

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Направление подготовки/специальность: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Наименование образовательной программы: Электрические и электронные аппараты

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Коммутационные и дуговые процессы в электрических аппаратах**

**Москва
2023**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Церковский Ю.Б.
	Идентификатор	R1eef284e-TserkovskyYB-eb5d8f9f

Ю.Б.
Церковский

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Кузнецова Е.А.
	Идентификатор	Re7bf1ad9-KuznetsovaYA-c9331b9f

Е.А.
Кузнецова

Заведующий
выпускающей кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Киселев М.Г.
	Идентификатор	R572ca413-KiselevMG-f37ee096

М.Г. Киселев

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-3 Способен использовать методы математического анализа и компьютерного моделирования для изучения принципов функционирования и исследования характеристик и особенностей работы электрических и электронных аппаратов различного функционального назначения

ИД-4 Демонстрирует знание коммутационных и дуговых процессов в электрических аппаратах, проводит исследование электрических аппаратов

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Защита задания

1. Исследование автоматических выключателей (ЛР №64) (Лабораторная работа)
2. Исследование дугогасительных систем контакторов переменного и постоянного тока (ЛР №11) (Лабораторная работа)
3. Исследование явления восстановления напряжения на полюсах автоматического выключателя (ЛР №15) (Лабораторная работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Движение электрической дуги в магнитном поле (КР-2, 12 неделя) (Контрольная работа)
2. Процессы ионизации и деионизации в столбе дуги, условия гашения дуги (КР-1, 4 неделя) (Контрольная работа)

БРС дисциплины

8 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %					
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-5	КМ-6
	Срок КМ:	4	8	12	12	14
Общие закономерности при коммутации электрических цепей						
Общие закономерности при коммутации электрических цепей	+			+		
Закономерности дуговых процессов в аппаратах при коммутации цепей						
Закономерности дуговых процессов в аппаратах при коммутации цепей	+					
Физические явления при процессе гашения дуги в различных дугогасительных устройствах						

Физические явления при процессе гашения дуги в различных дугогасительных устройствах		+	+		+
Восстанавливающееся напряжение на коммутирующем элементе и восстанавливающаяся электрическая прочность					
Восстанавливающееся напряжение на коммутирующем элементе и восстанавливающаяся электрическая прочность		+		+	
Вес КМ:	20	20	20	20	20

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-3	ИД-4 _{ПК-3} Демонстрирует знание коммутационных и дуговых процессов в электрических аппаратах, проводит исследование электрических аппаратов	Знать: процессы успешной коммутации электрических цепей особенности конструкции дугогасительных устройств и способы воздействия на дугу в электрических аппаратах физические процессы при коммутации в электрических аппаратах природу столба дуги и приэлектродных областей Уметь: учитывать факторы, определяющие величины восстанавливающейся прочности и восстанавливающегося напряжения разбираться в системах дугогашения и магнитного дутья в аппаратах постоянного и	Процессы ионизации и деионизации в столбе дуги, условия гашения дуги (КР-1, 4 неделя) (Контрольная работа) Движение электрической дуги в магнитном поле (КР-2, 12 неделя) (Контрольная работа) Исследование дугогасительных систем контакторов переменного и постоянного тока (ЛР №11) (Лабораторная работа) Исследование явления восстановления напряжения на полюсах автоматического выключателя (ЛР №15) (Лабораторная работа) Исследование автоматических выключателей (ЛР №64) (Лабораторная работа)

		переменного тока составлять математические модели процессов коммутации в электрических аппаратах	
--	--	--	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Процессы ионизации и деионизации в столбе дуги, условия гашения дуги (КР-1, 4 неделя)

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студенту дается 2 вопроса: один на проверку знаний, другой - на проверку умений. Контрольная работа проводится в виде письменной работы. Студент должен дать письменный ответ на оба вопроса и в конце контрольного мероприятия сдать свою работу преподавателю. Длительность - 1 ак.ч.

Краткое содержание задания:

1. Определить величину критической длины дуги, а также ток и напряжение, соответствующие критическому режиму, при условии, что напряжение сети постоянного тока 220В, сопротивление нагрузки 0,5 Ом.
2. Баланс ионов статически горящей дуге и факторы, обеспечивающие его.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: природу столба дуги и приэлектродных областей	1. Баланс ионов статически горящей дуге и факторы, обеспечивающие его. 2. Влияние прикатодных явлений на величину начальной восстанавливающейся прочности. Чему равно прикатодное падение напряжения? Протяжённость зоны положительного объёмного заряда и её роль. 3. Деионизация в столбе дуги. Роль третьего тела в процессе рекомбинации. Особенность протекания процесса рекомбинации в случае изоляционного или проводящего материала третьего тела. 4. Прикатодные явления при размыкании контактов с током нагрузки. Роль термо- и автоэлектронной эмиссии на возникновение и существование дуги. Факторы, влияющие на них. 5. Процесс размыкания контактов с током нагрузки. От чего зависит тип газоразрядного процесса после размыкания контактов?
Знать: процессы успешной коммутации электрических цепей	1. Аппроксимирующие выражения для дуги отключения постоянного тока, их виды и области использования. 2. Условие гашения дуги переменного тока. Как влияет характер нагрузки (активно/индуктивной) на требование к восстанавливающейся прочности коммутационного аппарата? 3. Условие гашения дуги постоянного тока. Почему происходит гашение после достижения критической длины дуги? 4. Условие успешного или не успешного гашения дуги. Баланс носителей в столбе стационарно

