

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
Энергетический институт

А.А. Жуковская, Ю. В. Копылов

Основы теории электрических и электронных аппаратов

Лабораторный практикум

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621.312.316

Копылов Ю.В.

Лабораторный практикум

Основы теории электрических и электронных аппаратов: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электрические и электронные аппараты» для студентов, обучающихся по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» /А.А. Жуковская, Ю.В. Копылов – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. –64с.

Составитель

А.А. Жуковская, Ю.В. Копылов

Рецензент к.т.н.,доцент

А.Д. Чесалин

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры «Электрические и электронные аппараты»

«_____» _____ 2010 г.

© ГОУ ВПО « Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», 2010

© А.А.Жуковская. Ю.В. Копылов

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум “Физические явления в электрических аппаратах”, предназначенных для студентов, изучающих курс “Основы теории электрических аппаратов”, он может быть полезен и для студентов, изучающих курс “Электрические и электронные аппараты”.

Работу электрических аппаратов сопровождают следующие явления: электромагнитные, электродинамические, индукционные процессы, процессы, происходящие на контактах при их замыкании, размыкании и в замкнутом положении; процессы нагрева, тепло – массопереноса.

Лабораторный практикум предназначен как для теоретической подготовки студентов к лабораторным работам, так и для непосредственного их включения, содержит основные теоретические положения перечисленных явлений и методические указания для проведения экспериментов.

Приведенные в практикуме описания лабораторных установок, а также методические указания по выполнению работ позволяют студентам работать самостоятельно.

Задание лабораторной работы включает теоретическую часть, которая выполняется дома и экспериментальную, выполняемую на лабораторных установках.

Порядок подготовки и проведения лабораторных работ и оформления отчетов изложен в СТП ТПУ 2.3.05 – 00 – Занятия лабораторные. Общие требования к организации и проведению.

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА КАТУШКИ В ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ.

Цель работы. Ознакомиться с методами измерения температуры. Снять кривую нагрева катушки. Научиться косвенными методами, определять тепловую постоянную времени нагрева, установившееся значение температуры, коэффициент теплоотдачи.

1 Предмет исследования

1.1 Общие вопросы.

При включении аппарата по катушке начинает протекать ток, и возникают так называемые джоулевы потери, которые нагревают катушку. В установившемся режиме эти потери отводятся в окружающую среду. Высокая температура уменьшает электрические и механические свойства: электрическую и механическую прочность, эластичность, что приводит к быстрому старению изоляции.

Изоляционные материалы обладают разной стойкостью к воздействию температуры, и по нагревостойкости разбиты на семь классов: Y, A, E, B, F, H, C. Низший класс Y – 90⁰ C, высший класс C – 180⁰C. С достаточной точностью степень влияния температуры на надежность изоляции можно оценить, используя правило Монтзингера: увеличение температуры на 10⁰C по сравнению с допустимой температурой уменьшает срок службы изоляции в 2 раза.

Уменьшение температуры говорит о плохом использовании активных электротехнических материалов, элементы аппаратов должны эксплуатироваться при допустимой температуре $\vartheta_{\text{дп}}$ с учетом технологических запасов не превышающих (5-10)⁰ C.

В тепловых расчетах часто используется понятие превышение температуры элемента аппарата $\tau_{\text{дп}}$ над температурой окружающей среды ϑ_0 .

$$\tau_{\text{дп}} = \vartheta_{\text{дп}} - \vartheta_0 \quad \text{для упрощения - перегрев}$$

В настоящее время принято $\vartheta_0 = 40^0 \text{ C}$.

Для значительных изменений температур окружающей среды перегрев практически не изменяется, что позволяет сравнивать

результаты тепловых испытаний, проведенных при различной температуре окружающей среды.

В электрической катушке основным источником теплоты являются джоулевы потери в проводнике при протекании тока. После включения катушки часть потерь идет на её нагревание, а часть в виде тепла отводится в окружающую среду. Через определенное время температура (перегрев) катушки достигает установившегося значения и больше не изменяется, а все потери отводятся в окружающую среду. Нагрев происходит по закону, близкому к экспоненциальному

$$\tau = \tau_0 (1 - a^{-\frac{t}{T}}), \text{ кривая 1, рис.1,} \quad (1)$$

где τ_0 - установившееся значение превышения температуры (перегрева);

t - время нагрева;

T - постоянная времени нагрева.

Если катушка была нагрета перед включением до $\tau = \tau_0$,

уравнение нагрева будет иметь вид $\tau = \tau_0 (1 - a^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 a^{-\frac{t}{T}}$, (1.1)

кривая 2, рис.1

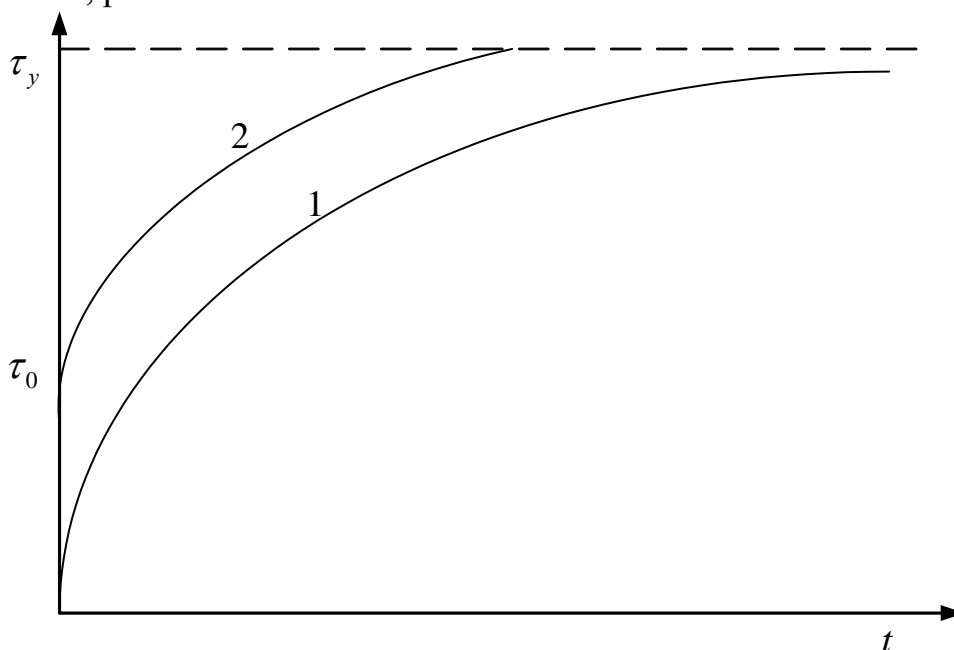


Рис.1. Кривые нагрева

Из рисунка видно, что кривые параллельны, с увеличением τ_0 кривая 2 будет параллельно смещаться влево.

В практических расчетах перегрев τ_{ϕ} определяется по формуле Ньютона – Рихмана

$$\tau_{\phi} = \frac{D}{\hat{E}_{\phi f} S_{i \phi \ddot{e}}}, \quad (2)$$

где $D = I^2 R = UI$ - мощность катушки, $\hat{A} \dot{\phi}$

$\hat{E}_{\phi f}$ - коэффициент теплоотдачи, $\frac{\hat{A} \dot{\phi}}{i^2 \ddot{a} \dot{\phi} \ddot{a} \ddot{i}}$

$S_{i \phi \ddot{e}}$ - поверхность охлаждения катушки, i^2

Коэффициент теплоотдачи $\hat{E}_{\phi f}$ является интегральной величиной, зависит от размеров аппарата, физических свойств охлаждающей среды и характера её движения. Складывается из коэффициента теплоотдачи конвекцией, излучением и теплопроводности.

Постоянная времени нагрева T зависит от теплофизических параметров катушки, её геометрии и условий охлаждающей среды.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_i}{\hat{E}_{\phi f} S_{i \phi \ddot{e}}} = \frac{\tilde{N}}{\hat{E}_{\phi f} S_{i \phi \ddot{e}}}, \quad (3)$$

где \tilde{N} - полная теплоемкость катушки;

m_i - масса элементов катушки;

c_i - удельная теплоемкость катушки.

Точность расчета по приведенным формулам зависит от точности определения $\hat{E}_{\phi f}$, а это сложная теплотехническая задача.

На практике, наиболее простым, удобным и достоверным методом определения теплофизических параметров катушки или элементов токопровода являются графоаналитические методы по опытной кривой нагрева или её характерному участку.

Первый метод.

Строится кривая нагрева $\tau = f(t)$. К точке в начале координат или произвольной точке 1 проводится касательная рис.2. На прямой, соответствующей установившейся температуре τ_{ϕ} получаем подкасательную 2-3, 2'-3' (отрезок прямой от точки касания до

пересечения касательной с τ_{δ}). Этот отрезок и является равным постоянной времени. Перегрев τ_{δ} достигает установившегося значения за $5T$. За первую постоянную времени перегрев достигает величины $\tau = 0.632\tau_{\delta}$.

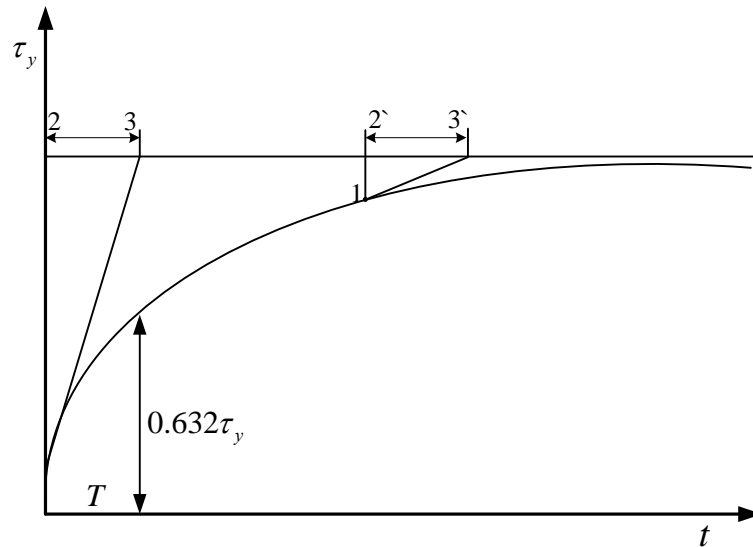


Рис.2. Графическое определение τ_{δ}, T

Второй метод.

Уравнение (1) можно преобразовать, тогда получим

$$\tau = \tau_{\delta} = \tau_0 \frac{d\tau}{dt} \quad (4)$$

Это уравнение прямой в координатах $\tau = f\left(\frac{d\tau}{dt}\right)$.

Эта прямая отсекает на оси абсцисс отрезок $\frac{\tau_{\delta}}{T}$ при $\tau = 0$ и на оси ординат отрезок τ_{δ} при $\frac{d\tau}{dt} = 0$ рис.3.

Порядок построения следующий. Кривая нагрева разбивается на участки. Для упрощения интервалы времени Δt можно взять одинаковыми.

Для каждого времени определяется $\Delta\tau$ и их отношение $\frac{\Delta\tau}{\Delta t}$.

Эта величина в выбранном масштабе откладывается во втором квадранте на прямой, проведенной через точку на кривой рассматриваемого интервала со средней величиной $\tau_{\bar{n}\delta} = \frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{2}$ границ интервала.

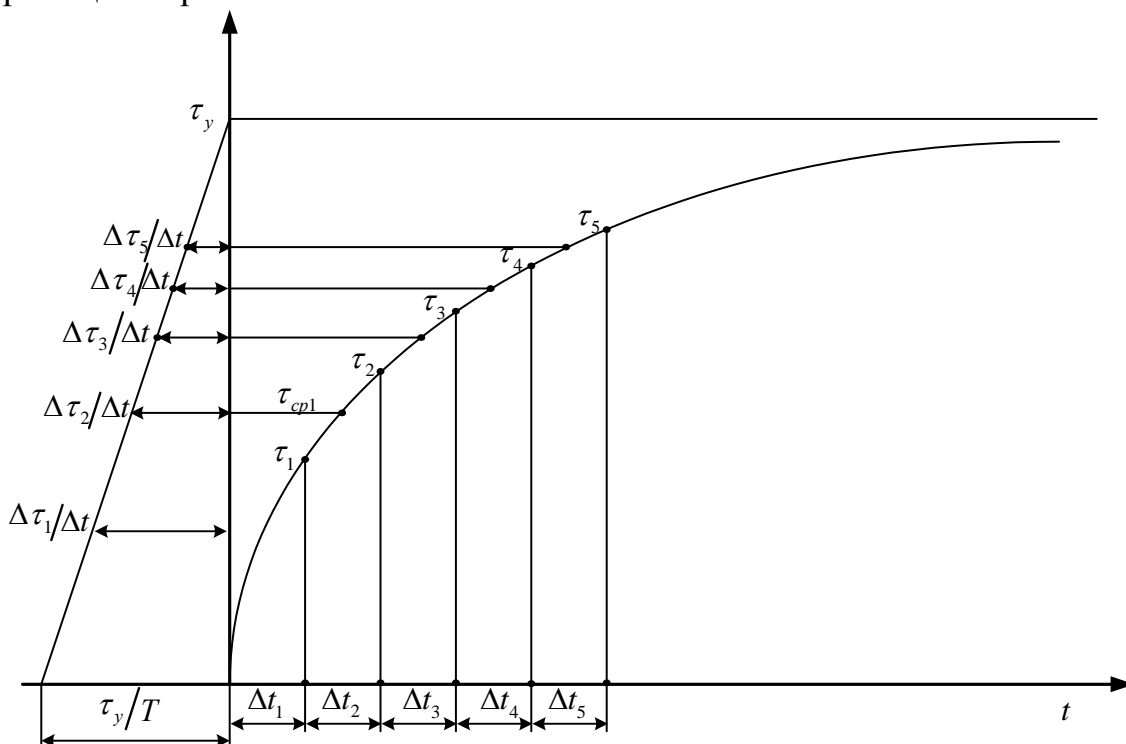


Рис.3. Графическое определение τ_{δ}, T

Проведя прямую через полученные точки, найдем точки пересечения с осями t и τ , получим τ_{δ} (ось ординат) и $\frac{\tau_{\delta}}{T}$ (ось абсцисс), отсюда легко определить T .

