

ФГБОУФГБОУ
«Ставропольский государственный аграрный университет»
Электроэнергетический факультет
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

В. А. Кобозев, М. А. Мельников, П. В. Коваленко, А. И. Адошев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Лабораторный практикум:
учебное пособие

Ставрополь, 2015

УДК 621.316

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры ПЭЭСХ СтГАУ С.Н. Антонов

Кобозев В. А.

Электрические и электронные аппараты: лабораторный практикум: учебное пособие / В.А. Кобозев, М.А. Мельников, П.В. Коваленко, А.И. Адошев – Ставрополь: Сервисшкола, 2015. - 80 с.

В учебном пособии приведены краткие теоретические сведения по основным темам курса «Электрические и электронные аппараты», методические указания по выполнению лабораторно-практических занятий, формы индивидуальных заданий и необходимые справочные материалы.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 140400 – «Электроэнергетика и электротехника» и 110800 – «Агроинженерия».

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электрические и электронные аппараты», которая согласно государственному образовательному стандарту входит в систему подготовки бакалавров и дипломированных специалистов по направлениям подготовки 140400 – «Электроэнергетика и электротехника» и 110800 – «Агроинженерия».

Утвержденными на электроэнергетическом факультете СтГАУ рабочими программами предусмотрено 8 лабораторно-практических занятий, в результате выполнения которых студенты должны освоить:

- основы расчета электродинамических сил;
- методы расчёта и экспериментальных исследований температуры нагрева электрических аппаратов и определения постоянной времени нагрева;
- методику определения переходного сопротивления электрических контактов и его зависимости от контактного нажатия;
- свойства и характеристики электрической дуги и способы её гашения в электрических аппаратах;
- конструкцию, характеристики и методику выбора низковольтных автоматических выключателей;
- конструкцию пакетно-кулачковых переключателей и магнитных пускателей и способы их наладки;
- назначение, принцип действия, и методы исследования характеристик различных электромеханических реле;
- назначение, схемы включения, и способы определения погрешности трансформаторов тока и напряжения.

Пособие построено таким образом, чтобы максимально облегчить студентам самостоятельную подготовку. С этой целью в начале методических указаний к каждому из занятий приводятся краткие теоретические сведения по соответствующей теме.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторно-практические занятия проводятся в учебной лаборатории кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования на специализированном комплекте оборудования ИПЦ «Учебная техника» (рис. В.1), особенностью которого является модульный принцип построения.

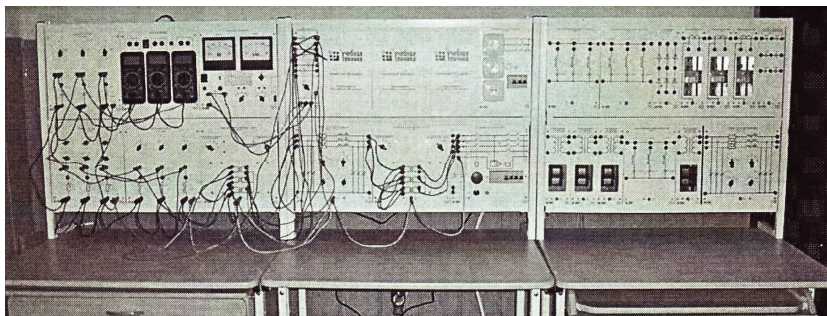


Рисунок В.1 - Общий вид комплекта учебного оборудования

При первом знакомстве с лабораторией студентам необходимо ознакомиться с конструкцией стенов, обращая особое внимание на расположение коммутационных аппаратов, обеспечивающих включение и отключение самих стенов и отдельных модулей.

Для измерения постоянного и переменного тока, напряжения, температуры, сопротивления и других параметров в стендах используются многофункциональные приборы (мультиметры). Необходимо внимательно выбирать измеряемый параметр и пределы измерений.

Особое внимание перед включением модулей регулируемых блоков питания следует обращать на правильность начальной установки рукояток автотрансформаторов, поскольку при проведении различных опытов требуется напряжение от нуля до номинального значения, и неправильная его установка может привести к выходу из строя оборудования.

На первом занятии студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале, ознакомиться с правилами поведения в лаборатории, и далее неукоснительно соблюдать их. Нарушители от занятий отстраняются.

Смена модулей, монтаж и любые изменения схем производятся только при полностью выключенных стендах.

Категорически запрещается включать стенд без предварительной проверки ведущим занятию преподавателем!

В случае возникновения внештатной ситуации (искрение, запах горения и др.) необходимо немедленно выключить общий автоматический выключатель, и обратиться к преподавателю, не пытаясь самостоятельно устранить неисправность.

При подготовке к работе студент должен.

1. Изучить соответствующий раздел лекционного материала, и теоретические сведения, приведенные в настоящем пособии.
2. Хорошо представлять себе возможный конечный результат в виде характеристик, значений измеряемых и рассчитываемых параметров и т.д.
3. Знать принцип действия схемы установки и точный порядок выполнения всех операций.
4. Подготовить отчет, в который далее будут вноситься полученные в ходе выполнения работы данные.

Готовность студента к занятиям работы проверяется преподавателем в ходе опроса до выполнения работы.

После завершения экспериментальных исследований и расчетов оформляется окончательный отчет, который предъявляется для проверки преподавателю. Защита отчета производится путем индивидуального собеседования.

Занятие № 1

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

1. Основные теоретические сведения

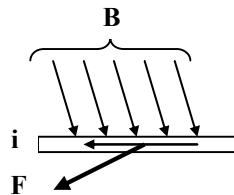
При протекании тока по проводнику, помещенному в магнитное поле, возникает электродинамическая сила, равная:

$$f_{\text{эд}} = BIl \sin \alpha, \quad (1.1)$$

где I - активная (помещенная в поле часть проводника); B - индукция, пронизывающая данный проводник; α - угол между направлениями вектора электромагнитной индукции и тока.

Направление этой силы определяется правилом «левой руки»: если силовые линии магнитного поля входят в ладонь, а четыре пальца указывают направление тока, отогнутый большой палец покажет направление силы (рис. 1.1).

Рисунок 1.1 - Электродинамическая сила, действующая на помещенный в магнитное поле проводник

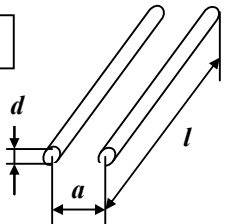


Для системы из нескольких проводников любой из них расположен в магнитном поле, создаваемом токами других проводников. Аналогичные явления возникают при взаимодействии проводника с ферромагнитной массой, а также в одном проводнике сложной формы. Магнитная индукция пропорциональна току, и при заданной конфигурации проводников и их взаимном расположении формула (1.1) записывается следующим образом:

$$f_{\text{эд}} = c i_1 i_2; \quad f_{\text{эд}} = c i^2. \quad (1.2)$$

Значения коэффициента пропорциональности «с» (коэффициента контура) при силе в ньютонах и токе в амперах) зависят от геометрических размеров, конфигурации и взаимного расположения проводников, которые приведены в таблице.

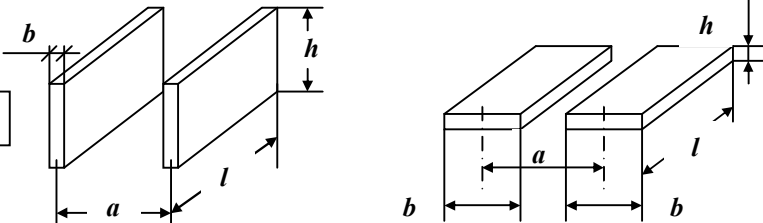
1



$a \gg d$

$$c = 10^{-7} \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \frac{a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \right)$$

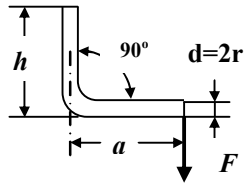
2



$\frac{a-b}{b+h}$	$\frac{b}{h}$				
	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0
0,2	0,36	0,43	0,5	0,55	0,58
0,5	0,43	0,46	0,5	0,53	0,55
0,8	0,46	0,48	0,51	0,52	0,53
1,0	0,47	0,49	0,51	0,52	0,53
1,4	0,48	0,5	0,51	0,52	0,53

$c = 10^{-7} \frac{2l}{a} k_{\phi}$,
где коэффициент формы является функцией отношений: $\frac{a-b}{b+h}$; $\frac{b}{h}$ и определяется по таблице

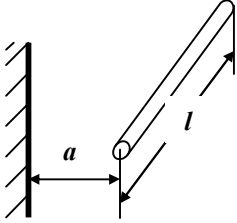
3



Сила разгибает угол:

$$c = 10^{-7} \left(\ln \frac{a}{h + \sqrt{a^2 + h^2}} - \ln \frac{r}{h + \sqrt{r^2 + h^2}} \right)$$

4



Сила притягивает проводник к ферромагнитной стенке:

$$c = 10^{-7} \frac{l}{a}$$

При синусоидальном однофазном токе формула (1.2) имеет вид:

$$f_{эд} = ci^2 = cI_m^2 \sin^2 \omega t = cI_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = cI_d^2 - cI_d^2 \cos 2\omega t, \quad (1.3)$$

где: $I_T = \sqrt{2}I_d$, откуда очевидно, что электродинамическая сила имеет две составляющих: постоянную и переменную (рис. 1.2).

