п.п..
17. Свободные и принужденные составляющие токов и напряжений.
18. Классический метод расчета переходных процессов.
19. Включение катушки индуктивности (RL) на постоянное напряжение.
20. Включение катушки индуктивности (RL) на синусоидальное напряжение.
21. Включение цепи (RC) на постоянное напряжение.
22. 65. Включение цепи (RC) на синусоидальное напряжение.
23. Разряд конденсатора через катушку индуктивности.
24. Операторный метод расчета переходных процессов.
25. Операторные схемы замещения элементов цепи при переходных процессах. Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме.
26. Теорема разложения (формулы разложения), типы переходных процессов.
27. Расчет переходных процессов в линейных эл. цепях с помощью интеграла Дюамеля.
28. Основные величины, характеризующие магнитное поле.
29. Основные характеристики ферромагнитных материалов.
30. Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей. Основы инженерного метода расчета.
31. Расчет неразветвленных магнитных цепей (прямая и обратная задачи).
32. Расчет разветвленных магнитных цепей (прямая и обратная задачи).
33. Основные определения, классификация, нелинейные элементы и их характеристики

34. Общая характеристика методов расчета нелинейных электрических цепей. Последовательное и параллельное соединение нелинейных сопротивлений.
35. Общая характеристика методов расчета, нелинейных цепей. Смешанное соединение нелинейных сопротивлений.
36. Расчет разветвленной нелинейной цепи методом двух узлов.
37. Статическое и дифференциальное сопротивления нелинейных цепей.
38. Общая характеристика нелинейных элементов.
39. Основные преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей переменного тока.
40. . Физические явления в нелинейных цепях.
41. Типы характеристик нелинейных сопротивлений.
42. Общая характеристика методов расчета нелинейных электрических цепей переменного тока.
43. Графический метод расчета нелинейных электрических цепей переменного тока при использовании характеристик нелинейных сопротивлений для мгновенных значений u(t), i(t), (t), q(t).
44. Метод расчёта по действующим значениям несинусоидальных напряжений и токов или по их первым гармоникам.
45. Катушка с ферромагнитным сердечником. Однофазный трансформатор с ферромагнитным сердечником.
46. Феррорезонанс напряжений. Тригерный эффект в последовательной феррорезонансной цепи.
47. Феррорезонанс токов. Тригерный эффект в параллельной феррорезонансной цепи.

3.10 Перечень типовых простых практических заданий к экзамену

(для оценки умений)

1.Выполнить РГР и КР из учебного пособия.
Задача №4. Расчёт линейного пассивного четырёхполюсника при
подаче на вход несинусоидального периодического напряжения
5.0. Задача №5. Расчёт трёхфазной электрической цепи синусоидального тока
6.0. Задача №6. Расчёт переходного процесса в линейной электрической
цепи постоянного тока
7.0. Задача №7. Расчёт переходного процесса в линейной электрической
цепи с помощью интеграла Дюамеля

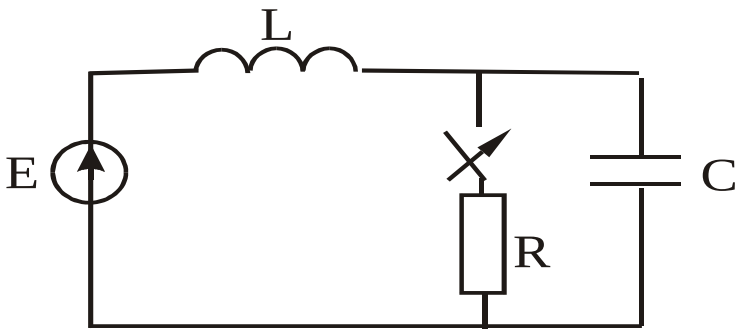
3.11 Перечень типовых практических заданий к экзамену

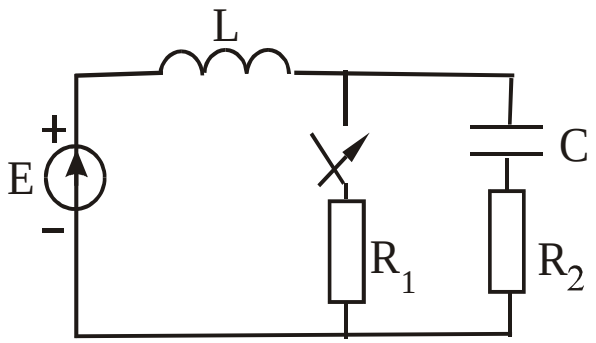
(для оценки навыков и (или) опыта деятельности)

Выполнить и защитить лабораторные работы № 9-18 из сборника лабораторных работ по ТОЭ.