Третий метод.

На участке кривой выбираются 3 точки через равные промежутки времени Δt и определяются соответствующие превышения температуры τ_1, τ_2, τ_3 . Результаты будут тем точнее, чем больше интервалы времени Δt , рис.4.

$$\tau_{\delta} = \frac{\tau_2^2 - \tau_1\tau_3}{2\tau_2 - \tau_1 - \tau_3} \quad (5)$$

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_{\delta}}{\tau_{\delta} - \tau_1}} \quad (6)$$

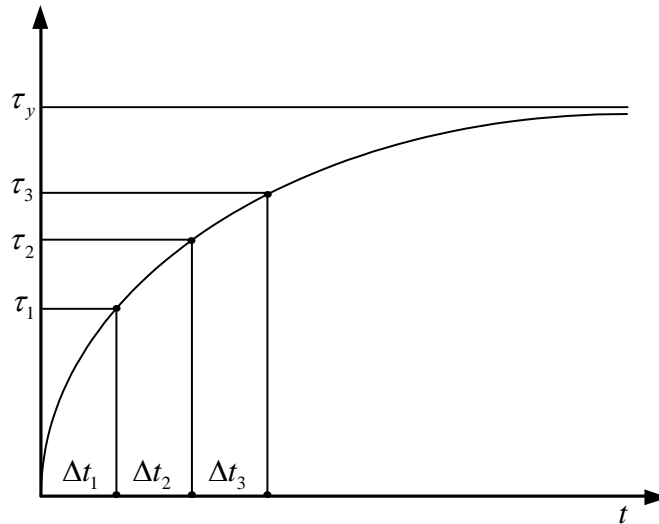


Рис.4. Определение τ_{δ} и T

Для броневых аппаратов можно считать, что всё тепло отводится через наружную поверхность, тогда

$$\hat{E}_{\delta i} = \frac{D}{\tau S_{i \delta e}}, \quad (7)$$

где $S_{i \delta e} = S_{\delta} + 2S_T$.

1.2 Методы измерения температуры.

Согласно ГОСТ 2933 – 83 при испытании на нагревание должны определяться температура или превышение температуры частей аппарата над температурой окружающей среды. Температуру частей аппарата определяют термометром, термопарой, по изменению сопротивления, а также любым другим способом, обеспечивающим измерение с допустимой погрешностью, не более установленной в стандартах на конкретные виды аппаратов.

Измерение температуры методом термометра следует применять в тех случаях, когда деталь аппарата доступна и настолько крупна, что может быть обеспечена хорошая теплопередача от детали к термометру и температура детали практически не меняется от наличия термометра.

Измерение температуры методом термопары следует применять в случае необходимости снять температурное поле, когда детали аппарата

мелкие и когда температуру необходимо определять во многих точках одновременно. На практике широкое применение нашли медь – константановые, хромель – копелевые, хромель – алюмелевые термопары. Для компенсации индуктированных электродвижущих сил провода термопары при изготовлении скручиваются. Для измерения температуры катушек аппаратов мало пригодны, так как термопары необходимо закладывать при изготовлении с учетом неравномерного распределение температуры.

Измерение температуры методом сопротивления следует применять для определения среднего превышения температуры обмоток катушек или других деталей, изготовленных из металла с известным температурным коэффициентом сопротивления.

С достаточной точностью зависимость сопротивления металла от температуры имеет вид

$$R = R_0(1 + \alpha \vartheta), \quad (8)$$

где R_0 - сопротивление металла при $\vartheta = 0$;

α - температурный коэффициент сопротивления.

После преобразования уравнение 8 превышение температуры детали τ над температурой окружающей среды ϑ_2 в нагретом состоянии аппарата вычисляют по формуле

$$\tau = \frac{R_{\bar{A}} - R_{\bar{O}}}{R_{\bar{O}}} (k + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_2, \quad (9)$$

где $R_{\bar{A}}$ - электрическое сопротивление детали в нагретом состоянии;

$R_{\bar{O}}$ - электрическое сопротивление детали в холодном (начальном) состоянии;

k - 235 (для меди);

k - 245 (для алюминия);

ϑ_2 - температура окружающей среды в нагретом состоянии;

ϑ_1 - температура окружающей среды в холодном состоянии.

Как правило, температура окружающей среды за время эксперимента практически не изменяется, тогда $\vartheta_1 = \vartheta_2$ и уравнение (9) можно упростить.

$$\tau = \frac{R_{\bar{A}} - R_{\bar{O}}}{R_{\bar{O}}} (k + \vartheta_1) \quad (10)$$

2. Программа работы и порядок её выполнения.

Испытания проводятся на соленоидном электромагнитном реле постоянного тока напряжением 24В, ток катушки 5А. Возможно проведение эксперимента на катушке постоянного тока напряжением 220В, в этом случае необходимо исключить из схемы электрических соединений однофазный трансформатор А4 типа 372.

2.1 Задание

1. Снять и построить кривую нагрева катушки электромагнита.
2. Графоаналитическими методами определить постоянную времени нагрева и установить значение превышения температуры, используя приведенные выше 3 метода.
3. Определить коэффициент теплоотдачи.

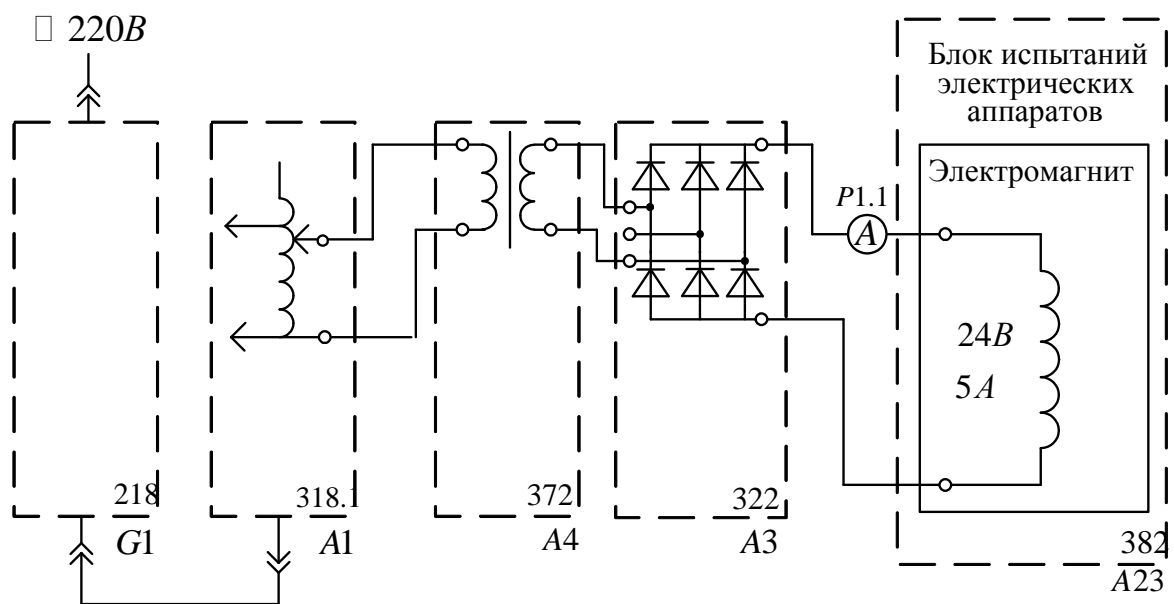
2.2 Снятие кривой нагрева катушки.

Для снятия кривой нагрева необходимо собрать схему, перечень необходимой аппаратуры приведен ниже. Получить у преподавателя необходимое количество соединительных шнуров.

2.3 Перечень аппаратуры


Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\square 220\hat{A} / 16\hat{A}$
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	$\square 0...240\hat{A} / 2\hat{A}$
A3	Выпрямитель	322	$400\hat{A} / 2\hat{A}$
A4	Однофазный трансформатор	372	$120\hat{A}\hat{A}, 220 / 24\hat{A}$
A23	Блок испытания электрических аппаратов	382	Электромагнит $-24\hat{A}, 5\hat{A}$
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра $\square 0...1000\hat{A}$ $\square 0...10\hat{A}$ $0...20\hat{I} \hat{i}$

2.4 Схема электрическая соединений



2.5 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

- Соедините гнезда защитного заземления “” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” автотрансформатора А1.

- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений.

- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

- Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.

- Включите выключатели “ СЕТЬ” блока мультиметров P1 и автотрансформатора А1.

- Активизируйте используемые мультиметры P1.1 и P1.2.

- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, установите ток, протекающий по катушке близкий к номинальному 5А и сразу запишите в таблицу 2.1 время, ток, напряжение. Рассчитайте по формуле $R = \frac{U}{I}$ электрическое

сопротивление. Электрическое сопротивление в момент включения R_0 . Затем сопротивление будет нарастать и для всех последующих точек измерения электрического сопротивления R_A .

- По термометру определите температуру окружающей среды.

- По мере увеличения температуры поддерживайте ток постоянным, увеличивая напряжение питания автотрансформатором А1

- Снимать показания необходимо через каждые 2 минуты до установившегося значения превышения температуры.

Температура считается установившейся, если при продолжительном режиме она изменяется не более чем на $\pm 1^{\circ}\text{C}$ в течении часа (ГОСТ 2933 – 83).

- По формуле (10) определить τ , занести в таблицу 2.5.1

Таблица 2.5.1

Время $t, \text{мин}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$R, \text{Ом}$	$\tau, ^\circ\text{C}$

- По формуле (7) определить $\hat{E}_{\text{от}}$ катушки.
- По усредненным значениям $\tau_{\text{с}}$ и T по формуле (1) построить кривую нагрева и сравнить с опытной.

3. Вопросы для самоконтроля

1. По какому закону возрастает температура катушки после её подключения к сети.
2. Какой режим называется установившемся, и чем он характерен.
3. Как зависит установившаяся температура катушки от площади охлаждения, коэффициента теплоотдачи, мощности катушки.
4. Что такое постоянная времени нагрева, от чего зависит её величина.
5. Как влияет величина постоянной времени нагрева на процесс нагрева.
6. Что такое превышение температуры.
7. Что такое коэффициент теплоотдачи, от чего он зависит
8. Как влияет материал, и масса катушки на величину постоянной времени нагрева.

Лабораторная работа №2

НАГРЕВ КАТУШКИ В КРАТКОВРЕМЕННОМ И ПОВТОРНО – КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

Цель работы. Ознакомиться с процессом нагрева катушки постоянного тока в кратковременном и повторно – кратковременном режиме. Научиться по тепловым параметрам катушки строить кривую нагрева в этих режимах и рассчитывать коэффициент запаса.

1 Предмет исследования

Процесс нарастания температуры катушки в большей степени зависит от отношения времени нагрева к постоянной времени нагрева. Установившееся значение наступает через $4T$ с погрешностью, не превышающей 2%, такой режим называется продолжительным. Многие промышленные установки работают в течение времени $t_p < 4T$, затем отключаются или в течение времени изменяется циклично нагрузка по определенному закону. В таких режимах наблюдается нарастание температуры и её снижение.

1.1 Кратковременный режим нагрева.

Кратковременным режимом называют такой режим, при котором за время работы $t_p < 4T$ катушка не успевает нагреться до установившегося значения, а за время паузы $t_i \geq T$ после отключения охлаждается до температуры окружающей среды, кривая 1, рис.1.

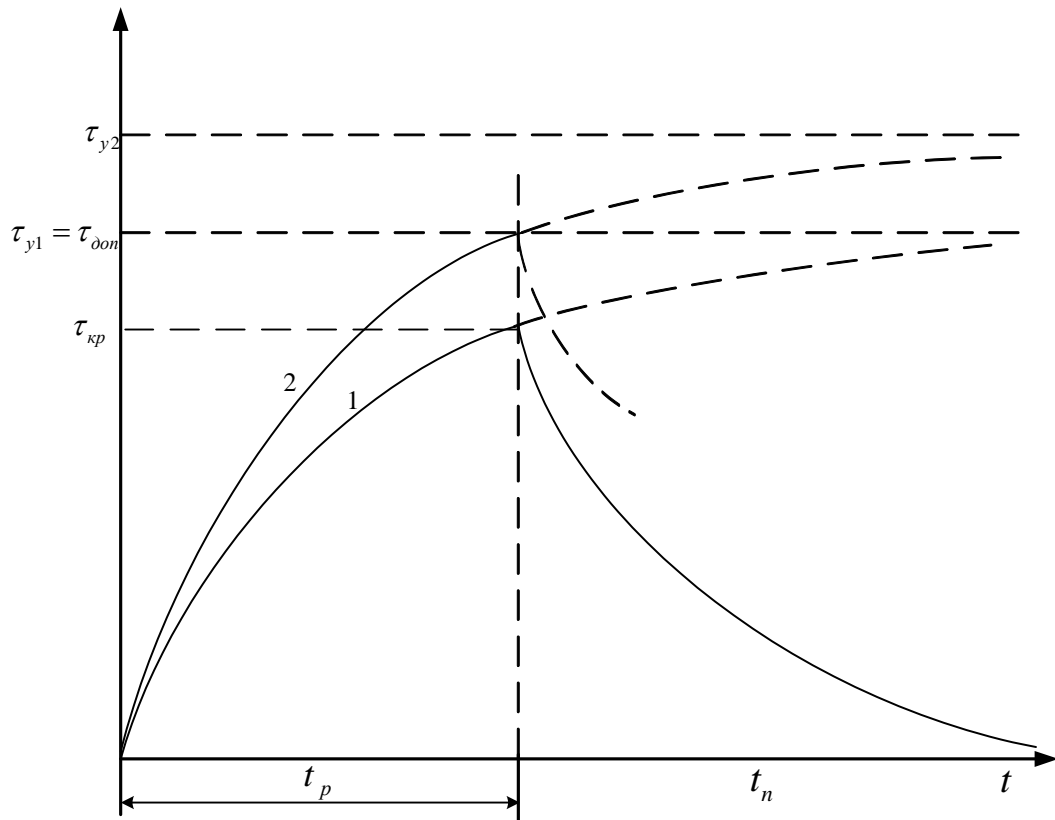


Рис.1. Кратковременный режим нагрева.