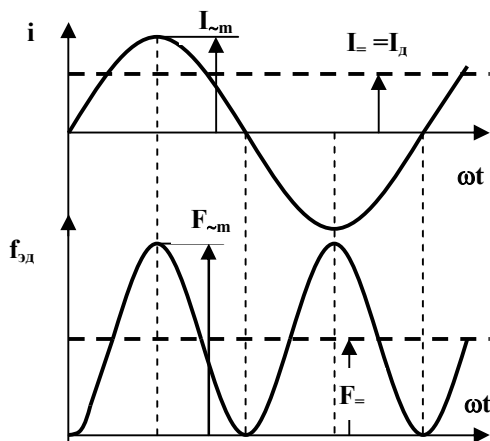


Рисунок 1.2 - Электродинамические силы при однофазном переменном токе

Постоянная составляющая равна той, которая получается при том же значении постоянного тока, что и действующее значение переменного тока, а переменная имеет равное ей амплитудное значение, но пульсирует с двойной частотой. Максимальное значение электродинамической силы при переменном однофазном токе получается в два раза большим, чем при постоянном:

$$F_m = cI_m^2 = 2cI_d^2 = 2cI_{=}^2 \quad (1.4)$$

Наиболее тяжёлые явления возникают при коротких замыканиях. Ударный ток, возникающий примерно через половину периода (0,01 с) значительно – в 1,8 раз превышает амплитуду установившегося значения тока короткого замыкания, что приводит к возрастанию электродинамических сил по сравнению с коротким замыканием на постоянном токе в 6,5 раза.

Поскольку сам установившийся ток короткого замыкания иногда в 20 ...30 превышает номинальный, электродинамические силы возрастают в сотни и даже тысячи раз, что представляет большую опасность для электрических аппаратов.

2. Задание на расчёт

Дано: напряжение источника питания U_n ; собственное сопротивление короткого замыкания источника и проводников $Z_k = r_k + jx_k$, сопротивление линии $Z_l = r_l + jx_l$ и сопротивление нагрузки $Z_n = r_n + jx_n$.

Точки короткого замыкания: 1 – «б» и «в» (на нагрузке); 2 – «а» и «в» (на шинах источника).

Требуется определить: величину и характер изменения во времени электродинамических сил, действующих в системе проводников заданной конфигурации: а – в номинальном режиме работы; б – в режиме установившегося короткого замыкания; в - максимальную силу при действии ударного тока. Сделать выводы.

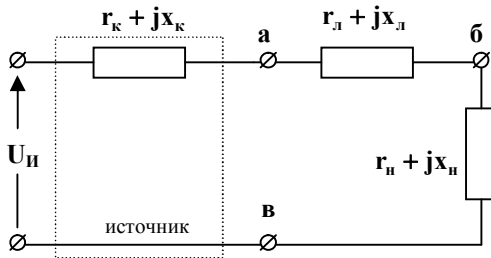


Рисунок 3 - Расчётная схема

3. Порядок расчета

Находим токи: в номинальном режиме работы, в режимах установившегося короткого замыкания и ударные токи:

$$I_{ном} = \frac{U_n}{\sqrt{(r_k + r_l + r_n)^2 + (x_k + x_l + x_n)^2}};$$

$$I_{к.з.уст.1} = \frac{U_{и}}{\sqrt{(r_{к} + r_{л})^2 + (x_{к} + x_{л})^2}}; \quad I_{к.з.уд.1} = 1,8I_{к.з.уст.1};$$

$$I_{к.з.уст.2} = \frac{U_{и}}{\sqrt{r_{к}^2 + x_{к}^2}}; \quad I_{к.з.уд.2} = 1,8I_{к.з.уст.2}$$

Выбираем по таблице нужную формулу расчёта и определяем коэффициент контура электродинамических усилий «с».

По формуле (1.3) определяем законы изменения мгновенных значений электродинамических сил в установившихся режимах работы (начальная фаза не учитывается):

$$f_{эд.ном} = c(\sqrt{2}I_{ном})^2 \sin^2 \omega t = cI_{ном}^2 - cI_{ном}^2 \cos 2\omega t;$$

$$f_{эд.к.з.уст.1} = c(\sqrt{2}I_{к.з.уст.1})^2 \sin^2 \omega t = cI_{к.з.уст.1}^2 - cI_{к.з.уст.1}^2 \cos 2\omega t;$$

$$f_{эд.к.з.уст.2} = c(\sqrt{2}I_{к.з.уст.2})^2 \sin^2 \omega t = cI_{к.з.уст.2}^2 - cI_{к.з.уст.2}^2 \cos 2\omega t.$$

Данные расчетов для каждого случая заносим в таблицу по следующей форме:

ωt , град.	0	15	30	45	60	75	90
$\cos \omega t$							
$cI^2 \cos 2\omega t$							
$f_{эд}(\omega t)$							
.....							

4. Строим зависимости: $f_{эд.ном}(\omega t)$, $f_{эд.к.з.уст.1}(\omega t)$, $f_{эд.к.з.уст.2}(\omega t)$.

5. Максимальные значения электродинамических сил:

$$F_{max.ном.} = 2cI_{ном}^2; \quad F_{max.к.з.уст.1} = 2cI_{к.з.уст.1}^2; \quad F_{max.к.з.уст.2} = 2cI_{к.з.уст.2}^2.$$

Электродинамические силы при возникновении ударных токов короткого замыкания:

$$F_{уд.1} = 6,5cI_{к.з.уст.1}^2; \quad F_{уд.2} = 6,5cI_{к.з.уст.2}^2$$

Контрольные вопросы

1. Пояснить, за счет чего возникают и от чего зависят электродинамические силы.
2. Пояснить физический смысл и способы определения коэффициента контура «с».
3. В чем заключаются различия между электродинамическими силами при постоянном и переменном токе?
4. Пояснить, от каких параметров расчетной схемы зависят токи и электродинамические силы.
5. Как определяется ударный ток короткого замыкания и чем опасны возникающие при этом электродинамические силы? Дать количественную оценку.
6. Пояснить порядок расчета электродинамических сил при различных условиях.

Форма индивидуального задания

Индивидуальное задание на расчет к работе №1 по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» студенту _____

Определить величину и характер изменения во времени электродинамических сил, действующих в системе проводников заданной конфигурации: а – в номинальном режиме работы; б – в режиме установившегося короткого замыкания; в - максимальную силу при действии ударного тока.

№ вар.	U	$r_k + jx_k$	$r_l + jx_l$	$r_n + jx_n$	a	l	b	d	h

Задание выдал: _____
Дата

Подпись

_____ ФИО преподавателя

Занятие № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА КАТУШЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Цель занятия: изучить методы расчёта и экспериментального определения температуры нагрева катушек электрических аппаратов и постоянной времени нагрева

Общие теоретические сведения

При прохождении тока через катушку электрического аппарата в ней возникают потери и происходит выделение тепла. Одновременно с этим идёт отдача тепла в окружающую среду.

Тепловые процессы инерционны, поэтому температура нагрева зависит не только от величины потерь, но и от времени, причём она не должна превышать предельно допустимых значений.

Для однородного объекта нагрев при неизменных потерях описывается уравнением:

$$\tau_i = \tau_{\text{нач.}i} + (\tau_{\text{уст.}i} - \tau_{\text{нач.}i}) \left(1 - e^{-t_i/T_n} \right), \quad (2.1)$$

где $\tau_{\text{нач.}i}$ - превышение температуры нагрева над температурой окружающей

среды в начале рассматриваемого интервала времени t_i ; $\tau_{\text{уст.}i} = \frac{\Delta P_i}{A}$

- установившееся значение превышения температуры для потерь ΔP_i ;

$T_n = \frac{C}{A}$ - постоянная времени нагрева.

Теплоёмкость C и теплоотдача A при неизменных условиях охлаждения также неизменны, поэтому постоянная времени нагрева не зависит от потерь, и представляет собой время, за которое объект нагрелся бы до установившегося значения превышения температуры, если бы не было отдачи тепла в окружающую среду.