	горящей дуге. 5. Физика процесса существования и условия гашения дуги в вакуумном коммутаторе.
Уметь: составлять математические модели процессов коммутации в электрических аппаратах	1. Определить величину критической длины дуги, а также ток и напряжение, соответствующие критическому режиму, при условии, что напряжение сети постоянного тока 220В, сопротивление нагрузки 0,5 Ом. 2. Определить величину первого пика напряжения, начальную скорость восстановления напряжения и тока на выключателе при неудалённом коротком замыкании. Максимальная мощность короткого замыкания $P = 25000$ кВА, напряжение сети $U = 220$ кВ; удаление места короткого замыкания 2 км; удельное индуктивное сопротивление линии 0,45 Ом/км. 3. Определить скорость двуполярной диффузии при $T = 4000$ К. Молярная масса иона железа $M = 55,84$; $n_{\{0.1\}} = 6 \cdot 10^{14}$ - плотность ионов на границе ствола дуги. Ток дуги 500 А, скорость движения дуги $v = 10$ м/с. 4. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере паров меди при давлении $p = 2 \cdot 10^5$ Па и температуре $T = 7000$ К. Концентрация молекул при нормальном давлении и температуре 0С $n_{\{0.1\}} = 2,71 \cdot 10^{19}$ 1/м³. Диаметр молекулы меди $2,56 \cdot 10^{-8}$ см. 5. Определить частоту и скорость восстановления напряжения на выключателе, установленном за трансформатором, в режиме к.з. на зажимах трансформатора, если $P = 3000$ МВА; напряжение $U = 110$ кВ; ёмкость фазы трансформатора на землю $C = 2000$ пФ, $Z = 450$ Ом – волновое сопротивление воздушной линии. Нейтраль не заземлена. 6. Оценить мощность, отводимую от дугового столба длиной 1 см за счёт конвекции в среде азота. Скорость движения дуги $v = 50$ м/с. Температура газа в дуговом столбе $T = 8000$ К, температура окружающей среды $T = 40$С. Ток дуги 500А.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто, в задачах допущены незначительные ошибки

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-2. Движение электрической дуги в магнитном поле (КР-2, 12 неделя)

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студенту дается 2 вопроса: один на проверку знаний, другой - на проверку умений. Контрольная работа проводится в виде письменной работы. Студент должен дать письмен ответ на оба вопроса и в конце контрольного мероприятия сдать свою работу преподавателю. Длительность - 1 ак.ч.

Краткое содержание задания:

1. Механизм повторного зажигания после перехода тока через нуль. Роль контактного материала при этом.
2. Сравнить эффективность использования дугогасительной решётки на постоянном и переменном токе. Где она выше и почему?

Контрольные вопросы/задания:

Знать: особенности конструкции дугогасительных устройств и способы воздействия на дугу в электрических аппаратах	1. Явление Пинч-эффекта и его роль в процессе гашения дуги в дугогасительной системе типа «ферромагнитная скоба». 2. Понятие «критические токи» и «критические радиусы» опорных точек дуги и их роль в оценке отключающей способности контакторов переменного тока. 3. Влияние газодинамических процессов на процессы вхождения дуги в дугогасительную решётку при разном характере встречи дуги с решёткой. 4. Особенность движение анодной и катодной опорных точек дуги. Почему следует подвижный контакт подключать к положительному потенциалу (аноду)? 5. Механизм образования опорных точек дуги в дугогасительной решётке. Какие факторы при этом оказывают влияние на динамику протекания процесса?
Знать: физические процессы при коммутации в электрических аппаратах	1. Процессы, протекающие в контактном промежутке после перехода тока дуги через нуль, приводящие либо к повторному зажиганию дуги либо к её угасанию. 2. Механизм повторного зажигания после перехода тока через нуль. Роль контактного материала при этом. 3. Собственная частота восстанавливающегося напряжения, её роль в процессе гашения дуги и факторы, определяющие её величину. 4. Факторы, влияющие на процесс восстановления напряжения в одночастотном контуре. Влияние частоты восстанавливающегося напряжения на

	процесс дугогашения. Как тип дугогасительного устройства может способствовать эффективному гашению дуги при одних и тех параметрах коммутлируемой цепи?
Уметь: разбираться в системах дугогашения и магнитного дутья в аппаратах постоянного и переменного тока	1. Сравнить эффективность использования дугогасительной решётки на постоянном и переменном токе. Где она выше и почему? 2. Определить ширину щели в камере будет соответствовать понятию «широкая» щель при токе дуги 1000А, если до вхождения дуги в камеру его скорость равнялась 20 м/с. 3. Объяснить, в чём отличие вхождения дуги в дугогасительные решетки, расположенные в один ряд или смещённые через один вглубь. 4. Объяснить физику процесса гашения дуги в коммутационных аппаратах в дугогасительной системе типа ферромагнитная скоба на постоянном токе.
Уметь: учитывать факторы, определяющие величины восстанавливающейся прочности и восстанавливающегося напряжения	1. Объяснить, почему после достижения током критической величины при отключении цепи постоянного тока при критической длине дуги происходит самоугасание дуги и механизм самоугасания. 2. Объяснить особенность зависимости напряжённости внешнего магнитного поля $H = f(I)$ для сильноточных контакторов постоянного тока, создаваемая серийной катушкой магнитного дутья, а также от чего зависит уровень перенапряжения в момент погасания дуги. 3. Объяснить роль в выборе типа дугогасительного устройства постоянного тока играет определение критической длины дуги используя аппроксимацию для статической ВАХ.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-3. Исследование дугогасительных систем контакторов переменного и постоянного тока (ЛР №11)

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Проводится в течение 4-х академических часов в лаборатории кафедры ЭМЭА.