Из рисунка видно, что при кратковременном режиме работы величина тока (мощности) может быть принята большей, чем при длительном режиме.

Из уравнения процесса нагрева катушки в продолжительном режиме

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

из условия достижения за время работы t_p температуры $\tau_{кр} = \tau_{\text{дв}}$ необходима мощность

$$P_{\text{дв}} = \hat{E}_{\delta} D_{i\delta}, \quad (2)$$

где \hat{E}_{δ} - коэффициент перегрузки по мощности

$$\hat{E}_{\delta} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{дв}}}{T}}} \quad (3)$$

Так как $P \equiv I^2$, то $K_I = \sqrt{K_P}$

1.2 Повторно – кратковременный режим

Во многих технологических установках промышленных предприятий электрические аппараты работают в повторно – кратковременном режиме (ПКР)

В этом режиме строго чередуются циклы работы и покоя. За время работы в аппарате выделяются электрические потери, в результате чего все его части нагреваются, за время паузы аппарат охлаждается, при этом за время работы температура не достигает установившегося значения, а за время паузы не охлаждается до температуры окружающей среды.

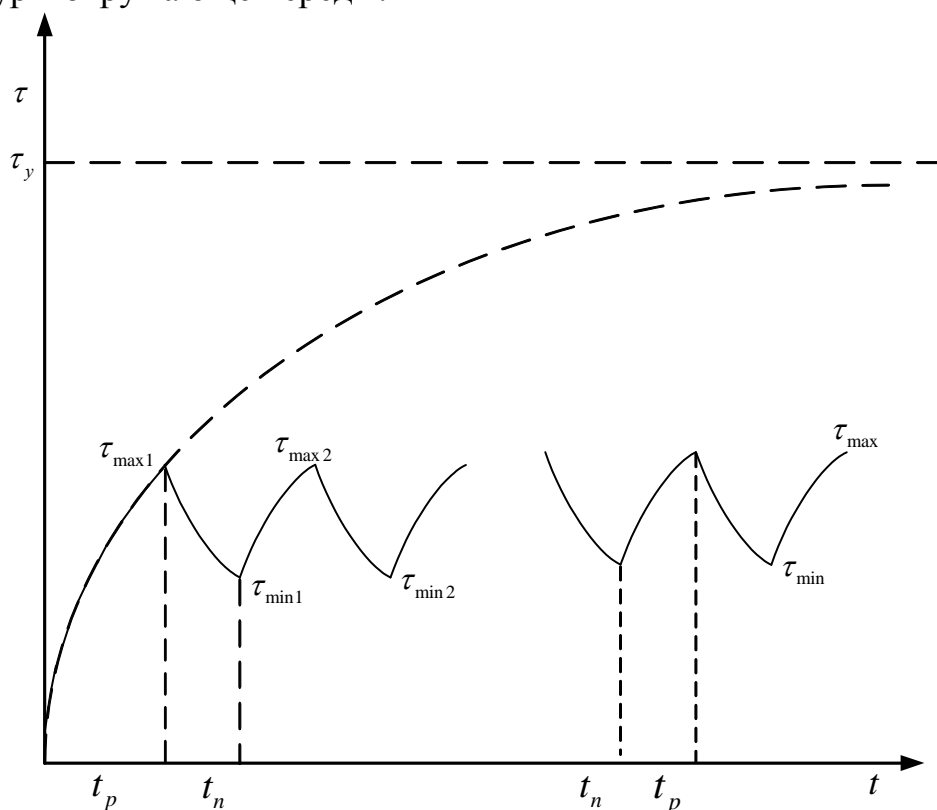


Рис.2. Нагрев катушки в повторно – кратковременном режиме.

Если такие циклы будут периодически повторяться достаточно долго, то наступит квазиустановившейся режим, при котором температура изменится от минимального τ_{\min} в конце паузы до максимального во время работы τ_{\max} значения, рис.2.

Сумму времени работы и времени паузы называют временем цикла

$$t_{\delta} = t_{\delta} + t_i \quad (4)$$

Повторно – кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ – это отношение времени работы к времени цикла

$$\dot{I} \hat{A} = \frac{t_p}{t_p + t_i} = \frac{t_\delta}{t_\delta} \quad (5)$$

в процентах

$$\dot{I} \hat{A}\% = \frac{t_\delta}{t_\delta} 100 \quad (5')$$

и числом включения в час h .

τ_{\max} в квазиустановившемся повторно – кратковременном режиме гораздо ниже установившегося превышения температуры τ_δ продолжительного режима при одном и том же токе (мощности). Для более полного использования активных материалов необходимо увеличить ток (мощность) при этом максимальное превышение температуры не должно превышать допустимого значения $\tau_{\text{д.п.}}$.

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{д.п.}}$$

Отношение допустимых мощностей в повторно – кратковременном и продолжительном режимах называется допустимым коэффициентом перегрузки по мощности.

$$\frac{P_{\text{д.п.}}}{D_{\text{д.п.}}} = \hat{E}_\delta = \frac{1 - a^{\frac{t_\delta}{T}}}{1 - a^{\frac{t_p}{T}}}; \hat{E}_i = \sqrt{\hat{E}_\delta} \quad (6)$$

Для тех электрических аппаратов, для которых повторно – кратковременный режим работы является характерным, нормируется относительная продолжительность включения, и допустимое число включений в единицу времени. Имея данные о допустимом числе включений в час h_{\max} и допустимой относительной продолжительности ПВ %, можно легко найти допустимое значение коэффициента перегрузки, поскольку

$$t_\delta = \frac{3600}{h}; t_p = \frac{\dot{I} \hat{A}\%}{100} t_\delta = \frac{\dot{I} \hat{A}\%}{100} \frac{3600}{h}$$

тогда получим

$$\hat{E}_\delta = \frac{1 - \overset{\circ}{a}^{\frac{3600}{hT}}}{1 - \overset{\circ}{a}^{\frac{3600\dot{I}\hat{A}\%}{hT100}}} \quad (6')$$

Зная τ_δ и T (лабораторная работа №1) можно графическим методом построить ожидаемый процесс нагрева катушки в повторно – кратковременном режиме, рис.2.

Сначала по формулам

$$\tau = \tau_\delta (1 - \overset{\circ}{a}^{\frac{t}{T}}) \text{ – нагрев} \quad (7)$$

$$\tau = \tau_\delta \overset{\circ}{a}^{\frac{t}{T}} \text{ – охлаждение} \quad (8)$$

Построив в координатах $\tau = f(t)$ рис.2 кривые нагрева и охлаждения, разбивают ось времени на время работ t_p и время паузы t_i . За первый период работы кривая нагрева повторно – кратковременного режима совпадает с кривой нагрева в продолжительном режиме. В точке 1 катушка отключается и начинает охлаждаться. Для построения кривой охлаждения за время паузы необходимо спроектировать точку 1 на кривую охлаждения, получим точку 1'. Кривую охлаждения за время паузы строим параллельно кривой охлаждения, лежащей ниже точки 1. Спроектировав точку 2 на кривую нагрева, получим точку 2' и из точки 2 параллельно участка кривой нагрева, лежащей выше точки 2, строим участок 2-3. Таким же образом строим отрезки кривых нагрева и охлаждения до тех пор, пока не наступит установившийся режим, т.е. максимальные и минимальные температуры соседних циклов будут равны.

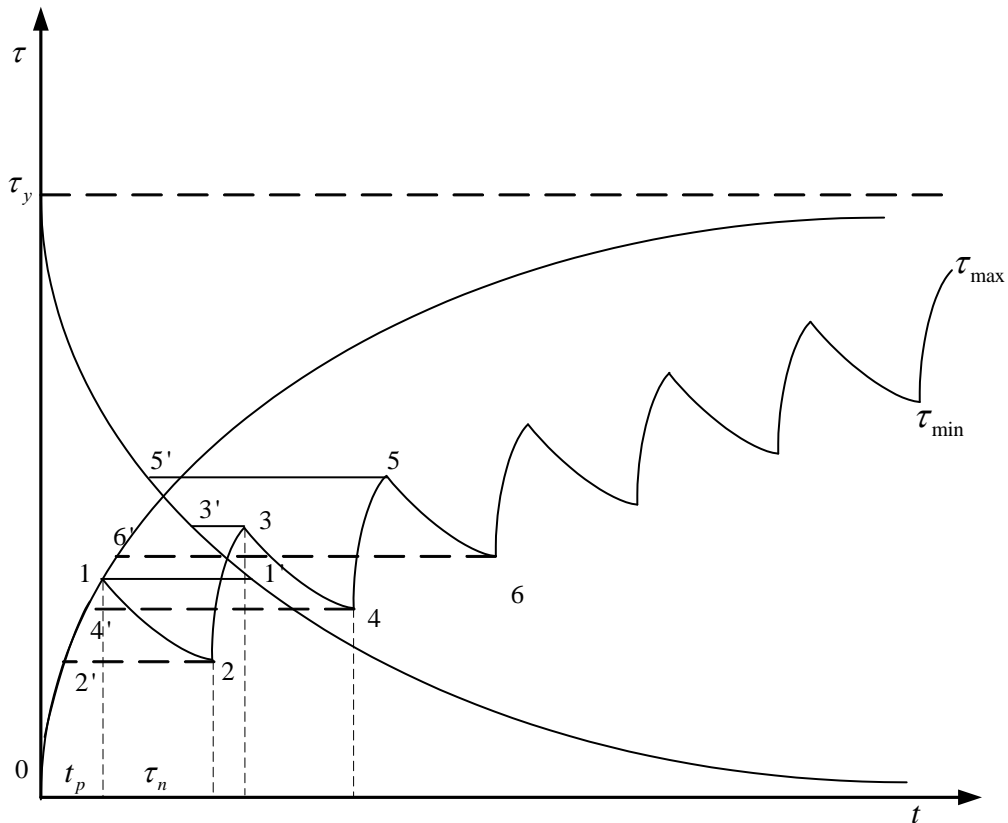


Рис. 3. Графическое построение кривой нагрева в ПКР

Рассчитать и построить кривую нагрева катушки в повторно – кратковременном режиме по известной величине $\tau_{\sigma}, \dot{Q}, t_p, t_i$.

1. Для первого цикла за время работы катушка нагреется до температуры $\tau_1 = \tau_{\sigma} (1 - \dot{a}^{-\frac{t}{T}})$. За время паузы катушка охладиться до $\tau_2 = \tau_1 \dot{a}^{-\frac{t}{T}}$

2. Для второго цикла нагревание начнется с τ_2 и время работы нагреется до $\tau_3 = \tau_{\sigma} (1 - \dot{a}^{-\frac{t}{T}}) + \tau_2 \dot{a}^{-\frac{t_d}{T}}$. За время паузы температура снизится до температуры $\tau_4 = \tau_3 \dot{a}^{-\frac{t}{T}}$.

Для всех последующих циклов расчет необходимо проводить аналогично расчету перегрева 2 – го цикла до тех пор, пока не будет равенства максимальных и минимальных температур соседних циклов, рис4.

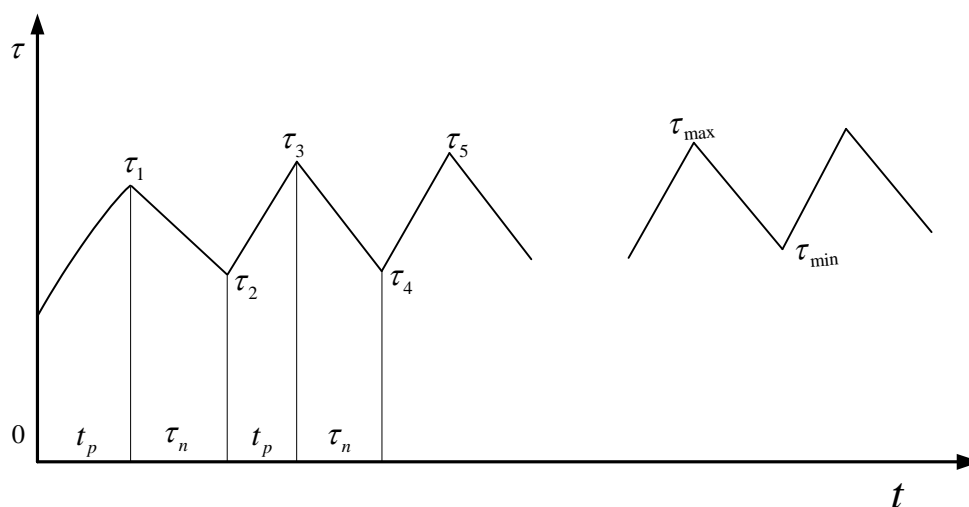


Рис.4. Кривые нагрева и охлаждения

Так как рассчитываются только максимальные и минимальные значения температуры в циклах, кривые нагрева и охлаждения на графике заменяются прямыми.

2. Программа работы и порядок её выполнения.

Испытания проводятся на электромагните постоянного тока напряжением 24В, ток 5А. Процесс нагрева контролируется термопарой, встроенной в корпус. Из-за перепада температур в самой катушке, а также катушка – корпус, корпус – термопара величина температуры будет значительно меньше средней температуры, определенной по сопротивлению (лабораторная работа №1).

2.1 Задание

1. Снять кривую нагрева и охлаждения в кратковременном режиме.
2. Снять кривую нагрева в повторно – кратковременном режиме.