Если начальное значение превышения температуры на рассматриваемом интервале превышает установившееся при данных потерях: $\tau_{\text{нач.}i} > \tau_{\text{уст.}i}$ происходит охлаждение. При отключении потери и установившееся превышение температуры равны нулю: $\Delta P = 0$; $\tau_{\text{уст.}} = 0$, и уравнение (2.1) преобразуется к виду:

$$\tau_i = \tau_{\text{нач},i} e^{-t_i / \Gamma_{\text{охл}}} . \quad (2.2)$$

Постоянные времени нагрева и охлаждения равны между собой, если условия охлаждения неизменны, и различны, если они изменяются, например, – вследствие отключения вентиляции.

Катушка представляет собой неоднородное в тепловом отношении тело, состоящее из самого проводника, изоляции, прослоек воздуха и различных пропиточных составов. Тепло, выделяемое в её объёме, проходит к охлаждающей поверхности через материалы, обладающие различной теплопроводностью. Пропитка обмоток специальными составами выравнивает эту неоднородность и повышает общую теплоотдачу на 5...10%.

Различные участки поверхности катушек в различной степени участвуют в теплоотдаче: обычно затруднён отвод тепла от внутренних слоёв и торцовых частей, что приводит к тому, что температура нагрева в различных точках объёма обмоток будет неодинаковой: температура нагрева внутри катушки всегда несколько больше, чем снаружи. Фактически процесс нагрева и охлаждения обмоток представляет собой сложное явление, которое имеет аналитическое описание лишь в частных случаях и в сильно упрощённом виде.

На рис. 2.1-а приведена типичная картина распределения температур катушек, охлаждаемых в основном с внешних (боковых) поверхностей. Минимальное превышение температуры τ_{min} имеет место для внешнего слоя обмотки, а максимальное τ_{max} – внутри катушки, ближе к внутренней поверхности. Это происходит из-за того, между обмоткой и магнитопроводом имеется обычно лишь небольшой зазор и условия теплоотдачи в нём затруднены. Изотермы (линии равных температур) проходят параллельно оси катушки при отсутствии охлаждения с торцов и внутренних поверхностей. Если охлаждение с этих поверхностей всё же имеет место, они принимают вид, показанный на рис. 2.1-б. Наиболее высокое значение имеет температура нагрева в малом объёме, близком к геометрическому центру, а изотермы «расходятся» к поверхности обмотки с понижением температуры ($\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$). Оптимальное направление основных охлаждающих потоков воздуха зависит от геометрии катушки: при большой высоте и малой толщине предпочтительнее охлаждение с наружной поверхности, при малой высоте и большой толщине (дисковые обмотки) – с торцов.

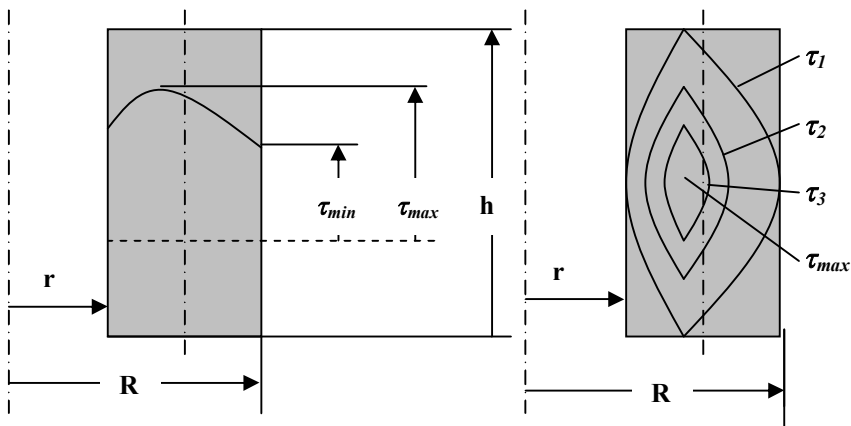


Рисунок 2.1 – Распределение температуры в катушке

Тепло, выделяемое обмоткой, отдаётся в окружающую среду через её поверхность. Полная поверхность охлаждения равна:

$$F = \pi h(D + d) + \frac{\pi}{2}(D^2 - d^2), \quad (2.3)$$

где первое слагаемое определяет сумму наружной и внутренней поверхностей, а второе – поверхность торцов. Эквивалентные внешний и внутренний диаметр прямоугольных катушек можно найти по внешнему и внутреннему периметрам:

$$D \approx \frac{l_{\text{внеш}}}{\pi}; d \approx \frac{l_{\text{внутр}}}{\pi} \quad (2.4)$$

В зависимости от конструкции катушек ухудшение условий охлаждения в отдельных её частях учитывается поправочным коэффициентом. При преимущественном охлаждении снаружи минимальная температура нагрева будет равна:

$$\tau_{\min} = \frac{I^2 R_t}{F_{\text{наруж}} \cdot k_m} = \frac{\Delta P}{F_{\text{наруж}} \cdot k_m}, \quad (2.5)$$

где R_t - активное сопротивление обмотки, приведённое к соответствующей температуре нагрева: $R_t = R_0 \left(1 + \alpha (t_{\text{нагр.}}^{\circ} - t_{\text{o.c.}}^{\circ}) \right)$; k_m - средний коэффициент теплоотдачи, равный $(10 \dots 15) \times 10^{-4} \text{ Вт/см}^2$.

Перепад между минимальной и максимальной температурами определяется по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{q}{4\lambda_3} (R^2 - r^2) + \frac{q}{2\lambda_3} r^2 \ln \frac{r}{R}, \quad (2.6)$$

где $q = \frac{\Delta P}{\pi h (R^2 - r^2)}$ - потери на единицу объёма катушки, Вт/см^3 ; λ_3 - эквивалентный коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/см} \times ^\circ\text{C}$; h, R, r - геометрические размеры катушки, см.

Для катушек из круглого обмоточного провода:

$$\lambda_3 = 0,6\lambda_n \left(\frac{d_{\text{np}}}{2\delta} \right), \quad (2.7)$$

Для катушек из прямоугольного провода:

$$\lambda_3 = \lambda_n \frac{a(b + 2\delta)}{2\delta(a + 2\delta)}, \quad (2.8)$$

где $\lambda_n = (1 \dots 2) \times 10^{-3} \text{ Вт/см} \times ^\circ\text{C}$ - коэффициент теплопроводности изоляции; δ - толщина изоляции, $d_{\text{np}}, (a, b)$ - геометрические размеры провода. Средние значения величины $\frac{d_{\text{np}}}{2\delta}$ для эмалированных проводов малых диаметров составляют $(6 \dots 10)$.

Максимальная температура нагрева не должна превышать предельно допустимой температуры изоляции:

$$t_{\text{max}}^{\circ} = t_{\text{o.c.}}^{\circ} + \tau_{\text{min}} + \Delta\tau \leq t_{\text{из.дон}}^{\circ} \quad (2.9)$$

Надёжная работа электрических аппаратов в течение всего срока их службы обеспечивается в том случае, если температура не превышает допустимого значения. Допустимая температура изоляции при температуре окружающей среды $40 \text{ }^\circ\text{C}$ определяется классом нагревостойкости: **A** (105°C); **E** (120°C); **B** (130°C); **F** (155°C).

Определение постоянной времени нагрева

1. Подставляя в уравнение (2.1) значения времени: $t = T_n$; $t = 2T_n$; $t = 3T_n$, нетрудно убедиться в том, что множитель $\left(1 - e^{-t/T_n}\right)$ принимает соответственно следующие значения: **0,632; 0,867; 0,95**. Таким образом, если известны установившееся и начальное значение превышения температуры, можно определить и постоянную времени нагрева (рис. 2.2-а).
2. Для определения постоянной времени нагрева по методу касательных нужно иметь кривую нагрева, к которой в нескольких точках проводятся касательные. Отрезок асимптоты, отсекаемый самой касательной и перпендикуляром, восстановленным из точки касания даёт постоянную времени нагрева. Для повышения точности необходимо провести несколько касательных (рис. 2.2-б).
3. Для расчета по методу трёх точек используется формула:

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}}, \quad (2.10)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – произвольно выбранные точки на кривой нагрева.