Краткое содержание задания:

Задание

1. Провести испытание всех установленных контакторов на отключение активно – индуктивной нагрузки, соответствующей режиму АС1, соответствующей техническим параметрам производителя каждого из установленных контакторов.
2. Провести испытание всех установленных контакторов на отключение активно – индуктивной нагрузки, соответствующей режиму АС3, соответствующей техническим параметрам производителя каждого из установленных контакторов .
3. Провести испытание всех установленных контакторов на отключение активно – индуктивной нагрузки, соответствующей режиму DC1, соответствующей техническим параметрам производителя каждого из них.
4. Провести испытание всех установленных контакторов на отключение активно – индуктивной нагрузки, соответствующей режиму DC3, соответствующей техническим параметрам производителя каждого из них.

Испытания проводятся при номинальном токе и токе режима редких коммутаций.

Нагрузка регулируется в соответствии с номиналом испытуемых контакторов. При испытаниях производится осциллографирование динамики коммутационных процессов $U_d = f(t)$ и $I_0 = f(t)$.

Методические указания

По результатам обработки осциллограмм:

1. Построить вольтамперные динамические характеристики, которые затем должны сопоставляться с построенными статическими ВАХ для критического режима , соответствующего коммутируемым параметрам цепи. Динамические ВАХ дуги переменного тока построить для каждого полупериода горения дуги при всех режимах испытаний контакторов.
 2. Построить зависимость мощности , выделяемой в дуге в процессе отключения, и рассчитать изменение проводимости в процессе отключения и мощности, выделяемой в дуге.
 3. Провести сравнение эффективности действия дугогасительных систем по длительности протекания процесса дугогашения и перенапряжению при гашении дуги.
 4. Определить значение величин U_0 , $U_{в.п.}$ для каждого условия отключения.
- Определять угол сдвига фаз и его изменение при каждом полупериоде процесса горения дуги. Отмечать в % степень ограничения тока за счёт горения дуги.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: особенности конструкции дугогасительных устройств и способы воздействия на дугу в электрических аппаратах	1.Дугогасительная решётка. Принцип действия, материал пластин. Влияние параметров пластин - толщина, геометрия, расстояние между пластинами. 2.Гашение дуги - простой открытый разрыв. Чем ограничено её использование по току отключения? 3.Физика механизма гашения дуги при помощи ферромагнитной скобы, охватывающей контактный промежуток.
--	---

	4. Влияние давления, возникающего в коммутационном промежутке при горении дуги, на отключающую способность контактора. 5. Изменение сопротивления дуги в течение полупериода. Причины.
Знать: процессы успешной коммутации электрических цепей	1. Условие гашения дуги переменного тока. От чего зависит напряжение восстанавливающейся прочности?
Уметь: разбираться в системах дугогашения и магнитного дутья в аппаратах постоянного и переменного тока	1. Объяснить, для чего один из исследуемых контакторов имеет геометрию неподвижного контакта U-образной формы. 2. Объяснить, почему неподвижный контакт одного из исследуемых контакторов имеет прямую геометрию. 3. Сравнить напряжение на дуге при гашении в дугогасительной решётке и с применением ферромагнитной скобы. 4. Сравнить гашение дуги в разных контакторах при одинаковых условиях. 5. Определить значение U_0 и соответственно угол сдвига фаз при гашении дуги в заданном контакторе.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Студент ответил на все вопросы, если где-то немного ошибался, то знаний хватает на то, что бы рассуждать по теме и самостоятельно найти и проанализировать свою ошибку.

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Студент не совсем полно ответил на вопросы, но в целом неплохо ориентируется в теме.

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Студент совсем не ответил на некоторые из заданных вопросов, но на базовые вопросы ответ дал.

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Студент ни на что не ответил и не ориентируется в базовых вопросах по ЛР.

КМ-5. Исследование явления восстановления напряжения на полюсах автоматического выключателя (ЛР №15)

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Проводится в течение 4-х академических часов в лаборатории кафедры ЭМЭА.

Краткое содержание задания:

Задание и методические указания

1. Исследование процесса восстановления напряжения в одночастотном контуре

1.1. Рассчитать собственную частоту, скорость восстановления напряжения и коэффициент амплитуды для каждого из контуров 1 и 2 независимо.

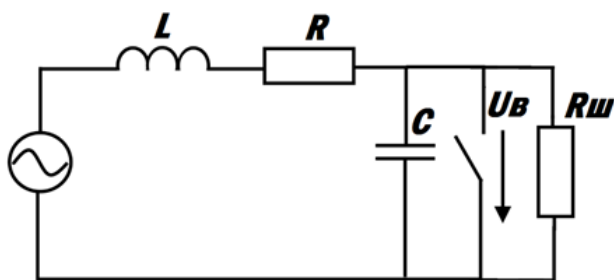


Figure 1 Одночастотный контур

При расчётах учитывать, что $L_1 = 0,056$ Гн, $L_2 = 0,028$ Гн, $C_1 = 0,5$ мкФ, $C_2 = (1200, 3000, 5500, 18200)$ пФ. Это позволяет моделировать изменение длины стационарных шин. Необходимо принимать во внимание в расчётах паразитную ёмкость, которой обладает лабораторный стенд, $C_{\text{пар}} = 300$ пФ. L_1, C_1 образуют контур 1, L_2, C_2 - контур 2.