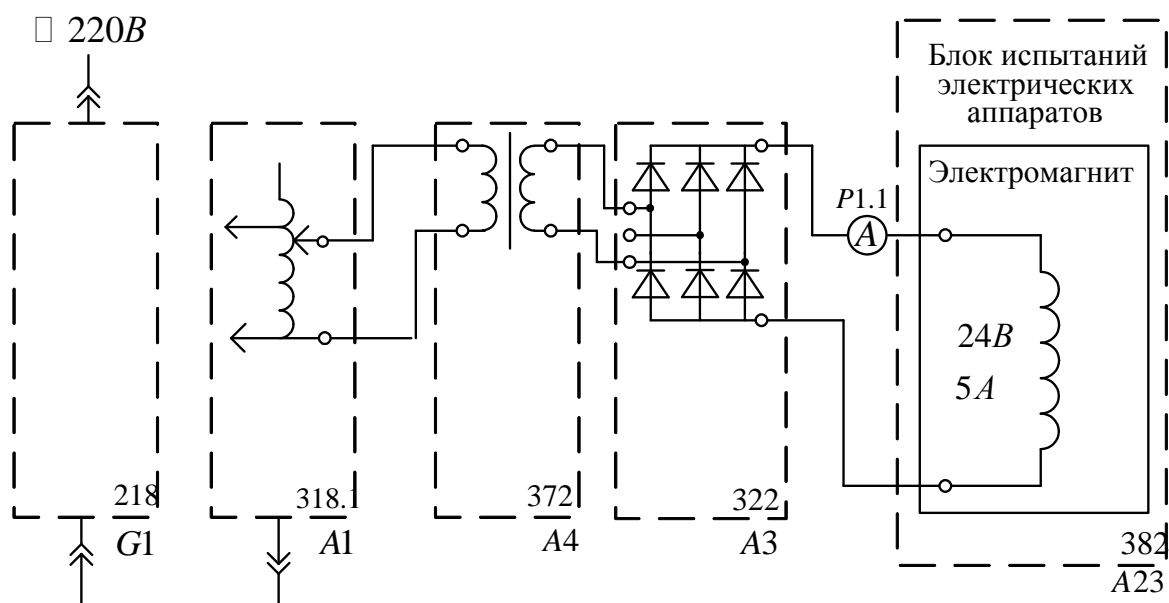
2.2 Снятие кривой нагрева катушки.

Для снятия кривых нагрева в кратковременном и повторно – кратковременном режиме необходимо собрать схему, перечень необходимой аппаратуры приведен ниже.

2.3 Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\square 220\hat{A} / 16\hat{A}$
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	$\square 0...240\hat{A} / 2\hat{A}$
A3	Выпрямитель	322	$400\hat{A} / 2\hat{A}$
A4	Однофазный трансформатор	372	$120\hat{A}, 220 / 24\hat{A}$
A23	Блок испытания электрических аппаратов	382	Электромагнит $-24\hat{A}, 5\hat{A}$
P1	Блок мультиметров	508.2	2 мультиметра $\square 0...1000\hat{A}$ $\square 0...10\hat{A}$ $0...20\hat{i} \hat{i}$

2.4 Схема электрическая соединений



2.5 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления “ \oplus ” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” автотрансформатора A1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений.
- Вставьте горячий спай термопары в отверстие (верх электромагнита, за якорем). Для лучшего теплового контакта завернуть спай в фольгу. Холодный спай вставить в мультиметр, в специальное гнездо.
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.

Кратковременный режим

- Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.
- Приготовьте таблицы 2.3.1 и 2.3.2.
- Включите выключатели “СЕТЬ” блока мультиметров P1 и автотрансформатора A1.

- Активизируйте используемые мультиметры P1.1 и P1.2.
- Запишите в таблицу температуру в холодном состоянии.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, установите согласованный с преподавателем ток, протекающий по обмотке электромагнита в пределах 4-6А.
- Сразу запишите в таблицу 2.5.1 показания амперметра и температуры.
- Через 2-3 минуты записывайте показание температуры, тока, напряжения. При проведении нагрева ток поддерживайте постоянным.
- Через 15-20 минут (согласовать с преподавателем) отключите питание на блоке автотрансформатора и продолжайте записывать температуру в течение 15-20 минут.

Повторно – кратковременный режим

- Уточните у преподавателя время работы t_p и время паузы t_i .
- Включайте на время t_p и отключайте на время t_i , записывайте в табл. 2.5.2 показания температуры и тока, постоянно поддерживая его неизменным. Рассчитайте число включений в час.
- Используя значения τ_δ и T , полученные в лабораторной работе №1 определите коэффициент мощности и тока $\hat{E}_\delta, \hat{E}_i$
- По результатам измерений постройте графики изменения температуры при нагревании и охлаждении в двух режимах на одном графике, $\vartheta = f(t)$

Таблица 2.5.1. Кратковременный режим

Режим	Нагрев					Охлаждение				
Время t										
Ток I, А										
Температура $\vartheta, ^\circ C$										

Талица 2.5.2 Повторно – кратковременный режим

Режим	Нагрев			Охлаждение			Нагрев			Охлаждение		
Время t												
Ток I, А												
Температура $\vartheta, ^\circ\text{C}$												

3. Вопросы для самоконтроля

1. Какие особенности нагрева тела в кратковременном режиме работы.
2. Что такое постоянная время нагрева.
3. Почему постоянные времени при нагреве и охлаждении не равны.
4. Что такое коэффициент теплоотдачи.
5. Какие факторы влияют на постоянную времени нагрева, как её уменьшить, увеличить.
6. Что нужно сделать, чтобы температура в кратковременном режиме достигла температуры продолжительного режима.
7. Чем объясняется пилообразный характер изменения температуры
8. Как влияет число включений и относительная продолжительность включений ПВ на кривую нагрева.
9. Как влияет время работы и постоянная нагрева на коэффициент перегрузки.
10. В каком случае наступает квазиустановившийся режим
11. Как определить среднюю установившуюся температуру катушек в ПКР по формуле Ньютона.
12. Как влияют ПВ и h на размах колебаний.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА.

Цель работы. Исследовать влияние контактного нажатия на величину переходного сопротивления. Ознакомиться с факторами, влияющими на переходное сопротивление и методами расчета сопротивления стягивания.

1 Предмет исследования

Под электрическим контактом понимают токопроводящее место соприкосновения токоведущих элементов электрической цепи, а токоведущий элемент с контактом называют контакт – деталью (КТ).

По назначению электрические контакты можно разделить на соединительные и коммутирующие контакты. Соединительные электрические контакты всегда замкнуты и обеспечивают протекание тока от одной детали к другой. Коммутирующие контакты могут находиться в замкнутом или разомкнутом состоянии, предназначены для включения, отключения и переключения электрических цепей, при этом происходит соприкосновение поверхностей. Соприкасающиеся контактные поверхности всегда имеют некоторую шероховатую поверхность и волнистость, выступ и впадины. Их величина и расположение зависит от физических свойств металла и способа обработки. При соединении контактных поверхностей соприкасаются противостоящие выступы. Под действием контактного нажатия выступы деформируются до тех пор, пока контактное нажатие не уравновесится реакцией, создаваемой напряжением деформацией микровыступов. В этом процессе число соприкасающихся выступов увеличивается. В результате на поверхности образуется несколько площадок касания, каждая из этих площадок называется единичной фактической механического соприкосновения. Эти поверхности имеют произвольную конфигурацию, а их сумма называется суммарной фактической поверхности соприкосновения, рис.1.

В плоских контактах используется понятие условной площади контактирования $A_{\text{сн}} = b \cdot l$ равной площади контактной поверхности.

Площадь фактической поверхности соприкосновения на 3-4 порядка меньше условной площади контактирования и не зависит от размеров последней.

Деформация микровыступов на контактной поверхности может быть упругой или пластической (остаточной). Пластическая деформация в чистом виде имеет место только в одноточечном контакте игла-плоскость, в остальных видах контактов часть микровыступов имеет пластическую деформацию (наиболее высоких), а часть – упругую.

Из рис.1 видно, что фактическая поверхность соприкосновения КД неоднородна.

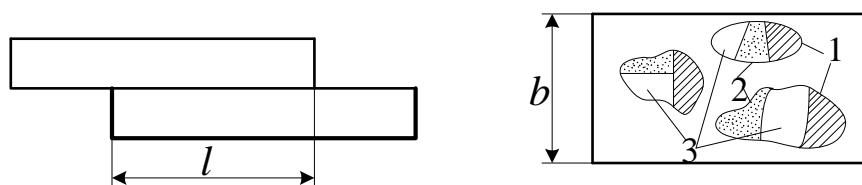


Рис.1. Соприкосновение двух контакт – деталей.

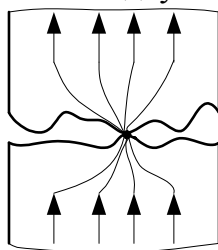


Рис. 2. Картина поля тока в области контактирования

Можно считать, что она состоит их трех разнохарактерных участков, произвольно расположенных на её поверхности:

1. Участка 1 с чисто металлическим соприкосновением КД, где ток происходит без заметного сопротивления.

2. Участка 2 с квазиметаллическим соприкосновением, покрытого тонкой пленкой (например адгезионный слой кислорода), сквозь которую ток проходит вследствие туннельного эффекта.

3. Участка 3 с пленками потускнения (оксиды, сульфиды). Такие пленки представляют собой практически диэлектрик и не пропускают ток. Участки с чисто металлическим и квазиметаллическим соприкосновением принято называть α – пятнами, являются основными проводниками тока, а их поверхность – эффективной площадью

контактирования, которая представляет собой часть фактической поверхности соприкосновения.

При протекании тока, поверхности контактирования нагреваются, чисто металлические поверхности окисляются, переходя во 2 или в 3 участки, квазиметаллические поверхности пробиваются, превращаясь в чисто металлические, т. е. площадь участков 1, 2, 3 изменяется в пределах фактической поверхности соприкосновения. Такое явление получило название – фриттинг.

Для уменьшения влияния температуры на процессы окисления контактные поверхности покрывают тонким слоем металла с плохими окислительными способностями. Часто покрывают серебром, пленки потускнения которого при 190°C восстанавливаются в серебро. Промышленные токопроводы часто после зачистки покрывают специальными смазками, на величину переходного сопротивления это не оказывает влияние, как и любое металлическое покрытие.

В месте перехода тока из одной КД в другую, рис. 2, наблюдается стягивание линий тока и уменьшение поперечного сечения, охватывающего линии тока. Зона, в которой линии тока начинают сближаться, называется зоной стягивания. Вследствие уменьшения поперечного сечения в месте электрического контакта и увеличения длины силовых линий тока при их стягивании к точке контактирования сопротивление зоны контактирования оказывается большим сопротивлением участка такой же длины сплошного токопровода. Это сопротивление называется сопротивлением стягивания $R_{\bar{n}0}$. Существует много моделей для расчета $R_{\bar{n}0}$, наибольшее применение нашли модели Хольма сферическая и параболическая.

Согласно сферической модели линии тока в зоне стягивания представляют собой радиус – векторы, а линии потенциала – сферы.

$$R_{\bar{n}0} = \frac{\rho}{\pi a n}, \quad (1)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление контакт – детали;

a - радиус площадки контактирования;

n - число точек контактирования.

В параболической модели линии тока конфокусные гиперболы, а линии потенциала параболоиды.

$$R_{\bar{n}0} = \frac{\rho}{2 a n} \quad (2)$$

Формула 2 наиболее предпочтительна, т.к. при прочих равных условиях дает завышенное значение сопротивления, следовательно, в проверочных расчетах будет создан запас по нагреву. Количество точек контактирования n зависит от формы контактов, механических свойств материала контактов. Принято считать, что при контактировании двух плоскостей наименьшее число контактов $n=3$ в линейном контакте, плоскость – цилиндр $n=2$, при касании сфера – сфера, сфера – плоскость можно считать, что число точек касания $n=1$. Между контакт – деталями практически нет одноточечного касания. Вследствие шероховатости поверхности в контакт – деталях сфера – сфера и сфера – плоскость касание происходит в нескольких точках, расположенных близко друг другу. Поэтому сопротивление стягивания в таких контактах будет отличаться от рассчитанных. Радиус площадки контактирования зависит от механических свойств материала контакт – деталей, контактного нажатия. Радиус площадки контактирования зависит от механических свойств материала контакт – деталей, контактного нажатия. Деформация контактов может быть упругой или пластической (остаточной), судят по величине предела прочности на смятие $\sigma_{\bar{m}}$

$$\sigma_{\bar{m}} = \frac{F_k}{n\pi a^2} \quad (3)$$

$\sigma < \sigma_{\bar{m}}$ - упругая, $\sigma > \sigma_{\bar{m}}$ - пластическая.

Радиус площадки касания в случае упругой деформации при сжатии гладких поверхностей шар – плоскость из одинаковых материалов силой F_k выражается формулой Герца.

$$a = 1.113 \sqrt[3]{\frac{F_k}{E} \cdot R} \quad (4)$$

При сжатии одинаковых шаровых поверхностей

$$a = 0.863 \sqrt[3]{\frac{F_k}{E} \cdot R} \quad (5)$$

где R - радиус шара;

E - модуль упругости.

Эти формулы можно использовать при расчете a плоских и линейных контактов, при этом считается, что зоны стягивания удалены друг от друга.

$$a' = 1.113 \sqrt[3]{\frac{F_k}{E \cdot n} \cdot R}, \quad (6)$$

где n - число точек касания

Если деформация при сжатии контактов носит пластический характер, по радиусу площадки контактирования.

$$a = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \cdot \sigma_{\bar{m}}}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\bar{m}}$ - временное сопротивление смятия материала контакта.

Так как вид деформации не известен, то вначале необходимо задаться видом деформации (любым), рассчитать a проверить вид деформации и скорректировать расчет.