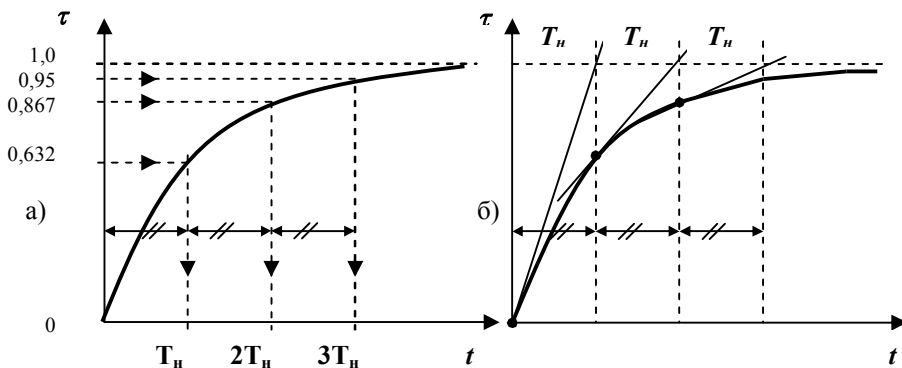


Рисунок 2.2 – Определение постоянной времени нагрева

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со стендом и схемой для снятия кривой нагрева. В данной работе датчик температуры вмонтирован в катушку магнитного пускателя (рис. 2.3). Замеры тока, напряжения, температуры нагрева и мощности производятся с помощью мультиметров и ваттметра. Следует обратить внимание на пределы измерения этих приборов. Питание катушки осуществляется от автотрансформатора.

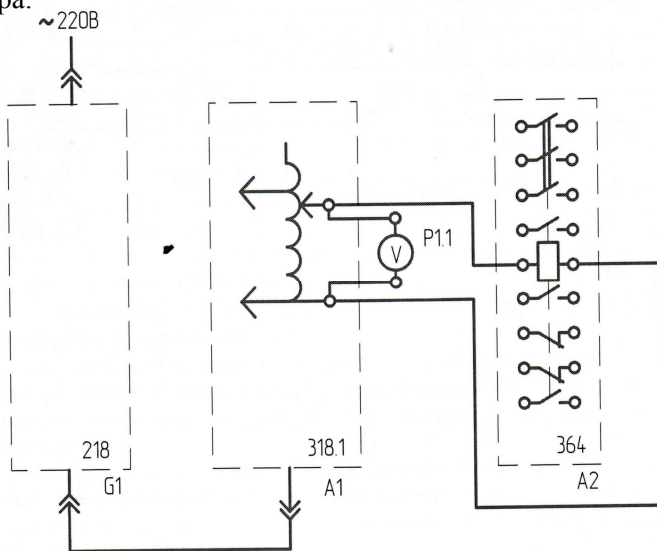


Рисунок 2.3 – Схема электрических соединений стенда для снятия кривой нагрева

2.2. Подготовить таблицу для записи показаний приборов

U_1	I_1	P_1	$t_{\text{к}}^{\circ}$	$t_{\text{к}}^{\circ} - t_{\text{о.с.}}^{\circ}$	$t_{\text{мин}}$

2.3. Установить рукоятку автотрансформатора в положение, соответствующее минимальному напряжению, включить автоматические выключатели блока питания, автотрансформатора, и мультиметров. Активизировать мультиметры, записать значение температу-

ры. Вращая рукоятку автотрансформатора установить напряжение, близкое к номинальному, после чего нажатием кнопки ПУСК подключить катушку пускателя и установить ток по указанию преподавателя. Каждые две минуты записывать значение температуры нагрева. Опыт проводить до тех пор, пока температура практически перестанет возрастать. В процессе проведения опыта следует следить за тем, чтобы ток оставался неизменным, корректируя его при необходимости с помощью автотрансформатора.

- 2.4. По результатам измерений построить зависимость $\tau = f(t)$, по которой определить постоянную времени нагрева.
- 2.4. Получить у преподавателя задание на расчет и образец катушки. Измерить необходимые геометрические размеры, определить эквивалентную поверхность охлаждения. Определить параметры обмоточного провода. Измерить сопротивление обмотки и привести его к ожидаемой температуре нагрева. По сечению провода и допустимой плотности тока (для меди – 2,5 ... 3,5 А/мм²) определить ориентировочное значение тока.
- 2.5. Рассчитать потери мощности на единицу объема катушки, минимальное и максимальное превышения температуры. Сделать выводы. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Назначение и конструктивное исполнение катушек различных электрических аппаратов.
2. За счёт чего происходит нагрев катушки и как влияет температура нагрева на её сопротивление?
3. Объяснить, почему температура нагрева отдельных частей катушки будет неодинакова.
4. Пояснить, с какой целью, и каким образом проводятся экспериментальные исследования температуры нагрева.

Занятие № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Цель занятия: изучение методики определения переходного сопротивления электрических контактов и его зависимости от контактного нажатия.

1. Основные теоретические положения

Контактным соединением называется конструктивный узел, при помощи которого осуществляется соединение двух или нескольких проводников. Место, в котором непосредственно происходит переход тока из одной части контакта в другую, называется электрическим контактом, а поверхность соприкасающихся деталей – **контактной поверхностью**. По форме контактирования различают точечный, линейный и поверхностный контакты.

При точечном контакте (сфера – сфера, сфера – плоскость) контактирование обеспечивается практически в точке. **Линейный контакт** (цилиндр – плоскость, виток – виток) происходит по линии, образованной рядом точек, **поверхностный контакт** (плоскость – плоскость, цилиндр – цилиндр) - по соприкасающимся поверхностям.

Ни при каком виде контакта невозможно обеспечить полное прилегание контактных поверхностей. Соприкосновение деталей происходит в микробугорках, а число точек соприкосновения и их площадь зависит от силы, с которой прижимаются контакты.

Переходное сопротивление контакта (Ом) есть результат сужения эффективного сечения проводников и увеличения плотности тока в точках контактирования. Оно зависит от свойств материалов, из которых изготовлены контакты, силы нажатия (**n**) и типа контактов:

$$R_k \approx \frac{\varepsilon}{F^n} \cdot \quad (3.1)$$

Для точечных контактов: $n \approx 0,5$; для линейных – $0,7 - 0,8$; для поверхностных – $1,0$. Значение ε сильно зависит не только от материала, из которого изготовлены контакты, но и от способа их обработки, степени окисления поверхности и ряда других факторов, поэтому формула (3.1) дает только общий характер зависимости переходного сопротивления от силы контактного нажатия (рис. 3.1-а).

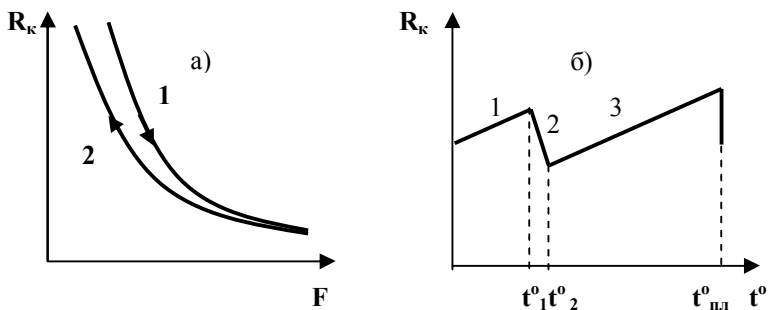


Рисунок 3.1 – Зависимость переходного контактного сопротивления от усилия прижатия контактов (а) и температуры нагрева (б)

При увеличении контактного нажатия число точек контактирования быстро растет, и сопротивление резко уменьшается, но далее интенсивность деформации поверхностей контактов уменьшается, что приводит к замедлению процесса уменьшения сопротивления, которое начиная с некоторого значения силы остается практически неизменным (кривая 1). При уменьшении контактного нажатия сопротивление при тех же значениях силы несколько больше, что объясняется наличием остаточных деформаций микровыступов, в которых происходил контакт (кривая 2). Вследствие деформации микронеровностей и их различного смещения при каждом замыкании контактов сопротивление может получаться различным даже при одинаковых силах нажатия, в особенности при малых силах, поэтому зависимость $R_k = f(F)$ представляет собой не строго определенную кривую, а область значений. Согласно ГОСТ 24606.3-82 при проведении измерений переходных сопротивлений необходимо определять их среднее значение и статическую нестабильность:

$$R_{н.сп} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{н.i}}{n} ; \quad (3.2)$$

$$\Delta R_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{н.сп} - R_{н.i})^2} , \quad (3.3)$$

где $R_{н.i}$ – сопротивление в i -том измерении при одном и том же контактном нажатии; n – число измерений.

С возрастанием температуры переходное сопротивление возрастает, что объясняется общими свойствами проводниковых материалов, но с увеличением температуры меняется структура микронеровностей, и температурный коэффициент уменьшается. Сопротивление нагретого контакта уточняется по формуле:

$$R_k(t^0) = R_k(t_0^0) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha (t^0 - t_0^0) \right), \quad (3.4)$$

где α , 1/град - температурный коэффициент сопротивления.

Эта зона (участок 1 на рис. 3.1-б) является рабочей.