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{R_{\text{ш}}C}\right)^2} \quad R_{\text{ш}} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} U_{\text{в}} = U_0 (1 - e^{\alpha t} \cos \omega_0 t)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{R_{\text{ш}}C} \right)$$

1.2. Определить экспериментально собственную частоту, скорость восстановления напряжения и коэффициент амплитуды каждого из контуров независимо. Для второго контура эксперименты проводить при изменении ёмкости $C_2 = (1200, 3000, 5500, 18200)$ пФ. Для проведения независимых исследований в контурах использовать ключ SA1, обеспечивающий шунтировку индуктивностей: L_1 - положение №1, L_2 - положение №2.

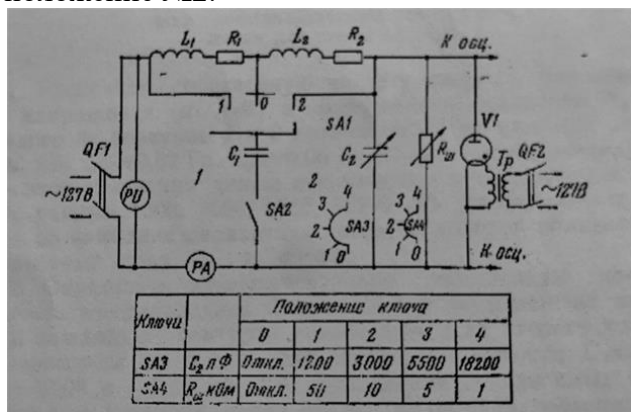


Figure 2 Схема испытательной установки

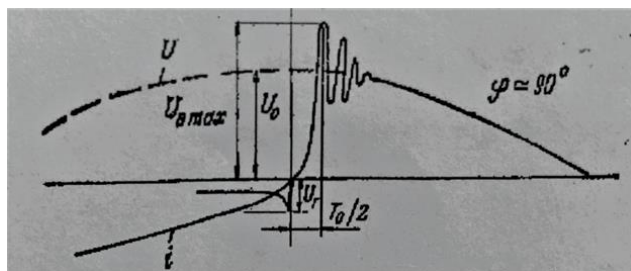


Figure 3 Вид зависимости $U_{\text{в}} = f(t)$

1.3. Построить зависимости, полученные в п.1.2 на графиках, соответствующих п.1.1, и объяснить результаты.

- 1.4. Определить влияние шунтирующего сопротивления на частоту собственных колебаний, скорость восстанавливающегося напряжения и коэффициент амплитуды. Эксперименты проводить на втором контуре при $C_2 = (1200, 18200)$ пФ, а также при изменении шунтирующего сопротивления $R_{ш} = (1000, 5000, 10000, 50000)$ Ом.
- 1.5. Рассчитать критическое сопротивление $R_{ш}$ при ёмкости $C_2 = 5500$ пФ, принимая во внимание, что тиратрон обладает конечным обратным сопротивлением, равным 5кОм.
- 1.6. При условиях п.1.5 методом подбора получить экспериментально критический режим (на осциллографе) сравнить его с расчётным.

2. Исследование двухчастотного контура

2.1. Рассчитать зависимость $U_{в} = f(t)$ для схемы на рис. 4 методом автономных контуров для $t = (160, 350, 650)$ мкс, приняв $L_1 = 0,056$ Гн, $L_2 = 0,028$ Гн, $C_1 = 0,5$ мкФ, $C_2 = 18200$ пФ, $R_1 = 1,4$ Ом, $R_2 = 2,3$ Ом. Определить угол сдвига фаз между током и напряжением.

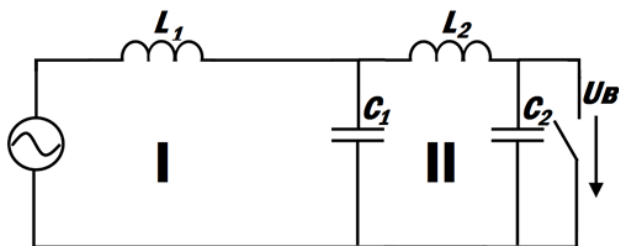


Figure 4 Двухчастотный контур

$$U_{в} = U_0 \left(1 - \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cdot e^{\alpha_1 t} \cos \omega_{01} t - \frac{L_2}{L_1 + L_2} \cdot e^{\alpha_2 t} \cos \omega_{02} t \right) \alpha_1 = -\frac{R_1}{2L_1}; \alpha_2 = -\frac{R_2}{2L_2}$$

$$\omega_{01} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}; \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \left(\frac{dU_{в}}{dt} \right)_{ср} = 4 (f_{01} U_{01} + f_{02} U_{02}) \cdot 10^{-6}$$

$$U_{01} = U_0 \frac{L_1}{L_1 + L_2}; U_{02} = U_0 \frac{L_2}{L_1 + L_2}$$

2.2. Экспериментально получить зависимость $U_{в} = f(t)$, определить $[(dU_{в})/(dt)]_{ср}$, собственные частоты контуров f_{01} , f_{02} и коэффициент амплитуды K_a для особых точек кривой восстанавливающегося напряжения (рис. 6) (первый пик напряжения и максимальное значение) при $C_2 = (1200, 3000, 5500, 18200)$ пФ. Определить по результатам экспериментов наиболее опасные режимы и сопоставить с результатами расчётов в п. 2.1.

2.3. Провести анализ результатов экспериментов по п 1.2, 2.2 и рассчитать величины сопротивлений X_{L1} , X_{C1} , X_{L2} , X_{C2} для соответствующих частот.