Приведенные формулы позволяют получить достоверные результаты для свежизготовленных контактов. При коммутации электрических цепей наблюдается механический износ, изменяются механические свойства контактов.

Для таких контактов удобнее использовать эмпирические формулы вида

$$R_{\bar{n}0} = \frac{K}{(0.102 F_k)^m} \quad (8)$$

где k - коэффициент, учитывающий физические свойства металла.

m - характеризует форму контакта и вид деформации.

F_k - контактное нажатие, Н

Можно считать $m = 1$ - плоский контакт;

$m = 0.75$ - линейный контакт;

$m = 0.5$ - точечный контакт.

Если усилие в $\hat{e}\tilde{a}\tilde{n}$ коэффициент 0.102 убирается.

Расчеты показывают, что величина a соизмерима с величиной антикоррозионных покрытий, а так как в моделях Хольма шарик (или параболоид) с радиусом a имеет бесконечную электрическую проводимость, следовательно, покрытия не влияют на величину $R_{\bar{n}0}$.

Физическая картина соприкосновения двух поверхностей (рис 1) показывает, что сопротивление участков с чисто металлическим сопротивлением $R_{\bar{n}0}$, квазиметаллическим сопротивлением $R_{\hat{e}\hat{a}}$ и участок покрытый пленками с сопротивлением $R_{\hat{r}\hat{e}}$ на пути тока

соединены параллельно. Так как $R_{i\bar{e}}$ на много порядков больше $R_{\bar{n}\bar{o}}$ и $R_{\bar{e}\bar{a}}$, то переходное сопротивление контакта

$$R_{\bar{e}} = \frac{R_{\bar{n}\bar{o}} \cdot R_{\bar{e}\bar{a}}}{R_{\bar{n}\bar{o}} + R_{\bar{e}\bar{a}}} \quad (9)$$

Полученные в последние годы, данные о контактировании шероховатых поверхностей, позволяют сделать вывод, что сопротивление квазиметаллической зоны значительно превосходит сопротивление зоны стягивания для большинства металлов, следовательно, в инженерных расчетах сопротивлением $R_{\bar{e}\bar{a}}$ можно пренебречь.

Тогда $R_{i\bar{a}\bar{o}} = R_{\bar{n}\bar{o}}$

2. Программа работы и порядок её выполнения

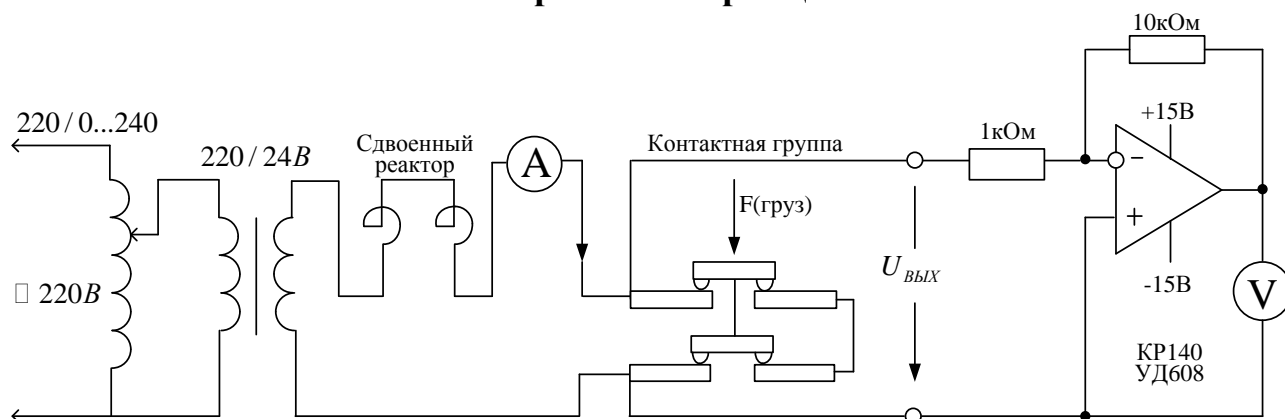
2.1 Задание

1. Подобрать согласно приведенному перечню аппаратуру и собрать электрическую схему.
2. Снять зависимость переходного сопротивления от величины контактного нажатия.
3. Измерить контакты и по усилию, заданному преподавателем рассчитать переходное сопротивление контакта с использованием формул (4 – 7).
4. Сравнить результаты эксперимента и расчета.

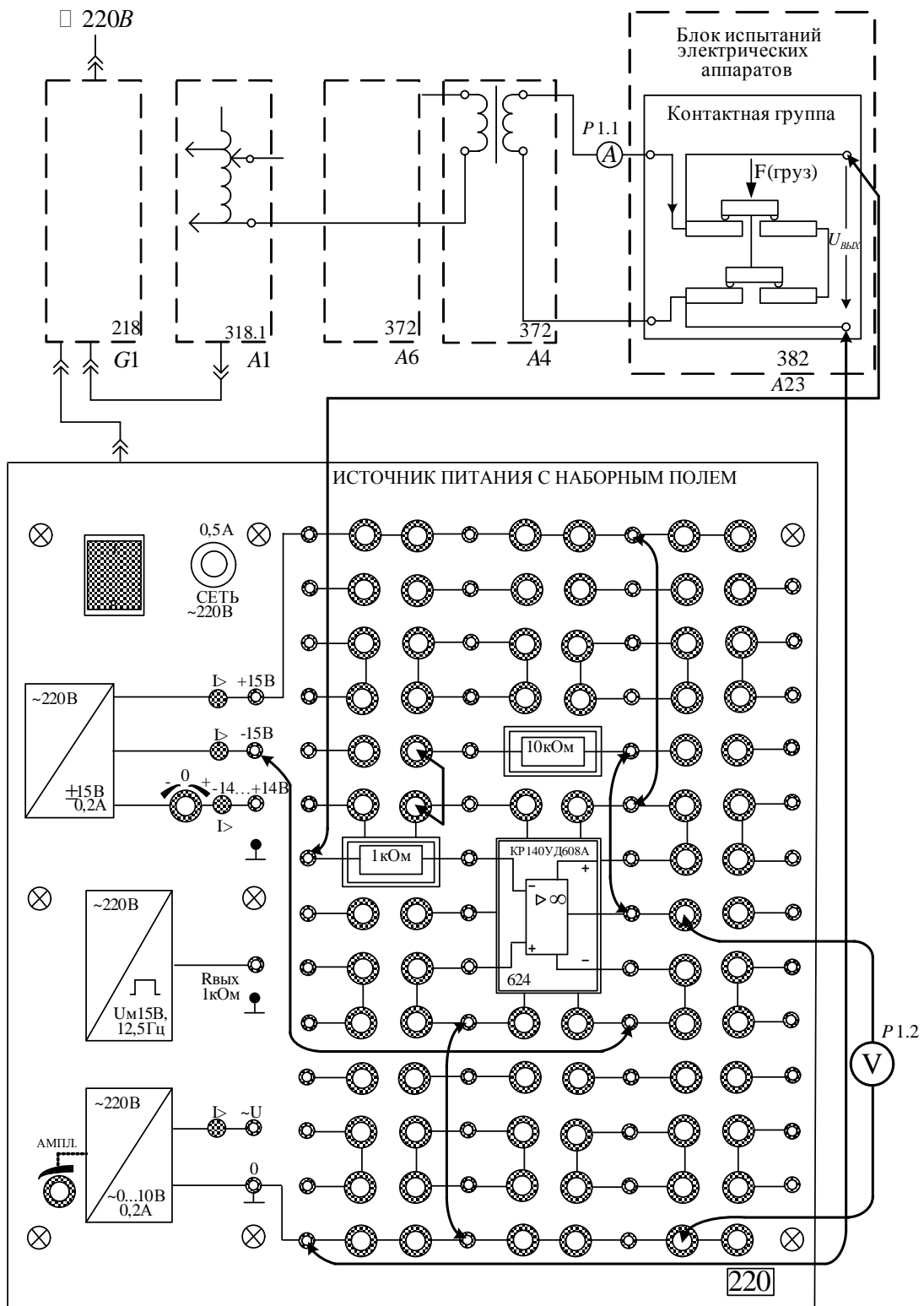
2.2 Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\square 220\hat{A} / 16\hat{A}$
G3	Источник питания с наборным полем	220	$\pm 15\hat{A}, -14\dots+14\hat{A}, \square 0\dots 9\hat{A}, \sqcup 15B$
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	$\square 0\dots 240\hat{A} / 2\hat{A}$
A6	Сдвоенный реактор	373	$\square 220\hat{A} / 2 \times 5\hat{A} / 0,005\hat{A}i$
A4	Однофазный трансформатор	372	$120\hat{A}\hat{A} / 220 / 24\hat{A}$
A23	Блок испытания электрических аппаратов	382	Контактная группа $380\hat{A}, 10\hat{A}$
P1	Блок мультиметров	508.2	2 мультиметра $\square 0\dots 1000\hat{A} /$ $\square 0\dots 10\hat{A} /$ $0\dots 20\hat{i} \hat{i}$
-	Набор миниблоков	600.10	20 миниблоков


2.3 Схема электрическая принципиальная



2.4 Схема электрическая соединений



2.5 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления “” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” автотрансформатора А1.
- На блоке испытаний электрических аппаратов ослабьте регулировочный винт положения якоря электромагнита, чтобы он не препятствовал перемещению рычага нагрузочного устройства, и снимите с рычага набор грузиков.
- Установите необходимые миниблоки в наборное поле источника питания в соответствии со схемой соединений и соедините аппаратуру в соответствии с этой схемой.
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатели “СЕТЬ” источника питания с наборным полем, блока мультиметров P1 и автотрансформатора А1.
- Активизируйте используемые мультиметры P1.1 и P1.2.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, установите ток, в контактной группе присерно5 А.
- Слегка нажимая на рычаг нагрузочного устройства пальцем, убедитесь по милливольтметру, что уменьшается падение напряжения на контактной группе (т.е. сопротивление уменьшается).
- Приподнимите пальцем рычаг и запишите в табл. 2.5.1 значения тока в контактной группе и напряжения на выходе усилителя в исходном состоянии (без грузов). В этом состоянии контакты сжимаются пружинами контактной группы с усилием, F_0 , примерно равным 100г.
- Повесьте на рычаг нагрузочного устройства сначала минимальный груз и, увеличивая его, записывайте в табл. 2.5.1 вес груза Р и значения напряжений на выходе усилителя. Поддерживайте ток в контактах примерно равным 5А.
- Повторите опыт при уменьшении груза. Для большей стабильности результатов каждый раз, после снятия очередного груза слегка приподнимите рычаг рукой и снова его опустите.

- Вычислите среднее значение $U_{\text{н\delta}}$ напряжения при увеличении и уменьшении груза.

- Рассчитайте сопротивление контакта R и силу сжатия F , приходящую на один контакт по формулам:

$$R = \frac{U_{\text{н\delta}}}{4 \cdot 10I},$$

где коэффициент 10 является коэффициентом усиления напряжения, а число 4 – количество контактов, соединенных последовательно.

$$F = \frac{2P}{4} + F_0,$$

где коэффициент 2 учитывает соотношение плеч рычага нагрузочного устройства, а число 4 – количество между которыми распределяется усилие сжатия.

- Постройте график изменения сопротивления контакта от силы сжатия $R(F)$.

Таблица 2.5.1

I=.....А	Вес груза P,г	0	200	400	600	800	1000
U, мВ (при увеличении P)							
U, мВ (при уменьшении P)							
U _{ср} , мВ							
R, мОм							
F,г		100					

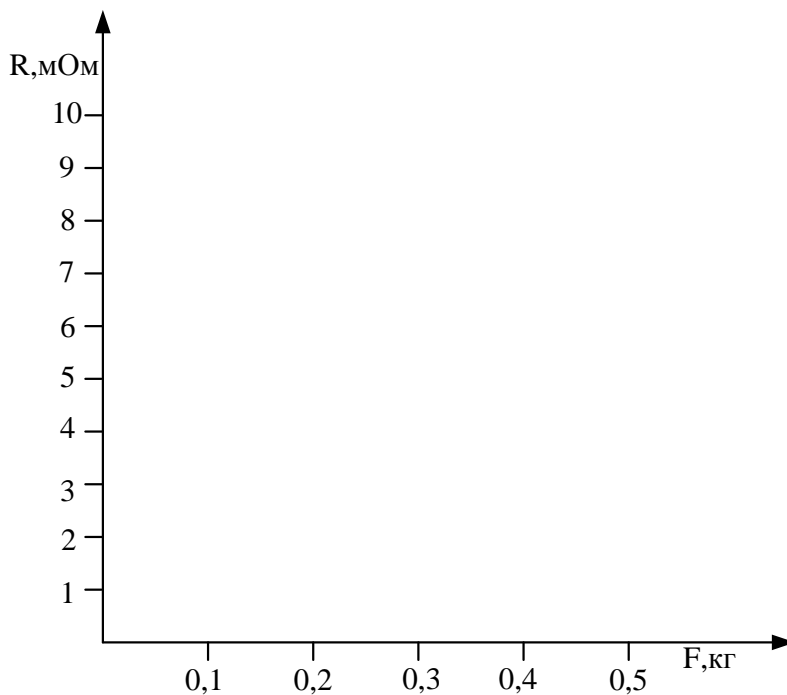


График изменения сопротивления контакта от силы сжатия

3. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое электрический контакт.
2. Что понимают под условной площадью контактирования.
3. Что такое эффективная и условная площадь контактирования, чем они отличаются.
4. Как влияет форма контакта на величину переходного сопротивления.
5. Как влияет усилие на величину переходное сопротивление.
6. Что такое фриттинг.
7. Почему при расчете переходного сопротивления не учитывают сопротивления пленок.
8. Как избавиться от пленочных покрытий.
9. Почему материал покрытия контактов не влияет на переходное сопротивление.
10. Какое влияние на переходное сопротивление оказывают материал контактов, вид деформации.
11. Для чего контактные поверхности покрывают плохо окисляющимися металлами (Ni, Ag, Au, Cd) или покрывают смазками.