При температуре рекристаллизации (размягчения) t_1^0 происходит резкое падение механических свойств материала и увеличение площадок контактирования, что приводит к резкому уменьшению переходного сопротивления (участок 2). Температура рекристаллизации относительно невелика, и составляет: для меди – 190°C, для серебра и алюминия – 150°C.

На третьем участке сопротивление возрастает до температуры плавления, после чего контакты свариваются, и сопротивление вновь резко уменьшается.

Температура площадки контактирования. Контактное соединение может быть представлено условно в виде проводника переменного сечения (рис. 3.2). При протекании тока потери мощности, отнесённые к единице длины на переходном участке Δl , будут больше, чем на основных участках. Кроме того, переходный участок имеет малую по сравнению с основным поверхность охлаждения, и нагревается он значительно сильнее, а тепло передаётся главным образом к проводникам основного сечения.

Превышение температуры площадки контактирования контактов над температурой окружающей среды определяется по формуле:

$$\tau_k = \tau_1 + \tau_2 = \frac{U_n^2}{8\lambda\rho} + \frac{I^2 R_n}{k_m F_{охл}}, \quad (3.5)$$

где: U_n – переходное падение напряжения; λ - теплопроводность материала контактов; ρ - удельное сопротивление, k_m – коэффициент теплоотдачи; $F_{охл}$ - поверхность охлаждения контактов.

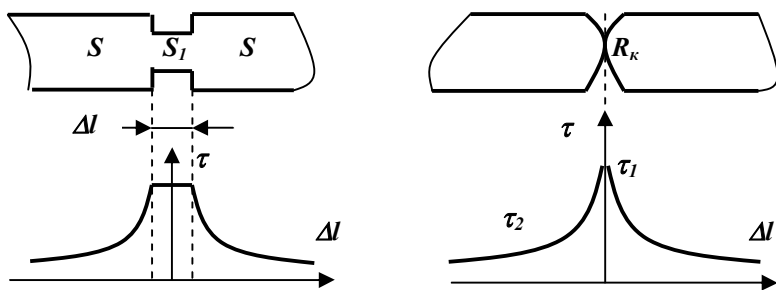


Рисунок 3.2 - Расчетная модель контактного соединения и распределение температуры по длине проводников

Величина τ_2 (превышение температуры основных участков) в формуле (3.5) не превышает 10°C и в приближенных расчетах не учитывается. Значения теплопроводности и удельного сопротивления некоторых материалов составляют:

	Медь	Латунь	Серебро	Алюминий
λ , Вт/м* $^\circ\text{C}$	390	100	420	210
ρ , Ом*м* 10^{-8}	1,62	7,2	1,5	2,62

Расчёт является приближённым, поскольку практически невозможно учесть все факторы, влияющие на величину падения напряжения в месте контакта и условия охлаждения. Максимальное превышение температуры нагрева может быть снижено за счёт уменьшения величины переходного сопротивления контакта, а также за счёт развития поверхности охлаждения контактов путём их соединения с другими деталями, выполняющими роль радиаторов.

Для исключения сваривания контактов температура их нагрева не должна превышать температуру рекристаллизации:

$$\tau_1 + \tau_2 + t_{\text{о.с.}}^0 \leq t_{\text{рекристал.}}^0 \quad (3.6)$$

При естественном охлаждении это условие выполняется, если падение напряжения на переходном сопротивлении контакта при номинальном токе не превышает 10 – 20 мВ.

2. Экспериментальное определение величины переходного контактного сопротивления

Принципиальная схема установки для определения величины переходного контактного сопротивления (рис. 3.3) содержит автотрансформатор **ТА**, понижающий трансформатор **Т**, двудвойной реактор **L1**, амперметр **рА**, исследуемую пару контактов **КМ1**, операционный усилитель **DA1**, резисторы **R1** и **R2**, милливольтметр **рV**.

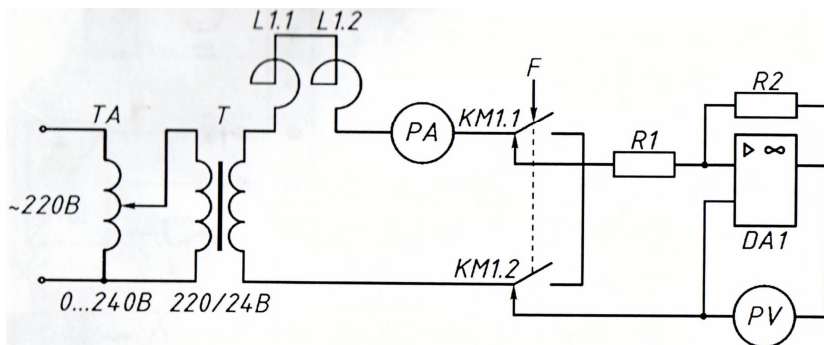


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема установки для исследования переходного сопротивления электрических контактов

Автотрансформатор **ТА** служит для регулирования тока, протекающего через исследуемые контакты. Трансформатор **Т** необходим для понижения напряжения и гальванической развязки измерительных цепей и сети, реактор **L1** ограничивает ток, а амперметр **рА** его контролирует. Для измерения малого падения напряжения милливольтметр **рV** подключен к выходу операционного усилителя, с учетом коэффициента усиления которого переходное сопротивление одного контакта определяется по формуле:

$$R_n = \frac{U_n}{nk_y I_k}, \quad (3.7)$$

где U_n - падение напряжения; I_k - протекающий через контакт ток; $n=4$ - количество последовательно соединенных контактов; $k_y = R_2/R_1$ - коэффициент усиления.

Приходящееся на один контакт усилие нажатия изменяется с помощью набора тарированных грузов и составляет:

$$F = \frac{k_p P}{n} + F_0, \quad (3.8)$$

где $k_p = 2$ - соотношение плеч рычага; P – вес груза, кг; $F_0 = 0,1$ кг – начальное усилие прижатия контактов за счет пружин.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Ознакомьтесь с методическими указаниями и стендом для исследования переходного сопротивления электрических контактов, изобразите схему установки, подготовьте таблицу для записи показаний:

Вес груза P , кг	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Ток I_K , А						
Напряжения при увеличении груза, мВ						
Напряжения при уменьшении груза, мВ						
Переходные сопротивления при увеличении груза, мОм						
Переходные сопротивления при уменьшении груза, мОм						
Средние значения, мОм						

3.2. Выполните под контролем преподавателя необходимые соединения на стенде согласно схеме, приведенной на рис. 3.4, соедините гнезда защитного заземления используемых модулей с гнездом «РЕ» автотрансформатора (модуль 318.1).

3.3. Ослабьте регулировочный винт якоря электромагнита и снимите с рычага набор грузов (модуль 382).

3.4. Поворотом рукоятки автотрансформатора до упора против часовой стрелки установите минимальное напряжение.

3.5. После проверки преподавателем включите: автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1 (модуль 218); выключатель «СЕТЬ» источника питания с наборным полем (модуль 220); выключатели блока мультиметров (модуль 508.2) и автотрансформатора (модуль 318.1).

3.6. Проверьте правильность подключения и положения рукояток мультиметров тока и напряжения, активизируйте приборы.