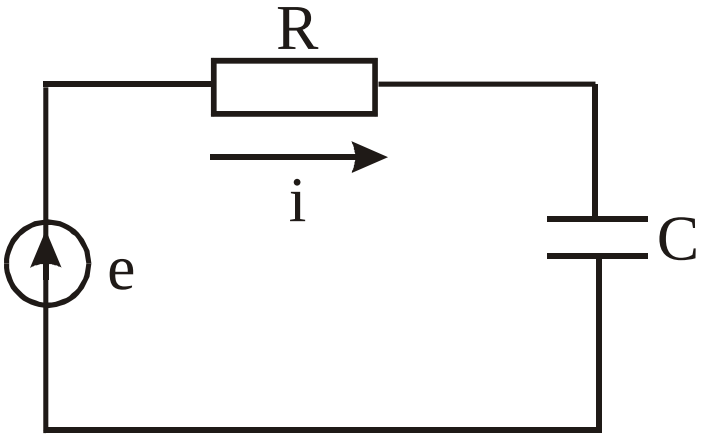
Решить практические задачи на каждую тему.

1. Определить независимые начальные условия, если E=10 В, R=100 Ом, L=1Гн, C=10 мкФ.





2. L=1 Гн, C= 10 мкФ, R_1= R_2=100 Ом, E=10 В. Определить независимые и зависимые начальные условия (токи и напряжения на всех элементах схемы) в момент коммутации.
3. Определить мгновенное значение тока, если e= 100sinwt + 100sin3wt, R=100 Ом, C=10 мкФ, w=1000 рад/с.



4. Методические материалы, определяющие процедуру оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

В таблице приведены описания процедур проведения контрольно-оценочных мероприятий и процедур оценивания результатов обучения с помощью оценочных средств в соответствии с рабочей программой дисциплины.

Описания процедуры проведения контрольно-оценочного мероприятия и процедуры оценивания результатов обучения	Наименование оценочного средства
Преподаватель не мене, чем за две недели до срока защиты РГР должен сообщить каждому обучающемуся номер варианта РГР. Задания РГР выложены в электронной информационно-образовательной среде ИрГУПС, доступной обучающемуся через его личный кабинет. РГР должна быть выполнена в установленный преподавателем срок и в соответствии с требованиями к оформлению РГР (текстовой и графической частей), сформулированными в Положении «Требования к оформлению текстовой и	Расчетно-графическая работа (РГР)

графической документации. Нормоконтроль» (в последней редакции). РГР в назначенный срок сдаются на проверку. Если предусмотрена устная защита РГР, то обучающийся объясняет решение задач, указанных преподавателем, и отвечает на его вопросы	
Преподаватель на установочном занятии доводит до обучающихся: темы, количество заданий в контрольной работе. Контрольная работа должна быть выполнена в установленный срок и в соответствии с правилами к оформлению (текстовой и графической частей), сформулированными в Положении «Требования к оформлению текстовой и графической документации. Нормоконтроль» в последней редакции. Выполненная контрольная работа передается для проверки преподавателю в установленные сроки. Если контрольная работа выполнена не в соответствии с указаниями или не в полном объеме, она возвращается на доработку	Контрольная работа
Защита лабораторных работ проводится во время лабораторных занятий. Во время проведения защиты лабораторной работы пользоваться учебниками, справочниками, конспектами лекций, тетрадями не разрешено. Преподаватель на лабораторной работе, предшествующей занятию проведения защиты лабораторной работы, доводит до обучающихся: номер защищаемой лабораторной работы, время на защиту лабораторной работы. Преподаватель информирует обучающихся о результатах защиты лабораторной работы сразу после ее контрольно-оценочного мероприятия	Лабораторная работа
Проверочные работы, предусмотренные рабочей программой дисциплины, проводятся во время практических занятий. Вариантов проверочной работы по теме не менее двух. Во время выполнения проверочной работы разрешено пользоваться тетрадями для практических занятий. Преподаватель на практическом занятии, предшествующем занятию проведения проверочной работы, доводит до обучающихся тему проверочной работы, количество заданий в проверочной работе, время ее выполнения. Преподаватель информирует обучающихся о результатах проверки работы на следующем занятии после проведения проверочной работы; проверенные работы преподаватель возвращает обучающимся	Проверочная работа

Для организации и проведения промежуточной аттестации составляются типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы.

Перечень теоретических вопросов и типовые практические задания разного уровня сложности для проведения промежуточной аттестации обучающиеся получают в начале семестра через электронную информационно-образовательную среду ИрГУПС (личный кабинет обучающегося).

Описание процедур проведения промежуточной аттестации в форме зачета и оценивания результатов обучения

При проведении промежуточной аттестации в форме зачета преподаватель может воспользоваться результатами текущего контроля успеваемости в течение семестра. С целью использования результатов текущего контроля успеваемости, преподаватель подсчитывает среднюю оценку уровня сформированности компетенций обучающегося (сумма оценок, полученных обучающимся, делится на число оценок).