12. Почему переходное сопротивление не зависит от размеров контакт – деталей.

13. Влияют ли покрытия на переходное сопротивление.

Лабораторная работа №4

РЕГИСТРАЦИЯ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНТАКТАХ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ АКТИВНОЙ, ИНДУКТИВНОЙ И ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗОК.

Цель работы. Ознакомиться с законами коммутации, снять кривые напряжения и тока при отключении активной, индуктивной и емкостной нагрузок твердотельных реле.

1 Предмет исследования

Процесс включения, отключения и переключения электрических цепей с изменением величины напряжения или тока получил название – “коммутация”. В коммутационном режиме происходит скачкообразное изменение сопротивления коммутирующего органа. Скачкообразная коммутация не происходит мгновенно, а занимает некоторое время от долей секунды в контактных аппаратах до микросекунд в бесконтактных (твердотельных).

Коммутационные узлы характеризуются глубиной коммутации – это отношение межконтактного сопротивления в отключенном состоянии к включенному. Для контактно – дугогасительных систем глубина коммутации составляет $10^{10} - 10^{14}$, для твердотельных $10^4 - 10^7$

Переход от одного режима работы электрической цепи к другому происходит не мгновенно, а занимает определенное время. Это объясняется тем, что каждому установившемуся состоянию электрической цепи соответствует определенный запас энергии электрических и магнитных полей, созданных напряжением и током этой цепи. Переход от одного режима к другому связан с изменением энергии этих полей. Для электрической цепи из последовательно соединенных индуктивности L и резистора R , включенных под напряжение источника, справедливо уравнение.

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Например, катушка, имеющая L и R , где в правой части падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлении. Если бы ток изменялся скачком, то $\frac{di}{dt} = \infty$, это нарушило бы условие равновесия цепи.

Отсюда вывод: ток в индуктивности не может изменяться скачком, он изменяется плавно, это не исключает скачкообразного изменения напряжения.

Уравнение равновесия электрической цепи с последовательным соединением резистора R и емкости C.

$$U = U_c + RC \frac{dU_c}{dt}, \quad (2)$$

В этом случае если U_c изменится скачком, то $\frac{dU_c}{dt} = \infty$, это приведет к нарушению равновесия электрической цепи. Следовательно, напряжение на емкости не может измениться скачком, в процессе коммутации оно изменяется плавно, что не исключает скачкообразного изменения тока.

Отсюда следует основной закон коммутации: **в процессе коммутации ток в индуктивности и напряжение на емкости изменяются плавно и не могут изменяться скачком.**

Процессы коммутации электрических цепей контактными аппаратами отличаются от процессов коммутации твердотельными (бесконтактными) реле.

Так для электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора R, индуктивности L и емкости C уравнение равновесия будет иметь вид.

$$U(t) = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + U_a(t), \quad (3)$$

где $U(t)$ - напряжение источника;

$U_a(t)$ - напряжение дуги на размыкаемых контактах.

Роль дуги в этом случае велика, так как она забирает большую часть энергии запасенной в индуктивности и емкости, отводит в виде тепла в окружающую среду, при этом переходные процессы сглаживаются, уменьшается перенапряжение. Большое влияние на величину перенапряжений оказывает скорость размыкания контактов или скорость изменения сопротивления коммутирующего органа в твердотельных реле.

Так при размыкании цепи катушки электромагнитная энергия, запасенная в индуктивной цепи, переходит в электрическую энергию, электрическая дуга не горит, тогда

$$\frac{Li^2}{2} = \frac{C\Delta U}{2} \quad (4)$$

где ΔU - перенапряжение;

L - индуктивность катушки;

C - емкость между проводниками, проводником и корпусом и т.д.

Емкость C , как правило, в $10^3 - 10^4$ раз меньше индуктивности, следовательно и перенапряжение при больших токах может достигнуть сверхдопустимых пределов.

В контактных аппаратах загорается электрическая дуга, уменьшая перенапряжение.

В этом случае можно считать.

$$\Delta U = L \frac{di}{dt}, \quad (5)$$

Отсюда видно, что перенапряжение ΔU и время горения электрической дуги пропорциональны индуктивности.

2. Программа работы и порядок её выполнения

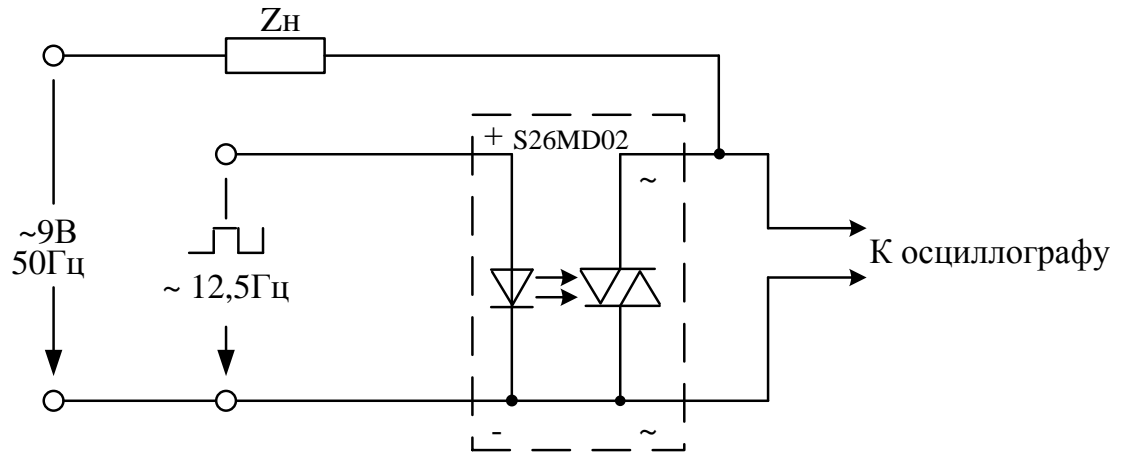
2.1 Задание

1. Собрать электрическую схему соединений
2. Снять осциллограммы тока и напряжения при отключении цепи.

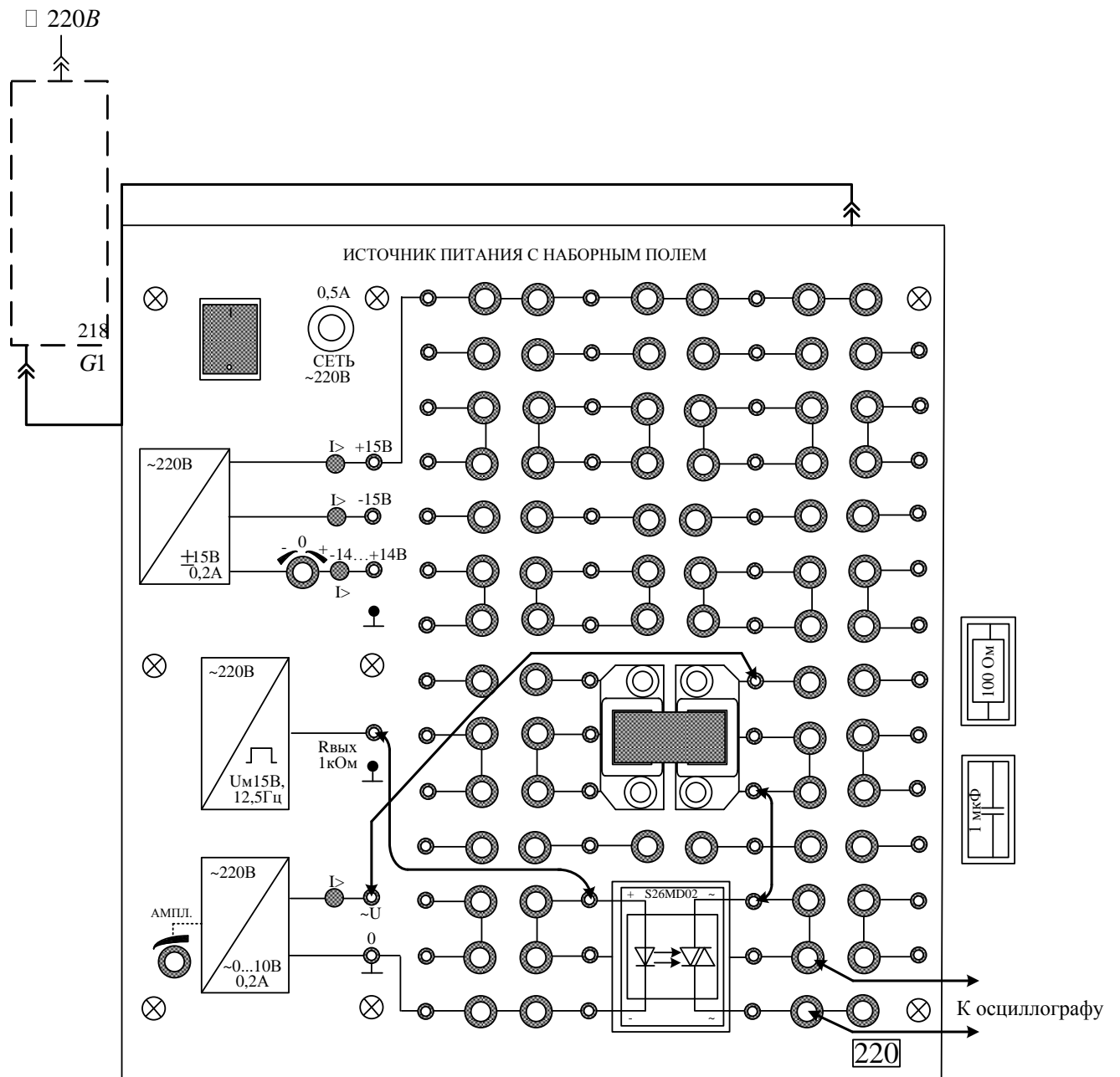
2.2 Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	□ 220Â / 16Â
G3	Источник питания с наборным полем	220	±15Â, -14...+14Â, □ 0...9Â, ∟ 15В
-	Набор миниблоков	600.10	20 миниблоков

2.3 Схема электрическая принципиальная



2.4 Схема электрическая соединений



Емкостная нагрузка 1 мкФ						

Параллельное соединение индуктивности и ёмкости						

3. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое “коммутация” электрических цепей
2. Какие факторы влияют на величину перенапряжения
3. От чего зависит индуктивность, как её изменить
4. Роль электрической дуги при коммутации контактными аппаратами
5. Влияние индуктивности L на величину перенапряжений
6. Влияние емкости C на величину перенапряжений
7. Как уменьшить перенапряжение в цепях LC

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Цель работы. Ознакомиться с лабораторными методами определения статических тяговых характеристик электромагнитов. Изучить факторы, влияющие на вид и величину тяговой характеристики.

1. Предмет исследования

Одной из основных характеристик электромагнитных механизмов является тяговая характеристика – зависимость электромагнитной силы, развиваемой электромагнитом от величины воздушного зазора $F_{y\dot{i}} = f(\delta)$.

Различают динамическую и статическую тяговую характеристику $F_{y\dot{i}} = f(i, m, \delta, \dots)$,

где i - ток в катушке;

m - масса подвижных частей;

δ - рабочий зазор.

Динамическая характеристика наиболее полно характеризует работу электромагнита, но сложность её расчета не позволяет с помощью её проводить анализ работы механизма.

Статическая характеристика $F_{y\dot{i}} = f(\delta)$ при $i = const$ позволяет с достаточной точностью судить о работоспособности аппарата.

Электромагнитная сила в линейных (ненасыщенных) магнитных цепях в основном определяется величиной потока и площадью рабочего зазора. Величину $F_{y\dot{i}}$ можно определить по формуле Максвелла

$$F_{y\dot{i}} = -\frac{\hat{O}_{\delta}^2}{2\mu_0 S_{\delta}}, \quad (1)$$

где \hat{O}_{δ} - поток в рабочем зазоре;

S_{δ} - площадь рабочего зазора.

При насыщении магнитной цепи часть намагничивающей силы (Н.С.) тратится на падение магнитного потенциала $U_{\mu\dot{i}\delta}$ на стальных участках, и только часть в рабочем зазоре.

$$IW = U_{\mu\delta} + U_{\mu\tilde{\delta}} \quad (2)$$

В этом случае расчет электромагнитной силы по приведенной формуле даст большую погрешность и лучше использовать формулу, полученную на основе баланса электромагнитной энергии.

$$F_{yi} = -\frac{1}{2} (U_{\mu\delta})^2 \frac{dG_{\delta}}{d\delta} = -\frac{1}{2} \frac{(\hat{O}_{\delta})^2}{G_{\delta}} \frac{dG_{\delta}}{d\delta}, \quad (3)$$

где G_{δ} - магнитная проводимость рабочего зазора.

без учета потоков выпучивания $G_{\delta} = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}$

Знак минус в формуле показывает, что усилие всегда направлено в сторону уменьшения рабочего зазора.

Для электромагнитов постоянного тока клапанного типа последнее уравнение можно представить гиперболой.

$$F_{yi} = K \cdot \frac{1}{\delta} \quad (4)$$

Полусный наконечник сердечника увеличивает начальное усилие, и тяговая характеристика становится более полой.