2.4. Экспериментально определить влияние величины шунтирующего сопротивления на $[(dU_{в})/(dt)]_{ср}$ и $U_{вmax}$ в особых точках и условие перехода в апериодический режим. Эксперименты проводить для $C_2 = (1200, 18200)$ пФ, а также при изменении шунтирующего сопротивления $R_{ш} = (1000, 5000, 10000, 50000)$ Ом.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: физические процессы при коммутации в электрических аппаратах	1.Каким образом нормируется одночастотный колебательный процесс восстановления напряжения? 2.Каким образом нормируется двухчастотный колебательный процесс восстановления напряжения? 3.Влияние шунтирующих сопротивлений на процесс восстановления напряжения на выключателе. 4.Условия перехода колебательного процесса восстановления напряжения в апериодический.
---	--

Уметь: учитывать факторы, определяющие величины восстанавливающейся прочности и восстанавливающегося напряжения	1. Сравнить расчётные значения, полученные в п.1, с экспериментальными и объяснить их соотношения. 2. Объяснить характеристики одночастотного процесса восстановления напряжения. Составить эквивалентную схему, показать ее определяющие параметры. 3. Объяснить характеристики двухчастотного процесса восстановления напряжения. Составить эквивалентную схему, показать ее определяющие параметры. 4. Объяснить особенности процесса восстановления напряжения при отключении токов намагничивания трансформаторов. 5. Объяснить особенности процесса восстановления напряжения при отключении малых ёмкостных токов (холостых линий).
---	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Студент ответил на все вопросы, если где-то немного ошибался, то знаний хватает на то, что бы рассуждать по теме и самостоятельно найти и проанализировать свою ошибку.

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Студент не совсем полно ответил на вопросы, но в целом неплохо ориентируется в теме.

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Студент совсем не ответил на некоторые из заданных вопросов, но на базовые вопросы ответ дал.

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Студент ни на что не ответил и не ориентируется в базовых вопросах по ЛР.

КМ-6. Исследование автоматических выключателей (ЛР №64)

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Проводится в течение 4-х академических часов в лаборатории кафедры ЭМЭА.

Краткое содержание задания:

Задание

1. Провести испытания при 3-х положениях переключателя SA1, регулирующего угол открытия тиристора: минимальное (5дел), среднее (10дел) и максимальное (15дел). Процесс отключения записывается на 2-х лучевом осциллографе. Регистрируются изменение тока $i(t)$ и напряжения $U_d(t)$ в процессе отключения, соответственно графическое изображение формы сигнала в файле формата bmp и цифровое в МО Exsel файле формата csv.
2. Последовательно в соответствии с расположением автоматических выключателей провести испытания со всеми установленными автоматами во всех вышеприведённых режимах.

Методические указания

1. Определить технические параметры всех исследуемых выключателей: тип выключателя, номинальный ток, номинальное напряжение, кратность уставки по току электромагнитного расцепителя. Остальные технические параметры автоматических выключателей найти в соответствующих каталогах фирм производителей.
2. Результаты испытаний регистрируются в память осциллографа с последующим переносом на внешний накопитель памяти (USB флеш-накопитель). Регистрируются изменение тока $i(t)$ и напряжения $U_d(t)$ в процессе отключения, соответственно графическое изображение формы сигнала в файле формата bmp и цифровое в Excel файле формата csv. В дальнейшем следует произвести построение динамических ВАХ переменного тока для всех полученных режимов.
3. По построенным ВАХ и графикам изменения тока при отключении оценить кратность тока для каждого автоматического выключателя, при котором происходит первичное динамическое размыкание и соответственно вторичное замыкание контактов за счёт действия электромагнитных и электродинамических сил. То есть при смыкании контактов раньше естественного достижения током нулевого значения, если это происходит. Объяснить особенности изменения напряжения в динамике отключения. При обработке осциллограмм одновременно фиксировать ток и время, соответствующие моменту размыкания или замыкания контактов и величину первичного скачкообразного подъёма напряжения.
4. Оценить вероятную величину отброса контактов за счёт электромагнитных и электродинамических сил. Для этого для момента наибольшего значения тока в дуге определить величину тока и напряжения по соответствующим осциллограммам.
Измеренное напряжение на дуге U_d , соответствующее значению тока в этот момент, в свою очередь можно представить в следующем виде
$$U_d = U_{ак} + U_{вн} + U_{ст}, \quad /1/$$
где $U_{ак}$ - сумма анодного и катодного падения напряжений, определяемая в момент размыкания контактов; $U_{вн}$ - падение напряжения на внутреннем сопротивлении испытуемого автоматического выключателя, определяемая при испытании автоматического выключателя при отсутствии отброса контактов в начальный момент появления тока по закону Ома; $U_{ст}$ - падение напряжения на столбе дуги по выражению
$$U_{ст} = l_{ст} * E_{ст}, \quad /2/$$
где $E_{ст}$ - градиент напряжённости в столбе дуги при токе испытаний для соответствующего момента времени, определяемого по выражению
$$E_{ст} = 12,5 + 34 / (I_m)^{0,4} \text{ [В/см]}. \quad /3/$$
Далее из /1/, зная $U_{ак}$ и U_d , определяется $U_{ст}$, затем по выражению /3/ вычисляется $E_{ст}$, после чего из выражения /2/ оценивается ожидаемая величина отброса контактов $l_{ст}$.
5. Оценить степень ограничения тока и длительности существования тока при всех углах открытия тиристора. Длительность существования тока без токоограничения установить по результатам эталонных испытаний стенда в соответствии с уставками угла регулирования включения тиристора рисунок 6. Фиксировать длительность протекания процесса по току и напряжению и отмечать его изменение при разных длительностях уставки угла открытия тиристора в сравнении с эталонными значениями.
6. Оценить время срабатывания механизмов свободного расцепления для всех типов исследованных выключателей.
7. Оценить степень влияния пневмоприставки на динамику размыкания автоматического выключателя для тех типов, у кого они имеются. Объяснить механизм действия пневмоприставки.
8. Объяснить физику явлений в контактах, приводящих к отбросу контактов при включении.