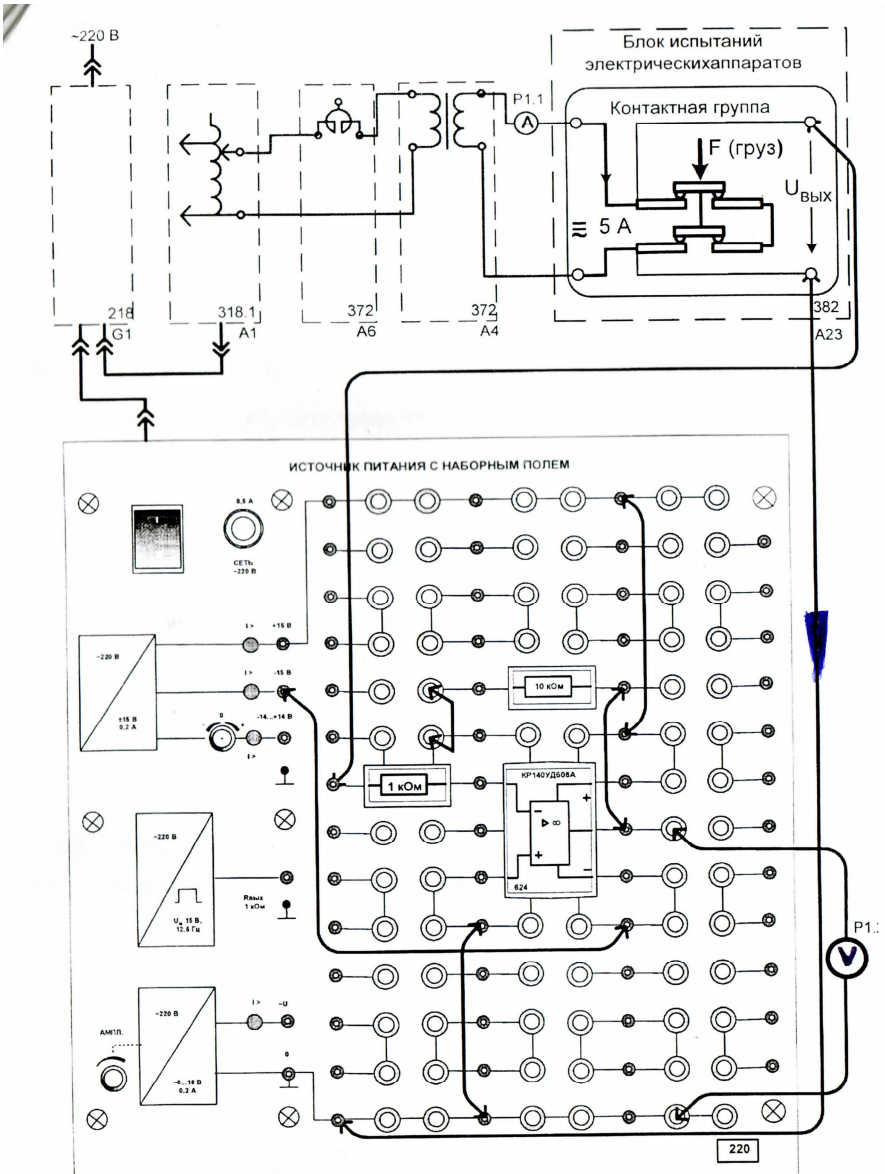


Рисунок 3.4 – Схема электрических соединений стенда для исследования переходного сопротивления контактов

- 3.7. Установите с помощью регулировочной рукоятки автотрансформатора в цепи контакта ток I_k , равный 5 А. Этот ток необходимо поддерживать при всех измерениях
- 3.8. Приподнимите рычаг нагрузочного устройства, что соответствует начальному прижатию контактов ($F = F_0 = 0,1$ кг) и запишите в таблицу показания приборов.
- 3.9. Последовательно добавляя на рычаг грузы, выполните измерения и занесите их результаты в таблицу. Повторите измерения, последовательно уменьшая груз. Для повышения стабильности результатов необходимо каждый раз приподнимать и опускать рычаг. Опыт повторить не менее трех раз.
- 3.10. Рассчитайте по формуле (3.7) значения переходных сопротивлений при каждом измерении и занесите их в таблицу.
- 3.11. Рассчитайте по формулам (3.2) и (3.3) средние значения $R_{п.ср.i}$ и статическую нестабильность при каждом из усилий нажатия.
- 3.12. Постройте зависимости $R_{п.ср.i} + \Delta R_{п.i} = f(F)$ и $R_{п.ср.i} - \Delta R_{п.i} = f(F)$, ограничивающие область значений переходного сопротивления.
- 3.13. Определите по формуле (3.5) превышение температуры в точке контактирования при максимальном переходном сопротивлении, и проверьте выполнение неравенства (3.8) для медных контактов.
- 3.14. Сделайте выводы. Оформите отчёт о работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение и краткую характеристику основных видов электрических контактов.
2. Перечислите и охарактеризуйте основные виды контактирования.
3. Дайте определение переходного сопротивления электрического контакта. От чего оно зависит?
4. Почему переходное сопротивление электрических контактов различается при одинаковых усилия нажатия?
5. Каким образом идёт нагрев электрических контактов?
6. Какие факторы и каким образом влияют на максимальную температуру нагрева контактных соединений?
7. Поясните, каким образом проводятся экспериментальные исследования характеристик электрических контактов.

Занятие № 4

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ И СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Цель занятия: изучить свойства и характеристики электрической дуги и способы её гашения в электрических аппаратах

1. Основные теоретические сведения

Размыкание различных токопроводящих цепей сопровождается электрическим разрядом между расходящимися контактами, который может перейти в дуговой разряд. Ток при этом не прерывается до тех пор, пока между контактами существует проводящий мост из дугоразрядной плазмы. Электрическая дуга обладает высокой температурой и в сочетании с другими факторами крайне отрицательно влияет на надёжность контактов и электрических аппаратов в целом.

Электрическую дугу можно охарактеризовать зависимостью падения напряжения на ней от величины тока – вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Полное падение напряжения на дуге складывается из трех составляющих: падения напряжения на катоде, падения напряжения в столбе дуги, и падения напряжения на аноде (рис. 4.1).

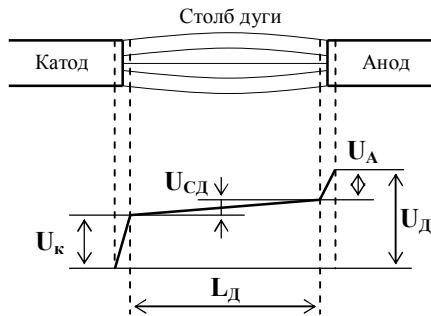


Рисунок 4.1 – Распределение напряжений в электрической дуге постоянного тока

Падения напряжения на катоде и аноде в зависимости от материала, из которого изготовлены контакты и среды, в которой они находятся, составляют: $U_k = 10 - 16В$; $U_a = 6 - 8В$.

Суммарное падение на электродах $U_э$ изменяется относительно мало и обычно принимается равным 20 – 25 В.

В отличие от приэлектродных падений напряжения падение напряжения в столбе дуги может изменяться в очень широких пределах, и зависит от продольного градиента $E_д$ и длины дуги $L_д$. Полное падение напряжения на дуговом промежутке:

$$U_д = U_э + E_д L_д . \quad (4.1)$$

Дуга в цепи постоянного тока с индуктивностью и активным сопротивлением описывается следующим уравнением:

$$U = U_д + iR + L \frac{di}{dt} , \quad (4.2)$$

где U - напряжение источника питания; $L \times \frac{di}{dt}$ - ЭДС самоиндукции

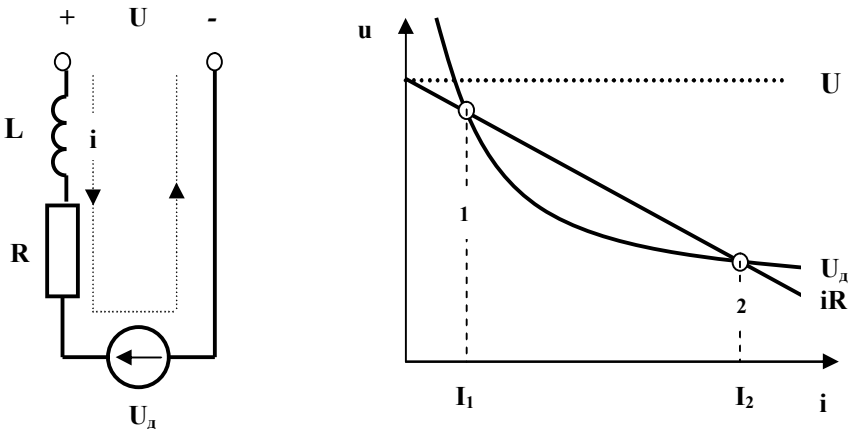


Рисунок 2 - Схема замещения и условия гашения электрической дуги постоянного тока

При устойчиво горящей дуге:

$$\frac{di}{dt} = 0; \quad U = U_д + iR .$$

Это условие выполняется в точках 1 и 2, если ток не изменяется.

В действительности дуга представляет собой очень динамичную нагрузку и производная тока по времени отлична от нуля. В окрестностях точки 1 уменьшение тока приводит к появлению отрицательной ЭДС, а увеличение – к положительной. В результате дуга горит неустойчиво. При уменьшении тока дуга гаснет, а при увеличении процесс идёт до нового равновесного состояния (точка 2), в окрестностях которой дуга горит устойчиво: при случайном уменьшении тока ЭДС положительна, при увеличении – отрицательна, что способствует возвращению тока в равновесное состояние. Для погасания дуги необходимо, чтобы ток в ней всё время уменьшался, а ВАХ находилась выше реостатной характеристики и не имела с ней общих точек:

$$L \frac{di}{dt} < 0; \quad U < U_d + iR \quad (4.3)$$

Это условие невозможно выполнить в начале процесса размыкания контактов. Увеличение наклона реостатной характеристики путём введения в цепь на время гашения дуги добавочного активного сопротивления за очень малое время технически сложно, поэтому основным способом гашения дуги является увеличение её собственного сопротивления. При этом условие погасания дуги принимает вид:

$$U \leq U_d + E_d L_d, \quad (4.4)$$

т.е. для гашения дуги необходимо создать условия, при которых падение напряжения на ней превосходило бы напряжение питания.