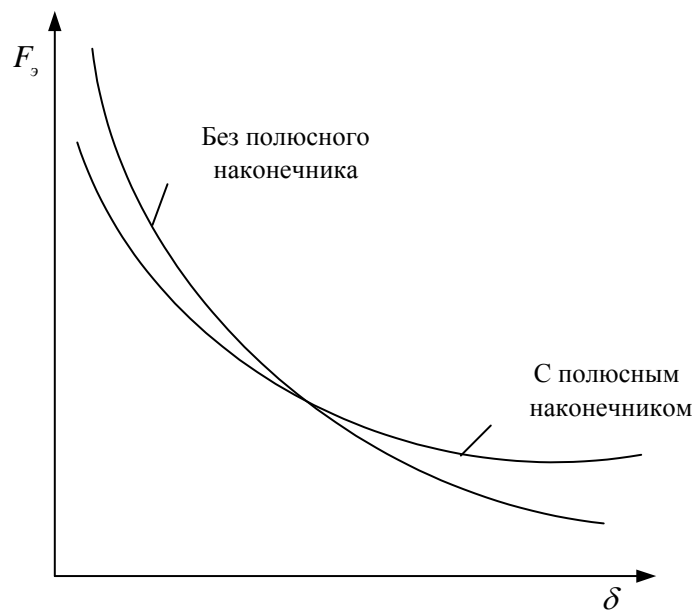


Рис.1. Вид тяговых характеристик электромагнита постоянного тока клапанного типа.

В соленоидных электромагнитах (якорь находится полностью или частично в катушке) появляется соленоидная сила (от потоков рассеяния замыкающихся через якорь). В зависимости от конструкции магнитной системы характеристика может стать седловидной, l – образной или практически постоянной, но во всех случаях начальное усилие увеличивается, и электромагнит можно выполнить с большим ходом якоря. В нашей лабораторной установке исследуется соленоидный электромагнит. В электромагнитах переменного тока магнитный поток не зависит от величины зазора, если не учитывать падения напряжения на активном сопротивлении катушки, следовательно и тяговая характеристика значительно выше чем в аппаратах постоянного тока, можно выполнить аппарат длинноходовой.

2. Программа работы и порядок её выполнения

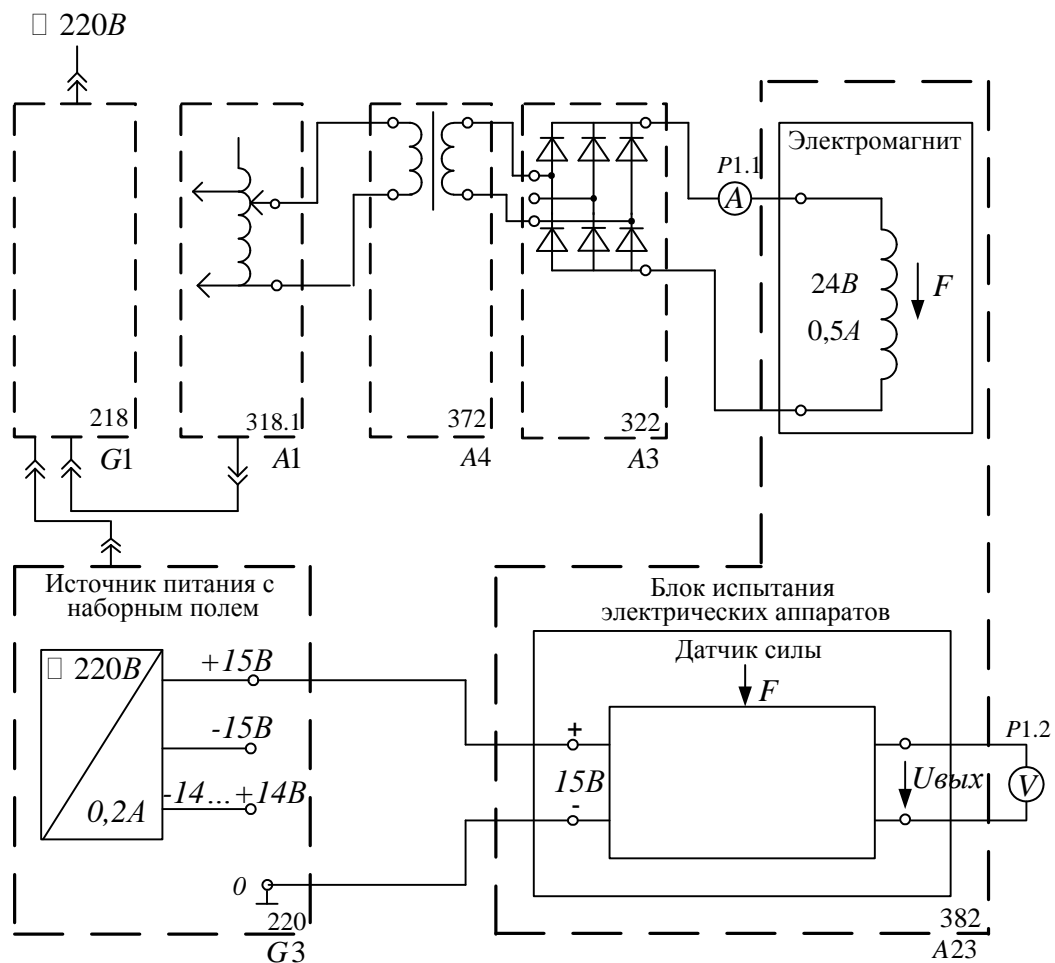
2.1 Задание

1. Ознакомиться с лабораторной установкой, принципом действия электромагнитного реле.
2. Подобрать аппаратуру по предлагаемому перечню. Собрать схему электрических соединений. Особое внимание обратить на подключение **понижающего трансформатора и датчика силы**.
3. Снять и построить тяговые характеристики для напряжений на катушке 20, 24, 28В.
4. Учесть, что при перемещении якоря работают контактная и возвратная пружина их усилие направлено встречно электромагнитному и фиксируется только избыточная сила.

2.2 Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\square 220\hat{A}/16\hat{A}$
G3	Источник питания с наборным полем	220	$\pm 15\hat{A}, -14\dots+14\hat{A}, \square 0\dots 9\hat{A}, \sqcup 15B$
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	$\square 0\dots 240\hat{A}/2\hat{A}$
A3	Выпрямитель	322	$400B/2A$
A4	Однофазный трансформатор	372	$120\hat{A}\hat{A}/220/24\hat{A}$
A23	Блок испытания электрических аппаратов	382	Электромагнит $-24\hat{A}, 5\hat{A}$
P1	Блок мультиметров	508.2	2 мультиметра $\square 0\dots 1000\hat{A}/$ $\square 0\dots 10\hat{A}/$ $0\dots 20\hat{i} \hat{i}$

2.3 Схема электрическая соединений



2.4 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления “ \oplus ” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “PE” автотрансформатора A1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений. **Не ошибитесь при подключении датчика силы к блоку питания! Он подключается к гнездам «+15В» и «0». Ни в коем случае не подключайте его к «+15В» и «-15В». Тогда на датчике окажется 30В, что недопустимо.** Для подключения мультиметра к

датчику используйте штатные измерительные проводники мультиметра с тонкими щупами.

- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.

- Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1/

- Активизируйте используемые мультиметры P1.1 и P1.2.

- На блоке испытаний электрических аппаратов ослабьте регулировочный винт положения якоря электромагнита, чтобы он не препятствовал перемещению рычага нагрузочного устройства, и снимите с рычага набор грузиков.

- Приподнимите пальцем рычаг и по милливольтметру, включенному на выход датчика силы, определите и запишите выходной сигнал датчика силы без нагрузки:

$$U_0 = \dots \hat{A}.$$

- Повесьте на рычаг набор грузов 1 кг и вновь запишите выходной сигнал датчика:

$$U_1 = \dots \hat{A}.$$

Снимите груз с рычага.

- Определите чувствительность датчика силы:

$$\alpha = (U_1 - U_0) / 2 \dots \hat{A} / \hat{e} \tilde{a},$$

где коэффициент 2 учитывает соотношение плеч нагрузочного рычага.

- Включите выключатель “Сеть” автотрансформатора А1 и, вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора по часовой стрелке, установите ток, протекающий по обмотке электромагнита, близкий к номинальному 0,5 А.

- Вращая регулировочный винт положения якоря электромагнита по часовой стрелки, увеличивайте усилие до тех пор, пока якорь не тронется с места. Запишите в табл. 2.4.1 максимальное напряжение, возникающее перед отрывом якоря электромагнита в строку с координатой $\delta = 0$.

- Изменяя регулировочным винтом координату положения якоря электромагнита, через 1 мм до 5 мм записывайте напряжение на выходе датчика силы. **Будьте осторожны! Полный ход якоря электромагнита составляет 5 мм. Попытка дальнейшего перемещения якоря электромагнита может привести к разрушению датчика.**

- Рассчитайте силу тяги электромагнита в каждом положении якоря по формуле:

$$F = 2U / \alpha \text{ кг,}$$

где коэффициент 2 учитывает соотношение плеч нагрузочного рычага.

- Постройте тяговую характеристику $F_{\text{yt}} = f(\delta)$ электромагнита.

Таблица 2.4.1

δ , мм	0	1	2	3	4	5
U, мВ						
F, кг						

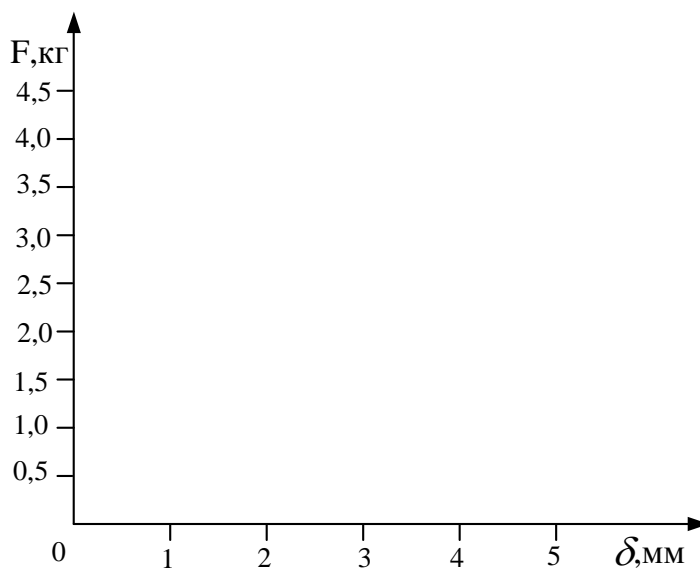


Рис.2. Тяговая характеристика электромагнита

3. Вопросы для самоконтроля

1. Как объяснить нелинейный характер тяговой характеристики.
2. Какие факторы влияют на вид тяговой характеристики.
3. Изменится ли тяговая характеристика при нагреве катушки и $U = const$.
4. Влияет ли число витков катушки на вид тяговой характеристики, если намагничивающая сила останется постоянной.
5. Как влияет род тока на тяговую характеристику

6. Что произойдет с тяговой характеристикой при увеличении тока или его уменьшении.
7. Изменится ли тяговая характеристика при увеличении напряжения.

Лабораторная работа №6

ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Цель работы: Ознакомиться с методикой экспериментального определения времени срабатывания с помощью осциллографирования тока при включении и отключении катушек постоянного и переменного тока.

1. Предмет исследования

Различают время срабатывания электромагнитов при включении и отключении.

Время срабатывания при включении – это время с момента подачи напряжения на катушку до полной остановки якоря.

Время срабатывания при отключении – это время срабатывания с момента отключения обмотки до момента возврата якоря в начальное положение.

Время срабатывания можно разделить на две составляющие: время трогания и время движения

$$t_{\tilde{n}\tilde{\delta}} = t_{\tilde{\delta}} + t_{\tilde{a}\tilde{a}}$$

В зависимости от величины времени срабатывания при включении электромагниты разделяют на

$t_{\tilde{n}\tilde{\delta}\tilde{a}} = 0.05 \dots 0.2\tilde{n}$ - нормальные;

$t_{\tilde{n}\tilde{\delta}\tilde{a}} < 0.05\tilde{n}$ - быстродействующие;

$t_{\tilde{n}\tilde{\delta}\tilde{a}} > 0.2\tilde{n}$ - замедленные.

При включении обмотки электромагнита на постоянное напряжение переходный процесс будет определяться уравнениями:

Уравнением равновесия электрической цепи

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt} = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

Уравнением движения

$$F_y = m \frac{d^2x}{dt^2} + F_{i\tilde{\delta}}, \quad (2)$$

где m - масса подвижных частей;

R - сопротивление;

ψ - потокосцепление;

L - индуктивность катушки.

$F_y, F_{i\delta}$ - электромагнитное и противодействующее усилие.

При включении электромагнита постоянного тока при линейной цепи $L = const$ уравнение (1) упрощается

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Общее решение уравнения

$$i = I_{\phi} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (4)$$

где $I_{\phi} = \frac{U}{R}$ - установившееся значение тока;

$T = \frac{L}{R}$ - электромагнитная постоянная времени.

При достижении тока до тока трогания $t_{\delta\delta}$ якорь начинает перемещаться, уравнение (3) для данного момента будет иметь вид

$$i_{\delta\delta} = I_{\phi} (1 - e^{-\frac{t_{\delta\delta}}{T}}) \quad (5)$$

отсюда

$$t_{\delta\delta} = \frac{L}{R} \ln \frac{I_{\phi}}{I_{\phi} - I_{\delta\delta}}, \quad (5')$$

где $\ln \frac{I_{\phi}}{I_{\phi} - I_{\delta\delta}}$ - постоянная действия.

При движении якоря возникает ЭДС самоиндукции, ток уменьшается по кривой $i\hat{a}$. После остановки якоря ток нарастает до установившегося значения по экспоненте с большей постоянной времени, чем до момента трогания.

Процесс нарастания тока показан на рисунке 1.