9. По каталогам фирм – производителей изучить конструктивные особенности контактно - дугогасительных систем исследуемых автоматических выключателей. Отметить их поведение в режиме короткого замыкания, наличие или отсутствие токоограничивающего эффекта, объяснить причины этого. Сравнить результаты срабатывания магнитных расцепителей автоматических выключателей с каталожными данными аналогов и дать им объяснения

Контрольные вопросы/задания:

Знать: особенности конструкции дугогасительных устройств и способы воздействия на дугу в электрических аппаратах	1. Явление токоограничения - условия его возникновения, устройства в которых оно всегда присутствует. 2. Электродинамические силы в контактах причина их возникновения. 3. Роль геометрии токоведущего контура в возникновении сил отталкивания контактов. 4. Требования к токоограничивающим выключателям по быстродействию.
Уметь: разбираться в системах дугогашения и магнитного дутья в аппаратах постоянного и переменного тока	1. Объяснить, почему одни автоматические выключатели обладают токоограничивающим эффектом, а у других он отсутствует. 2. Объяснить, почему все модульные автоматические выключатели являются токоограничивающими, а корпусные не все. 3. Объяснить роль конфигурации токоведущего контура на наличие или отсутствие токоограничивающего эффекта у корпусных автоматических выключателей. 4. Объяснить, можно ли использовать автоматические выключатели переменного тока для защиты цепей постоянного тока. 5. Объяснить, можно ли использовать модульный автоматический выключатель с предельным током отключения 6 кА в цепи с ожидаемым током к.з. 10 кА?

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Описание характеристики выполнения знания: Студент ответил на все вопросы, если где-то немного ошибался, то знаний хватает на то, что бы рассуждать по теме и самостоятельно найти и проанализировать свою ошибку.

Оценка: 4

Описание характеристики выполнения знания: Студент не совсем полно ответил на вопросы, но в целом неплохо ориентируется в теме.

Оценка: 3

Описание характеристики выполнения знания: Студент совсем не ответил на некоторые из заданных вопросов, но на базовые вопросы ответ дал.

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Студент ни на что не ответил и не ориентируется в базовых вопросах по ЛР.

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Физика процесса гашения дуги в коммутационных аппаратах в диапазоне токов релейной нагрузки на постоянном токе. Чем ограничена возможность использования аппроксимаций статических ВАХ для этих целей?
2. Восстанавливающееся напряжение в одночастотном контуре, амплитуда и скорость восстановления. Факторы, влияющие на процесс восстановления напряжения. Влияние частоты восстанавливающегося напряжения на процесс дугогашения.
3. Определить величину первого пика напряжения, величину тока короткого замыкания на зажимах выключателя, начальную скорость восстановления напряжения и тока на выключателе при неудалённом коротком замыкании. Максимальная мощность короткого замыкания $P = 1200 \text{ МВА}$, напряжение сети $U = 220 \text{ кВ}$; удаление места короткого замыкания $0,5; 1,0; 3,0; 5,0 \text{ км}$; удельное индуктивное сопротивление линии $0,45 \text{ Ом/км}$, волновое сопротивление линии $Z = 450 \text{ Ом}$.

Процедура проведения

Экзамен проводится очно в аудитории по билетам. Студентам дается 60 минут на подготовку к ответу. Далее осуществляется беседа преподавателя и студента.

1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-4_{ПК-3} Демонстрирует знание коммутационных и дуговых процессов в электрических аппаратах, проводит исследование электрических аппаратов

Вопросы, задания

- 1.1. Физика процесса гашения дуги в коммутационных аппаратах в диапазоне токов релейной нагрузки на постоянном токе. Чем ограничена возможность использования аппроксимаций статических ВАХ для этих целей?
2. Восстанавливающееся напряжение в одночастотном контуре, амплитуда и скорость восстановления. Факторы, влияющие на процесс восстановления напряжения. Влияние частоты восстанавливающегося напряжения на процесс дугогашения.
3. Определить величину первого пика напряжения, величину тока короткого замыкания на зажимах выключателя, начальную скорость восстановления напряжения и тока на выключателе при неудалённом коротком замыкании. Максимальная мощность короткого замыкания $P = 1200 \text{ МВА}$, напряжение сети $U = 220 \text{ кВ}$; удаление места короткого замыкания $0,5; 1,0; 3,0; 5,0 \text{ км}$; удельное индуктивное сопротивление линии $0,45 \text{ Ом/км}$, волновое сопротивление линии $Z = 450 \text{ Ом}$.
- 2.1. Явления при размыкании контактов с током нагрузки. Жидкометаллический мостик и процессы, приводящие к возникновению дуги. Минимальные параметры дугообразования.
2. Вхождение дуги в дугогасительную решётку. Механизм образования опорных точек дуги в дугогасительной решётке. Необходимое условие для образования опорных пятен на пластинах.