Шкала и критерии оценивания уровня сформированности компетенций в результате изучения дисциплины при проведении промежуточной аттестации в форме зачета по результатам текущего контроля (без дополнительного аттестационного испытания)

Средняя оценка уровня сформированности компетенций по результатам текущего контроля	Шкала оценивания
Оценка не менее 3,0 и нет ни одной неудовлетворительной оценки по текущему контролю	«зачтено»
Оценка менее 3,0 или получена хотя бы одна неудовлетворительная оценка по текущему контролю	«не зачтено»

Если оценка уровня сформированности компетенций обучающегося не соответствует критериям получения зачета без дополнительного аттестационного испытания, то промежуточная аттестация проводится в форме собеседования по перечню теоретических вопросов и типовых практических задач или в форме компьютерного тестирования.

Промежуточная аттестация в форме зачета с проведением аттестационного испытания проходит на последнем занятии по дисциплине.

При проведении промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования вариант тестового задания формируется из фонда тестовых заданий по дисциплине случайным образом, но с условием: 50 % заданий должны быть заданиями открытого типа и 50 % заданий – закрытого типа.

Описание процедур проведения промежуточной аттестации в форме экзамена и оценивания результатов обучения

Промежуточная аттестация в форме экзамена проводится путем устного собеседования по билетам или в форме компьютерного тестирования.

При проведении промежуточной аттестации в форме собеседования билеты составляются таким образом, чтобы каждый из них включал в себя теоретические вопросы и практические задания.

Билет содержит: два теоретических вопроса для оценки знаний. Теоретические вопросы выбираются из перечня вопросов к экзамену; два практических задания: одно из них для оценки умений (выбирается из перечня типовых простых практических заданий к экзамену); другое практическое задание для оценки навыков и (или) опыта деятельности (выбираются из перечня типовых практических заданий к экзамену).

Распределение теоретических вопросов и практических заданий по экзаменационным билетам находится в закрытом для обучающихся доступе. Разработанный комплект билетов (25-30 билетов) не выставляется в электронную информационно-образовательную среду ИрГУПС, а хранится на кафедре-разработчике фондов оценочных средств.

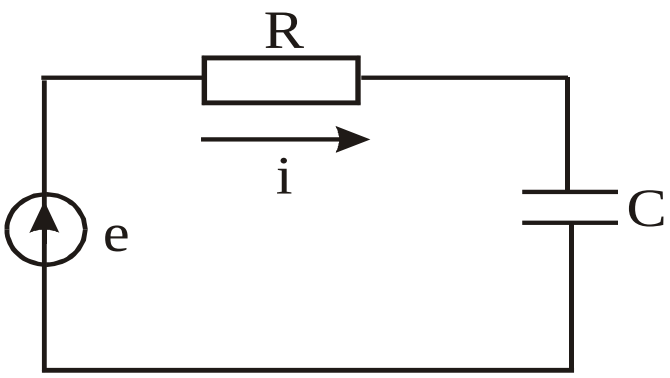
На экзамене обучающийся берет билет, для подготовки ответа на экзаменационный билет обучающемуся отводится время в пределах 45 минут. В процессе ответа обучающегося на вопросы и задания билета, преподаватель может задавать дополнительные вопросы.

Каждый вопрос/задание билета оценивается по четырехбалльной системе, а далее вычисляется среднее арифметическое оценок, полученных за каждый вопрос/задание. Среднее арифметическое оценок округляется до целого по правилам округления

При проведении промежуточной аттестации в форме компьютерного тестирования вариант тестового задания формируется из фонда тестовых заданий по дисциплине случайным образом, но с условием: 50 % заданий должны быть заданиями открытого типа и 50 % заданий – закрытого типа.

Образец экзаменационного билета

<table>
<tr>
<td>ИРГУПС
20__-20__
учебный год</td>
<td>Экзаменационный билет № 1
по дисциплине «<u>Теоретические основы электротехники</u>»</td>
<td>Утверждаю:
Заведующий кафедрой
«_____» ИрГУПС
_____</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="3">1. Уравнения четырехполюсника для прямого и обратного включений. Первичные параметры четырехполюсника. Схемы замещения четырехполюсника. Параметры холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника.
2. Классический метод расчета переходных процессов. Разобрать на примере включения катушки индуктивности (цепочки R-L) на постоянное напряжение.
3. Задача. Определить закон изменения тока i(t) , если
e = 100 + 100sinΩt + 50sin2Ωt, R=100 Ом, C= 10 мФ, Ω=1000 рад/с.</td>
</tr>
</table>


R
i
e
C