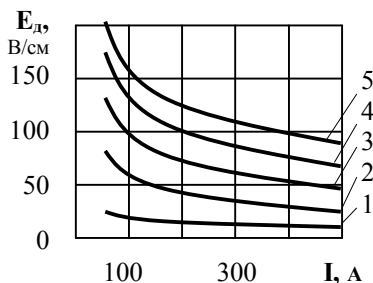
Этого можно добиться: а - увеличивая её длину; б – повышая продольный градиент напряжения столба дуги; в - увеличивая приэлектродные падения напряжения.

Однако, простое увеличение длины дуги малоэффективно, поскольку продольный градиент напряжения в открытой дуге составляет в среднем 6 – 8 В/см, и даже при длинной дуге и относительно малых токах не превышает 12 в/см, что требует слишком больших ее растяжений. Например, для надёжного разрыва цепи с током свыше 100 А при напряжении 220 В требуется растянуть дугу на 25 ..30 см.

Повышение градиента столба дуги эффективнее первого способа и позволяет добиться хороших результатов без чрезмерного увеличения габаритов электрических аппаратов. Деионизация столба дуги достигается прежде всего за счёт её охлаждения.

Из приведенных на рис. 4.3 зависимостей $E_d = f(I)$ видно, что продольный градиент резко увеличивается с увеличением скорости движения дуги.

Рисунок 4.3 - Продольный градиент напряжения столба дуги при различных скоростях её движения: 1 – 0 м/с; 2 – 50 м/с; 3 – 100 м/с; 4 – 150 м/с; 5 – 200 м/с



В подвижной дуге плотность тока резко возрастает, в результате чего давление в створе дуги повышается, и процесс деионизации идёт намного быстрее. В высоковольтных аппаратах это может быть достигнуто использованием газов и жидкостей, в низковольтных обычно применяется магнитное поле, обеспечивающее движение дуги.

Особенности дуги переменного тока обусловлены тем, что ток независимо от степени ионизации дугового промежутка переходит через ноль в конце каждого полупериода, после чего дуга гаснет и при определенных условиях зажигается вновь. Мгновенное значение напряжения при этом зависит от характера коммутируемой цепи и составляет $\sqrt{2}U \sin \varphi$.

В момент погасания дуги электрическая прочность дугового промежутка резко возрастает (в среднем до 150 ..250 В). Это объясняется тем, что анод и катод меняются местами. Далее электрическая прочность плавно нарастает со скоростью, которая зависит от тока дуги, её длины, скорости расхождения контактов и других факторов.

Примеры зависимостей начальной электрической прочности $U_{пр.0}$ от тока даны на рис. 4.4.

Для успешного гашения дуги переменного тока необходимо, чтобы скорость возрастания электрической прочности (напряжения пробоя) дугового промежутка превышала скорость нарастания напряжения питания. Если кривые нарастания электрической прочности и питающего напряжения пересекутся, напряжение станет достаточным для зажигания дуги (рис. 4.5).

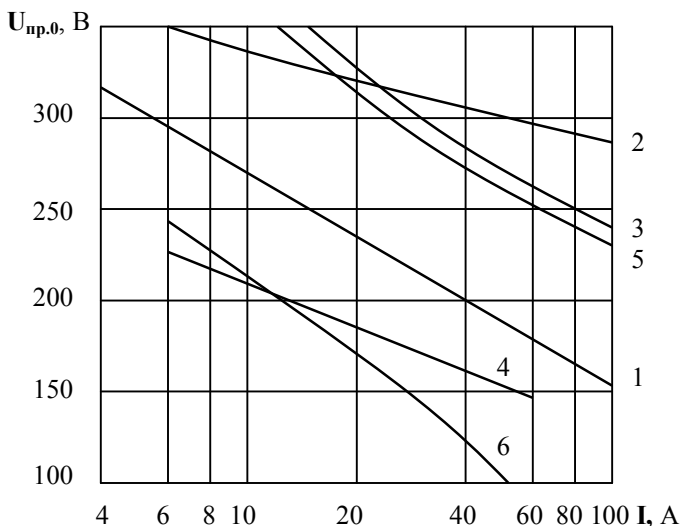
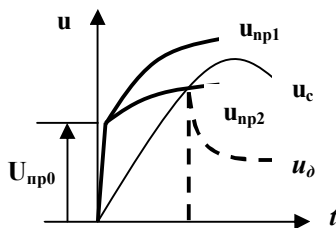


Рисунок 4.4 - Зависимость начальной электрической прочности дугового промежутка от тока для электродов из различных материалов: 1 – медь; 2 - латунь; 3 – серебро; 4 - серебро с добавкой 15% окиси кадмия; 5 – серебро с добавкой 40% никеля; 6 – серебро с добавкой 3% графита

Рисунок 4.5 - Условия гашения дуги переменного тока



В действительности процесс восстановления напряжения между размыкающими контактами может иметь более сложный характер, который зависит от параметров нагрузки. При индуктивном характере коммутируемой цепи возникает колебательный процесс, в результате которого напряжение на междуговом промежутке после погасании дуги возрастает (рис. 4.6), причем скорость его нарастания многократно превышает скорость нарастания электрической прочности.

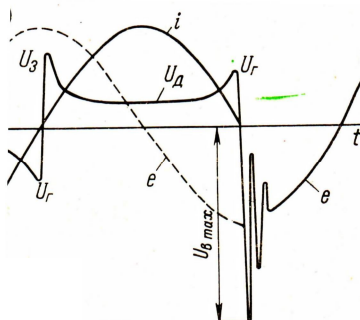


Рисунок 4.6 – Колебательный процесс восстановления напряжения на дуговом промежутке

С учетом изложенного общее условие погасания дуги переменного тока в однофазных цепях записывается следующим образом:

$$\sqrt{2}Uk_a \sin \varphi \leq U_{\text{пр.0}} \times N, \quad (4.5)$$

где U – действующее значение напряжения источника питания; k_a – коэффициент превышения амплитуды питающего напряжения; φ – фазовый угол коммутируемой цепи; N – количество разрывов коммутируемой цепи.

В трехфазных цепях разрыв дуги происходит дважды, и действующее значение напряжения в формуле (4.5) берется в $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$ раз меньше междуфазного.

Коэффициент превышения амплитуды зависит от частоты собственных колебаний отключаемой цепи и равен:

$$k_a \approx 1 + e^{-0,0003f_0}, \quad (4.6)$$

где f_0 – собственная частота колебаний отключаемого контура.

При отключении двигателей мощностью 0,5 – 50 кВт:

$$f_0 = 7000 + 1500P_{\text{ном}}^{0,75}, \text{ Гц} \quad (4.7)$$

При отключении катушек электрических аппаратов:

$$f_0 = 1000 - 7000 \text{ Гц} \quad (4.8)$$

При отключении короткозамкнутых участков цепей:

$$f_0 = 100000 \left(0,5 + \frac{5}{L + 10} \right), \text{ Гц,} \quad (4.9)$$

где $L, \text{ м}$ – расстояние коммутационного аппарата от места короткого замыкания.

Формула (4.5) позволяет найти необходимое количество разрывов дуги при известных параметрах коммутируемой цепи.

2. Способы гашения дуги в электрических аппаратах

Повышение градиента столба дуги позволяет добиться хороших результатов без чрезмерного увеличения габаритов электрических аппаратов. Деионизация столба дуги достигается прежде всего за счёт её охлаждения. В высоковольтных аппаратах это может быть достигнуто использованием газов и жидкостей, в низковольтных применяется магнитное поле, обеспечивающее движение дуги. В подвижной дуге плотность тока резко возрастает, в результате чего давление в стволе дуги повышается, и процесс деионизации идёт намного быстрее. При скорости 100 м/с для разрыва цепи с током 100 А при напряжении 220 В требуется растянуть дугу всего на 5 см.

Гашение дуги в магнитном поле (рис. 4.7) заключается в том, что с помощью электромагнита, который обычно представляет собой виток из токоведущих деталей, дуга расщепляется на отдельные волокна и движется по спирали. Интенсивное охлаждение, увеличение плотности тока и давления внутри столба приводят к активной деионизации и погасанию дуги. Магнитное поле должно быть направлено перпендикулярно оси дуги.