3. Определить среднюю длину свободного пробега электрона в атмосфере азота при давлении $P = 2.105$ Па и температуре $T = 7000$ К. Концентрация молекул при нормальном давлении и температуре 0°C $N_0 = 2.7 \cdot 10^{19}$ 1/см³.
- 3.1. Физика процесса гашения дуги в коммутационных аппаратах в дугогасительной системе типа ферромагнитная скоба на постоянном токе. В чём противоречивость этих процессов и чем ограничена область её применения?.
2. Процессы при отключении не удалённого короткого замыкания. Амплитуда восстанавливающегося напряжения, время её появления. Ожидаемый ток короткого замыкания и факторы его определяющие.
3. Номинальный ток отключения выключателя $I_{\text{ном}} = 50$ кА. Определить ударный ток и величину апериодической составляющей при отключении тока короткого замыкания, если время срабатывания релейной защиты 10 мс, собственное время выключателя 40 мс, постоянная времени затухания апериодической составляющей 45 мс.
- 4.1. Процессы, протекающие на катоде после перехода тока дуги через нуль, определяющие начальную восстанавливающуюся прочность. Влияние тока отключения на величину начальной восстанавливающейся прочности.
2. Условие гашения дуги постоянного тока. Баланс носителей в столбе дуги, процессы ионизации и деионизации в столбе дуги и факторы, определяющие их.
3. Определить частоту, ток короткого замыкания за выключателем и скорость восстановления напряжения на выключателе, установленном за трансформатором, если $P = 5000$ МВА; напряжение $U = 220$ кВ; ёмкость фазы трансформатора на землю $C = 2000$ пФ. Нейтраль не заземлена.
- 5.1. Механизм возникновения и существования дуги в вакууме. Явление среза тока и условия гашения дуги.
2. Процессы на катоде после перехода тока дуги через нуль, определяющие начальную восстанавливающуюся прочность. Процессы, протекающие в зоне положительного объёмного заряда и зоне ионизации.
3. Определить частоту и коэффициент амплитуды переходного восстанавливающегося напряжения при отключении короткого замыкания у выключателя, если индуктивность цепи составляет $L = 0.005$ Гн, ёмкость на землю $C = 2500$ пФ, активное сопротивление $R = 0.5$ Ом.
- 6.1. Условия возникновения дуги при размыкании контактов с током нагрузки, процессы на катоде, приводящие к образованию плазменного разряда. Термоионизация в столбе дуги. Формула Саха.
2. Что такое коэффициент схемы при отключении 3х фазной цепи переменного тока? Схемы замещения для каждого коммутирующего полюса и величина коэффициента схемы.
3. Определить критическую длину и критическую величину тока и напряжения, соответствующие условию гашения дуги, если напряжение источника постоянного тока $U_{\text{ном}} = 110$ В, сопротивление цепи нагрузки $0,4$ Ом, аппроксимация вольтамперной характеристики $E = 67 \cdot I_m^{-1/3}$ В/см. Построить вольтамперную характеристику дуги соответствующую критической длине дуги.
- 7.1. Баланс носителей в столбе дуги. Факторы влияющие на процессы ионизации и деионизации. Задача, решаемая в любом типе дугогасительного устройства, приводящая к гашению дуги.
2. Чем заканчивается размыкание контактов с токовой нагрузкой? Последовательность процессов, приводящих к возникновению дугового процесса. Минимальные параметры дугообразования.
3. Определить какая часть от общего числа частиц газа находится в ионизированном состоянии при условии, что энергия ионизации газа $U_i = 7.75$ эВ, температура газа $T = 4000$ К, давление $4 \cdot 10^5$ Па.

- 8.1. Понятие «критические токи» и «критические радиусы» опорных точек дуги и факторы, влияющие на них. Влияние тока отключения и материала контактов на начальную восстанавливающуюся прочность.
2. Факторы, влияющие на процесс восстановления напряжения в одночастотном контуре. Влияние характера нагрузки и частоты восстанавливающегося напряжения на условия гашения дуги.
3. Определить возможное перенапряжение при обрыве цепи постоянного тока с величиной тока 25А, если к зажимам индуктивности 1,5 мГн подключена ёмкость 0,1 мФ.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Что такое коммутация электрических цепей?

Ответы:

- а) изменение соединений в электрических цепях (включение, отключение и переключение их отдельных частей), выполняемое при помощи специальной аппаратуры
- б) режим, возникающий в электрической цепи при переходе от одного стационарного состояния к другому
- в) электрическое соединение двух точек электрической цепи с различными значениями потенциала, не предусмотренное конструкцией устройства и нарушающее его нормальную работу
- г) величина, характеризующая противодействие электрической цепи электрическому току

Верный ответ: а)

2. В цепях с каким родом тока проще погасить электрическую дугу?

Ответы:

- а) постоянного тока
- б) переменного тока
- в) гашение дуги не зависит от рода тока
- г) электрическую дугу не нужно гасить

Верный ответ: б)

3. Выберите условие успешного гашения дуги на постоянном токе.

Ответы:

- а) температура дуги должна линейно уменьшаться
- б) индукция магнитного поля, создаваемого дугой, должна быть больше индукции магнитного поля, создаваемого источником
- в) давление дуги равно атмосферному давлению
- г) вольтамперная характеристика дуги лежит выше реостатной характеристики коммутируемой цепи

Верный ответ: г)

4. Что такое восстанавливающаяся прочность?