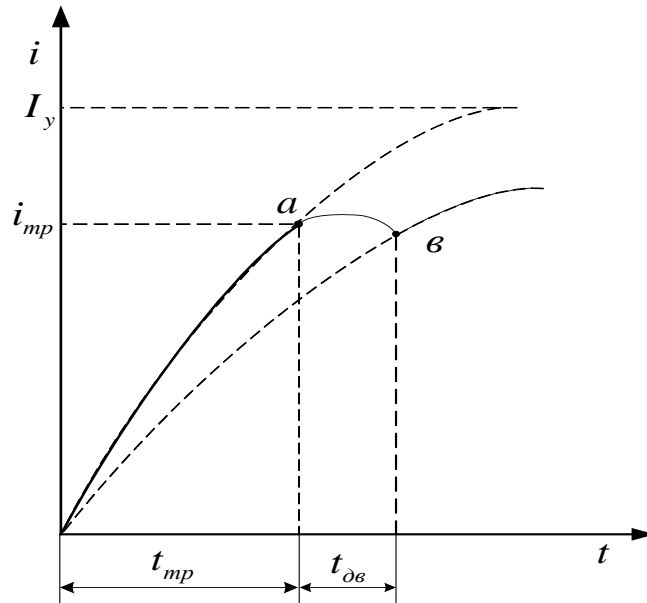


Рис.1. Осциллограмма изменения тока при включении.

Точно время движения можно определить, решая совместно уравнение движение и уравнение равновесия численными методами. Хороший результат дает метод Рунге - Кутты четвертого порядка.

Имея тяговую и противодействующую характеристику время движения с точностью 30-50% можно рассчитать графоаналитическим методом используя уравнение движения (2).

$$t_{\ddot{a}\ddot{a}} = \sqrt{\frac{2m(\delta_i - \delta_e)}{\overline{F_{\dot{\epsilon}\zeta\acute{a}}}}} ; \quad \overline{F_{\dot{\epsilon}\zeta\acute{a}}} = F_y - F_{i\delta}, \quad (6)$$

где $\overline{F_{\dot{\epsilon}\zeta\acute{a}}}$ - среднее значение избыточной силы, определяется графически.

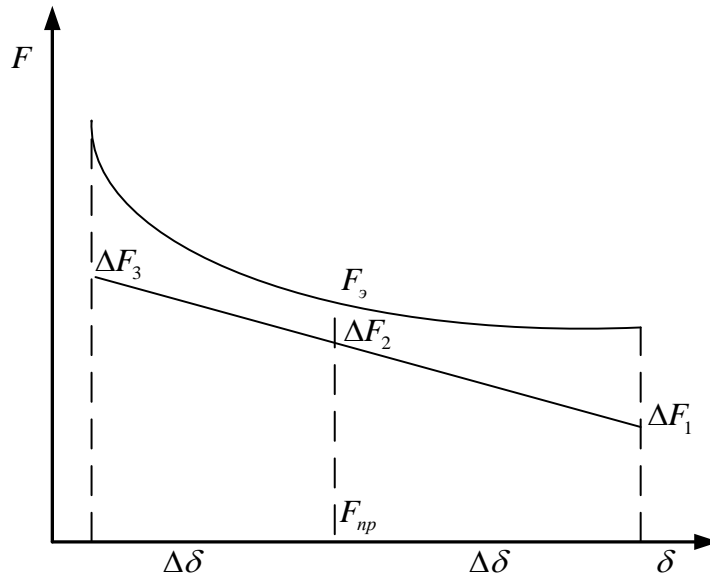


Рис.2. Определение средней избыточной силы

Для усреднения избыточной силы можно воспользоваться формулой Симпсона.

$$\overline{F_{\text{эцá}}} = \frac{\Delta F_1 + 4 \cdot \Delta F_2 + \Delta F_3}{6} \quad (7)$$

Опытным путем время трогания и время движения можно определить по осциллограмме (рис.1.)

При отключении электромагнита разрывом электрической цепи уравнения изменяются

$$U = i(R + R_{\dot{a}}) + \frac{d\psi}{dt} \quad (8)$$

Где $R_{\dot{a}}$ - сопротивление электрической дуги или искры в коммутаторе.

$$t_{\delta \delta \dot{i}} = \frac{L}{R + R_{\dot{a}}} \ln \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{i_{\delta \delta \dot{i}}} \quad (9)$$

где $t_{\delta \delta \dot{i}}$, $i_{\delta \delta \dot{i}}$ - время и ток трогания при отключении.

$$t_{\text{аао}} = \sqrt{\frac{2m\delta_{\text{эд}}}{(0.8-0.9)F_{\text{эца}}}}; \quad \overline{F_{\text{эца}}} = F_{i\delta} - F_y \quad (10)$$

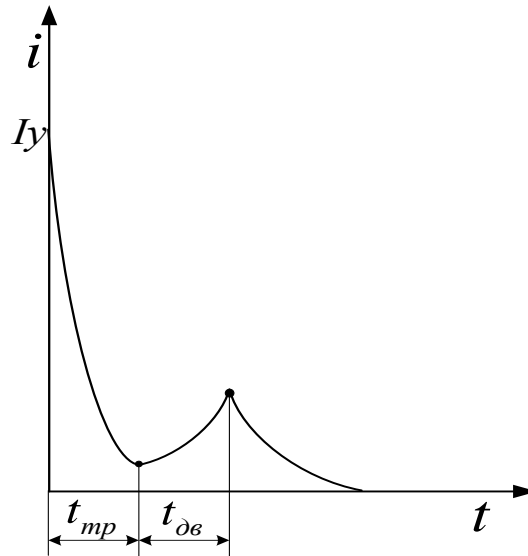


Рис. 3. Осциллограмма изменения тока при отключении катушки.

При включении обмотки электромагнита на переменное напряжение переходный процесс будет определяться таким же уравнением движения и уравнением равновесия

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = iR + \frac{d\psi}{dt},$$

Где α - начальная фаза включения.

Ток будет изменяться согласно уравнения

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) \overset{\frac{\omega t}{\ddot{A}i}}{\circ}, \quad (10)$$

где $\ddot{A}i$ - добротность контура.

$$\ddot{A}i = \omega \cdot \dot{O} = \omega \frac{L}{R}$$

φ - угол сдвига между током и напряжением.

Если обозначим $\gamma = \alpha - \varphi$; $Ki = \frac{i}{I_m}$, то при трогании уравнение будет иметь вид

$$Ki = \frac{i_{\delta\delta}}{I_m} = \sin(\omega t + \gamma) - \sin \gamma e^{-\frac{\omega t}{\Lambda t}} \quad (11)$$

$$t_{\delta\delta} = \frac{\arcsin(\pm K_{i\delta\delta} + \sin \gamma) - \gamma}{2\pi f} \quad (12)$$

Время трогания зависит от начальной фазы включения

$$\gamma_{\delta\delta\delta} = \arcsin(1 - K_{i\delta\delta}) \quad (13)$$

$$\gamma = 0; t_{\delta\delta\min} = \frac{\arcsin K_{i\delta\delta}}{2\pi f}; \quad (14)$$

$$t_{\delta\delta\max} = \frac{\arcsin(1 - 2K_{i\delta\delta}) - \arcsin(1 - K_{i\delta\delta})}{2\pi f} \quad (15)$$

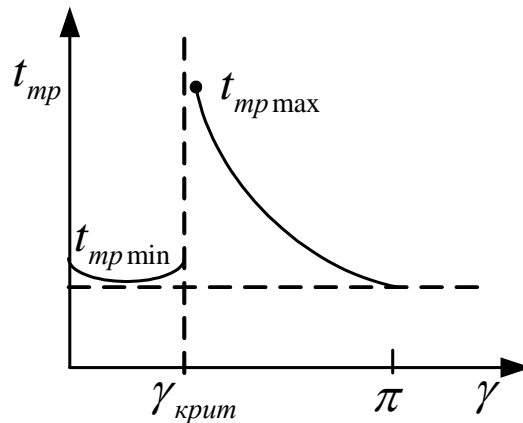


Рис.4. Время трогания аппаратов переменного тока

Для случая $K_{i\delta\delta} = 1, i_{\delta\delta} = I_m$

$$t_{\delta\delta\min} = \frac{1}{4f} = 5\dot{\iota} \tilde{n} \quad (16)$$

$$t_{\delta\delta\max} = \frac{3}{4f} = 15\dot{\iota} \tilde{n} \quad (17)$$

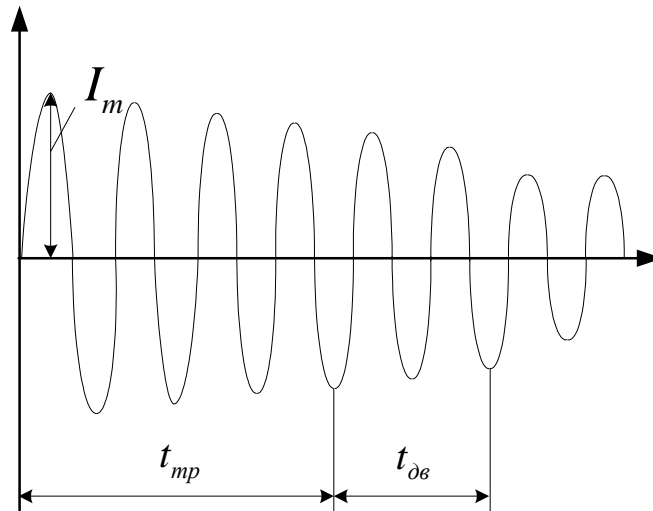


Рис.5. Осциллограмма изменения тока при включении катушки переменного тока

При отпущенном якоре индуктивное сопротивление катушки меньше, чем при притянutom, поэтому ток больше.

Программа работы и порядок её выполнения

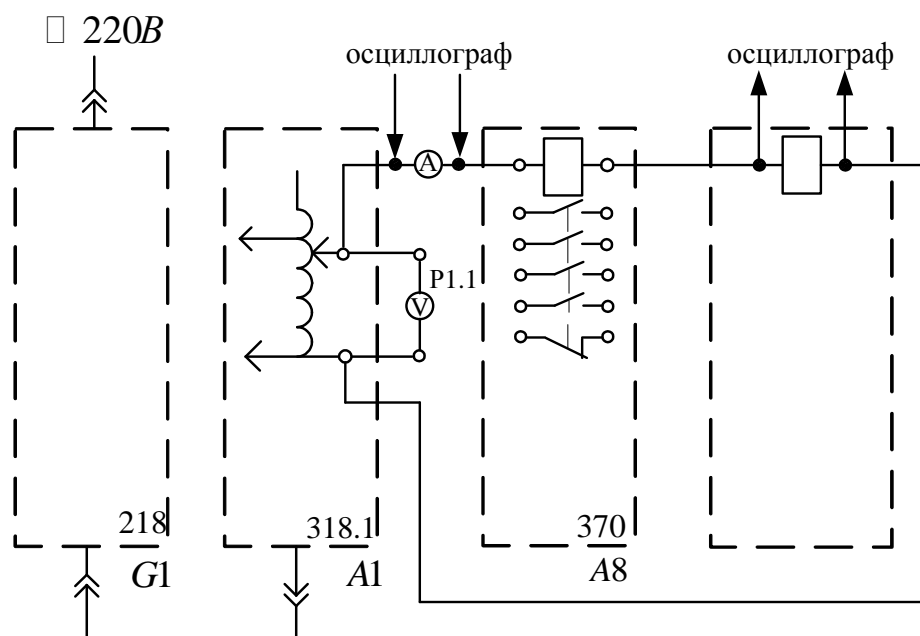
2.1 Задание

1. Собрать электрическую схему соединений
2. Снять осциллограммы тока и напряжения при отключении цепи.

2.2 Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	$\square 220\hat{A} / 16\hat{A}$
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	$\square 0...240\hat{A} / 2\hat{A}$
A8	Промежуточное реле	370	Номинальное напряжение $\square 220\hat{A}$ Ток контактов реле $5\hat{A}$ Коммутируемое напряжение $250\hat{A}$ Контакты 1з+4р
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра $\square 0...1000\hat{A} /$ $\square 0...10\hat{A} /$ $0...20\hat{i} \hat{i}$

2.3 Схема электрическая соединений



2.4 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления “ \oplus ” устройств, используемых в эксперименте, с гнездом “РЕ” автотрансформатора А1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- Установите желаемую уставку реле тока А7, например 1.5 А.
- Включите автоматический выключатель и устройство защитного отключения в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметра Р1 и автотрансформатор А1.
- Активизируйте используемые мультиметры Р1.2 и Р1.3.

3. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое время срабатывания при включении, отключении
2. Что такое время трогания $t_{\partial \delta}$
3. Почему время трогания при включении больше времени трогания при отключении прямым размыканием цепи питания.
4. Что такое электромагнитная постоянная времени.
5. Как влияет величина рабочего зазора на величину электромагнитной постоянной времени.
6. В чем сложность определения постоянной времени при отключении
7. Как влияет род тока на быстрдействие электромагнита
8. Как влияет начальная фаза включения аппарата переменного тока на время трогания
9. Какие движущие силы действуют на якорь при включении и отключении
10. Изменится ли постоянная времени аппарата при изменении числа витков при неизменном объеме катушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.:Энергия,1988. – 720с.
2. Александров Г.Н. Теория электрических аппаратов. – М.:Высш.шк,1985.
3. Таев И.С. Основы теории электрических аппаратов. – М.:Высш.шк,1987.
4. Сенигов П.Н. Электрические аппараты. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭА.001.РБЭ(917) – Челябинск.: ООО «Учебная техника», 2006. – 70с.
5. Электрические и электронные аппараты. Учебник для вузов / Под редакцией Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Работа №1. Исследование нагрева катушки в продолжительном режиме.....	4
Работа №2. Нагрев катушки в кратковременном и повторно – кратковременном режиме.....	15
Работа №3. Исследование переходного сопротивления электрического контакта.....	26
Работа №4. Регистрация кривой напряжения на контактах при отключении активной, индуктивной и емкостной нагрузок.....	38
Работа №5. Определение тяговой характеристики электромагнитного нита.....	45
Работа №6. Время срабатывания электромагнитов.....	53

Учебное издание

Жуковская Александра Александровна
Копылов Юрий Васильевич

Основы теории электрических и электронных аппаратов

Лабораторный практикум

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати _____ Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. ____ Уч.-изд.л. _____
Заказ _____ . Тираж _____ экз.

Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

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