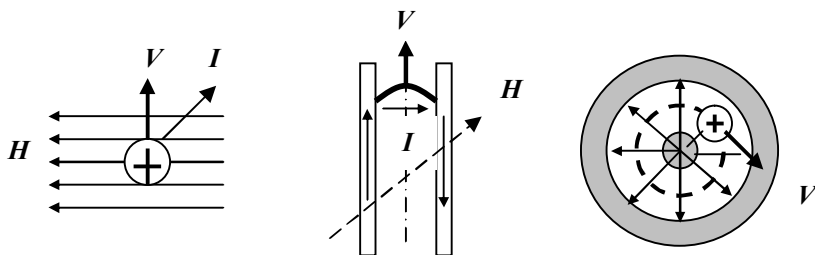


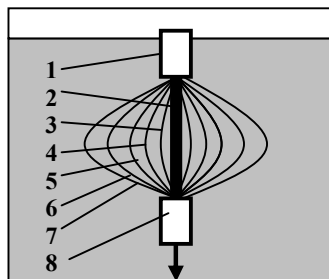
Рисунок 4.7 - Движение электрической дуги в магнитном поле

Гашение дуги воздушным дутьём применяется в высоковольтных выключателях переменного тока. Перемещающийся с большой скоростью в поперечном или продольном направлении воздух удаляет из зоны дуги нагретые ионизированные частицы, и замещает их другими, холодными и неионизированными. Температура ствола дуги резко падает, и происходит его механическое разрушение. Наилучшие результаты даёт поперечное дутьё, но оно сопряжено с большим расходом воздуха, поэтому находят применение продольное и комбинированное дутьё. Вместо воздуха может применяться элегаз (шестифтористая сера SF₆), который имеет в 2,5 раза большую электрическую прочность и в 4 раза более высокую теплопроводность, что позволяет резко уменьшить габариты дугогасящих устройств.

Гашение дуги в закрытых камерах происходит в замкнутом объёме, не имеющем связи с внешним пространством и осуществляется за счёт резкого повышения давления. В результате усиливается охлаждение и возрастает продольный градиент напряжения. Наибольшее применение этот способ находит в предохранителях.

Гашение дуги в масле (рис. 4.8) применяется в высоковольтных выключателях переменного тока.

Рисунок 4.8 - Электрическая дуга в сфере газового пузыря в масле: 1 – неподвижный контакт; 2 – ствол дуги; 3 – водородная оболочка; 4 – зона распада; 5 – зона газа; 6 – зона пара; 7 – зона испарения; 8 подвижный контакт



Контакты выключателя погружаются в масло. Возникающая при разрыве цепи и образовании дуги высокая температура приводит к очень интенсивному испарению масла с диссоциацией его паров. Вокруг дуги образуется газовая оболочка, состоящая в основном из водорода, который обладает наилучшими дугогасящими свойствами и соприкасается непосредственно со стволом дуги. Процесс разложения масла характеризуется образованием парогазовой смеси, большим (до 30 .. 35%) отбором энергии от дуги, и повышением давления внутри пузыря. Выделяемые газы с высокой скоростью проникают в ствол дуги, вызывают перемешивание с горячими газами в пузыре, интенсивно охлаждают и деионизируют дуговой промежуток

В современных выключающих аппаратах широкое распространение получили открытые продольно-щелевые камеры, позволяющие за короткое время гасить дугу в малых объёмах, при малом звуковом и световом эффектах, при малом износе токоведущих узлов и относительно небольших перенапряжениях.

В процессе гашения дуга под действием дутья проходит по полости камеры, увеличивая свою длину и охлаждаясь о стенки. В широкощелевых камерах ширина щели значительно больше диаметра столба дуги, которая свободно входит в камеру и встречает на своём пути малое сопротивление, поэтому условия гашения близки к тем, которые имеют место при открытой дуге, а камера в основном ограничивает область горения. В узкощелевых камерах диаметр столба дуги соизмерим с размерами щелей, охлаждение идёт гораздо интенсивнее, дуга гаснет быстрее, но большое сопротивление воздуха осложняет её вход в камеру и дальнейшее движение. В них требуется интенсивное магнитное дутьё. Конфигурация щелей определяется конкретными требованиями. Для улучшения входа дуги в щель делается расширение с углом $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$; несколько параллельных щелей применяются для расщепления дуги при больших токах; щель в виде лабиринта позволяет растянуть дугу при относительно небольших размерах; щель с рёбрами способствует эффективному охлаждению дуги и повышению продольного градиента напряжения, который может достигать 50 в/см. Для уменьшения перенапряжений щели в конце часто имеют расширение.

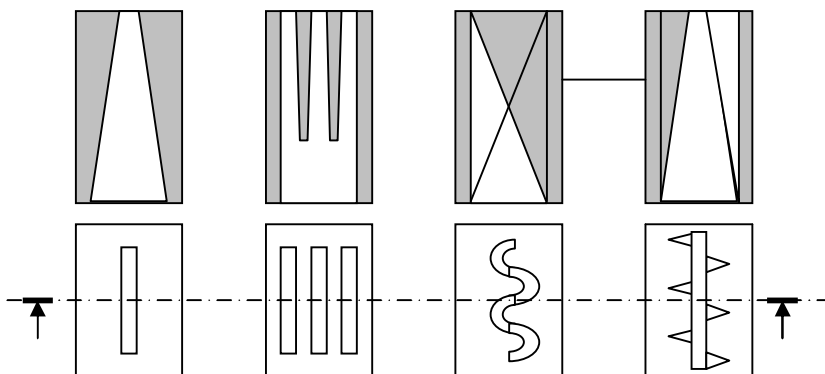


Рисунок 4.9 - Характерные виды продольно-щелевых дугогасительных камер

Гашение дуги в деионных решётках (рис. 4.10) основано на увеличении приэлектродных падений напряжения. Дуга загоняется в специальную решетку, состоящую из N пластин, где разбивается на $(N + 1)$ последовательных коротких дуг. В результате полное напряжение дуги будет равно:

$$U_d = U_3(N + 1) + E_d I \quad (4.10)$$

и при неизменной суммарной длине ВАХ дуги переместится вверх на величину $U_3 N$. Решётки выполняются из стальных омеднённых пластин, поскольку возникающие при этом электродинамические силы способствуют вхождению дуги в решётку и выравнивают скорости движения отдельных дуг.

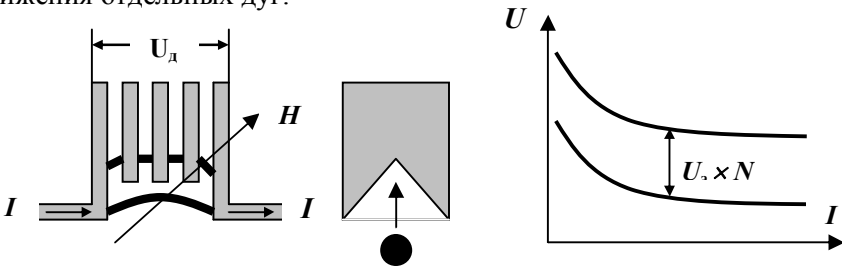


Рисунок 4.10 - Схема гашения дуги в деионной решётке

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с основными теоретическими положениями и конструкцией различных дугогасительных устройств, получить у преподавателя индивидуальное задание.
2. По приведенным в задании данным определить, используя формулы (4.4) и (4.10): - длину дуги постоянного тока, при которой происходит естественный разрыв; - продольный градиент напряжения, необходимый для ограничения длины дуги до заданного значения; - число пластин деионной решетки, необходимое для гашения дуги. Дать аргументированное обоснование способа гашения дуги.
3. По заданным параметрам цепи переменного тока проверить выполнение условия (4.5) и рассчитать количество разрывов коммутируемой цепи, необходимое для погасания дуги. Обосновать выбор способа гашения.
4. Сделать выводы. Составить отчет работе. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Дать определение и краткую характеристику электрической дуги. Как она влияет на контакты электрических аппаратов?
2. В чём заключается основное условие погасания электрической дуги постоянного тока?
3. Что такое продольный градиент напряжения, и как на него можно воздействовать?
4. Охарактеризовать особенности дуги переменного тока.
5. Чем принципиально отличаются дуга постоянного и переменного тока?
6. Дать характеристику процесса восстановления напряжения при коммутации цепей переменного тока.
7. В чём заключается условие погасания дуги переменного тока?
8. Перечислить и охарактеризовать основные способы гашения электрической дуги.
9. Как происходит гашение дуги в магнитном поле?
10. Перечислить основные типы и пояснить принцип действия дугогасительных камер.
11. Как происходит гашение дуги в деионных решётках?

Форма индивидуального задания

Индивидуальное задание на расчет к работе №4 студенту _____
ФИО студента

Дуга постоянного тока			Дуга переменного тока			
U, В	I, А	L _{доп.} см	U, В	P _{ном.} кВт	Контакты	Тип и характер нагрузки
110	120	4	3x380	0,8	медь	Двигательная, Cosφ = 0,5

Задание выдал _____ Дата _____ Подпись _____ ФИО преподавателя _____