Ответы:

- а) способность подвижного контакта сопротивляться электродинамическим усилиям в процессе размыкания
- б) способность подвижного контакта сопротивляться электродинамическим усилиям в процессе замыкания
- в) нарастающая электрическая прочность межконтактного промежутка в процессе отключения цепи
- г) тепловая прочность материала контактов в течение горения дуги

Верный ответ: в)

5. Что такое восстанавливающееся напряжение?

Ответы:

- а) напряжение на коммутирующем элементе аппарата, нарастающее в процессе отключения цепи
- б) напряжение на источнике после коммутации цепи
- в) напряжение на нагрузке после коммутации цепи
- г) минимальное напряжение, которое должно быть приложено к коммутирующему элементу аппарата, чтобы он начал проводить ток

Верный ответ: а)

6. *От чего зависят восстанавливающаяся прочность и восстанавливающееся напряжение?*

Ответы:

- а) восстанавливающаяся прочность – от напряжения источника; восстанавливающееся напряжение – от электродинамических сил, приложенных к подвижному контакту
- б) восстанавливающаяся прочность – от электродинамических сил, приложенных к подвижному контакту; восстанавливающееся напряжение – от напряжения источника
- в) восстанавливающаяся прочность – от параметров коммутируемой цепи; восстанавливающееся напряжение – от параметров дугогасительных устройств и свойств межконтактного промежутка
- г) восстанавливающаяся прочность – от параметров дугогасительных устройств и свойств межконтактного промежутка; восстанавливающееся напряжение – от параметров коммутируемой цепи

Верный ответ: г)

7. *Выберите условие успешного гашения дуги на переменном токе.*

Ответы:

- а) дуга гаснет самостоятельно после перехода тока через нулевое значение
- б) вольтамперная характеристика дуги лежит выше реостатной характеристики коммутируемой цепи
- в) за переходом тока через нулевое значение кривая восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка аппарата будет лежать выше кривой переходного восстанавливающегося напряжения на этом промежутке
- г) индукция магнитного поля, создаваемого дугой, должна быть больше индукции магнитного поля, создаваемого источником

Верный ответ: в)

8. *Основной причиной возникновения электрической дуги при коммутации электрических аппаратов является:*

Ответы:

- а) трансформация электромагнитной энергии, запасенной в электрической цепи в энергию, рассеиваемую в виде тепла (в значительной степени)
- б) наличие свободных заряженных частиц, находящихся на контактах
- в) изменение во времени магнитного поля в межконтактном зазоре, индуцирующего ЭДС между контактами
- г) созданное источником электрическое поле

Верный ответ: а)

9. *Что такое срез тока?*

Ответы:

- а) явление спада тока с очень большой скоростью до естественного перехода тока через нуль
- б) мгновенное отключение цепи в случае возникновения короткого замыкания
- в) явление резких процессов уменьшения тока нагрузки и увеличения тока дуги
- г) подключение параллельно к контактам резистора (шунта)

Верный ответ: а)

10. *К каким последствиям приводит срез тока?*

Ответы:

- а) помогает погасить дугу
- б) ток дуги резко увеличивается
- в) устраняет аварийный режим в цепи
- г) приводит к опасным перенапряжениям, и дуга может загореться вновь

Верный ответ: г)

11. *Что такое автоэлектронная эмиссия катода?*

Ответы:

- а) испускание электронов нагретым катодом
- б) испускание электронов катодом под действием падающего на его поверхность излучения
- в) испускание электронов катодом при его бомбардировке ионами дуговой плазмы
- г) испускание электронов катодом под действием внешнего электрического поля без предварительного возбуждения этих электронов (без дополнительных затрат энергии)

Верный ответ: г)

12. *Каковы особенности процесса восстановления напряжения при отключении неудаленного короткого замыкания (источник синусоидального тока)?*

Ответы:

- а) нет никаких особенностей
- б) учитывается отраженная волна; восстанавливающееся напряжение постоянно, что сводит задачу гашения дуги к аналогичной на постоянном токе
- в) учитывается отраженная волна; восстанавливающееся напряжение имеет пилообразную форму с высокой крутизной, что усложняет гашение дуги
- г) учитывается отраженная волна; восстанавливающееся напряжение имеет пилообразную форму с низкой крутизной, что облегчает гашение дуги

Верный ответ: в)

13. *Что такое магнитное дутье?*

Ответы:

- а) метод гашения дуги, при котором пластины дугогасительной решетки состоят из постоянных магнитов
- б) отклонение дуги от оси в результате действия магнитных полей
- в) влияние электромагнитного расцепителя аппарата на дугу
- г) возникновение магнитного поля в столбе дуги

Верный ответ: б)

14. *К каким последствиям приводит магнитное дутье?*

Ответы:

- а) дуга становится толще, что затрудняет ее гашение
- б) дуга растягивается, попадает в дугогасительное устройство, где впоследствии охлаждается и гаснет
- в) в дуге возникает ЭДС самоиндукции, что приводит к опасным перенапряжениям
- г) возникают вихревые токи в контактах за счет магнитного поля дуги

Верный ответ: б)

15. *Как влияет увеличение числа разрывов в дугогасительной решетке на восстанавливающуюся прочность?*

Ответы:

- а) не влияет
- б) уменьшается
- в) увеличивается
- г) вначале увеличивается, а затем уменьшается (критическое число разрывов), поскольку увеличивается количество металлических пластин, каждая из которых ионизируется и за счет этого поддерживает горение дуги

Верный ответ: в)

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

Оценка: 2

Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

В приложение к диплому выносится оценка за освоение дисциплины за 8 семестр, полученная на основании семестровой составляющей и экзаменационной составляющей.