

Р.Я. Кляйн

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие



2000

УДК 621.316 (075)

Р.Я. Кляйн

Электрические и электронные аппараты. Учебное пособие. Сост. Р.Я. Кляйн.
– Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 73 с.

Первая часть учебного пособия посвящена основам теории электрических аппаратов, в которой рассматриваются физические явления при коммутации электрических цепей, процессы нагрева аппаратов в различных режимах работы, динамика электромагнитов, а также методы расчета основных элементов электрических аппаратов.

Рецензенты:

Яковенко Н.И. – заведующий кафедрой физики и математики
Брянского сельскохозяйственного института,
доцент, кандидат технических наук

Данекер В.А. – старший научный сотрудник ОАО НПФ
«Геофит», кандидат технических наук

К303010 – 2000

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ	
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Переходное сопротивление контакта.....	5
1.3. Конструкции контактов.....	6
1.4. Режимы работы контактов.....	7
Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ДУГОГАШЕНИЕ	
2.1. Процессы ионизации межконтактного промежутка.....	9
2.2. Вольт амперные характеристика дуги.....	9
2.3. Условия гашения дуги постоянного тока.....	10
2.4. Перенапряжения при отключении дуги постоянного тока.....	11
2.5. Особенности гашения дуги переменного тока.....	12
2.6. Способы гашения электрической дуги.....	13
Глава 3. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
3.1. Источники тепла в электрических аппаратах.....	16
3.2. Способы передачи тепла.....	17
3.3. Допустимые температуры нагрева электрических аппаратов.....	18
3.4. Нагрев и охлаждение проводников в продолжительном режиме.....	18
3.5. Нагрев проводника при токе короткого замыкания.....	20
3.6. Нагрев проводника в кратковременном режиме.....	21
3.7. Нагрев проводника в повторно-кратковременном режиме.....	22
Глава 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	
4.1. Общие сведения.....	22
4.2. Методы расчета ЭДУ.....	23
4.3. Расчет ЭДУ, действующих на различные элементы токоведущей цепи.....	24
Глава 5. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
5.1. Общие сведения.....	28
5.2. Основные законы магнитной цепи.....	29
5.3. Схемы замещения магнитной цепи.....	30
5.4. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров.....	31
5.5. Расчет магнитных цепей постоянного тока.....	34
5.6. Расчет магнитных цепей переменного тока.....	37
5.7. Расчет магнитных цепей переменного тока с учетом потерь в стали и короткозамкнутого витка.....	41
Глава 6. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	
6.1. Общие сведения.....	42
6.2. Свободная магнитная энергия.....	44
6.3. Кривые возврата.....	44
6.4. Старение и стабилизация магнитов.....	45

Глава 7. РАСЧЕТ ТЯГОВЫХ СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ	
7.1. Энергетический баланс электромагнитов постоянного тока.....	45
7.2. Методы расчета тяговой силы электромагнита.....	46
7.3. Тяговые характеристики электромагнитов.....	49
7.4. Тяговые силы электромагнитов переменного тока.....	51
7.5. Вибрация якоря однофазных электромагнитов и способы ее устранения.....	51
7.6. Трехфазный электромагнит.....	52
7.7. Механические характеристики электромагнитных механизмов.....	53
7.8. Согласование тяговых и механических характеристик электромагнитов.....	53
7.9. Расчет параметров срабатывания и возврата.....	54
7.10. Коэффициент возврата и способы его повышения.....	55
Глава 8. Катушки электрических аппаратов	
8.1. Конструкции катушек.....	57
8.2. Коэффициент заполнения катушки и обмотки.....	58
8.3. Параметры катушки.....	60
8.4. Расчет катушек постоянного тока.....	60
Глава 9. Динамика электромагнитов	
9.1. Общие сведения.....	63
9.2. Процесс срабатывания электромагнита постоянного тока.....	64
9.3. Работа электромагнита.....	65
9.4. Время движения при включении электромагнита.....	66
9.5. Время срабатывания при отключении электромагнита.....	67
9.6. Методы ускорения и замедления электромагнитов.....	69
Литература.....	72

ВВЕДЕНИЕ

В1. Определение. Электрический аппарат - это электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

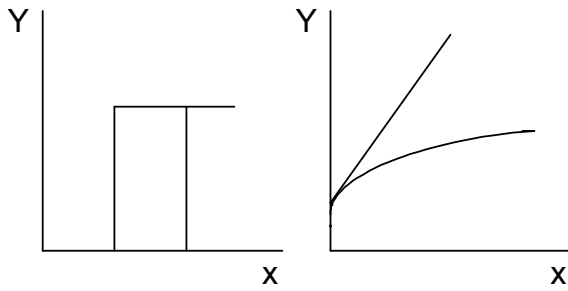
Под электрическим аппаратом понимается широкий круг всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

Таким образом, учитывая многофункциональное назначение электрических аппаратов объективно можно определить, что электрические аппараты - это средства для управления потоком электрической энергии.

В2. Функции электрических аппаратов.

Функции управления током включают в себя следующие разновидности: *коммутацию, стабилизацию, регулирование, преобразование, контроль и защита.*

К о м м у т а ц и я (от латинского *commutatio* - изменение) может быть дискретной (ступенчатой) или плавной (непрерывной) (рис.1). Пример дискретной коммутации - включение или отключение электрической цепи контактами аппарата. Такую коммутацию осуществляют, например, выключатели, контакторы, реле и др. Плавную коммутацию тока в цепи осуществляют, например, различные усилители, работающие в усилительном режиме: плавные изменения входного параметра вызывают плавные изменения выходного параметра.



дискретная
коммутация

плавная
коммутация

Рис. 1

С т а б и л и з а ц и я (от латинского *stabilis* - устойчивый) приведение какого-либо параметра или нагрузки работающего оборудования в устойчивое состояние. Эту функцию выполняют такие аппараты как стабилизаторы (феррорезонансные или полупроводниковые).

Р е г у л и р о в а н и е (от латинского *regulare*) автоматическое поддержание заданного режима работы какой-либо установки или автоматическое поддержание на определенном уровне того или иного технического параметра работающего

оборудования (электрическое напряжение, частота вращения, температура и т.п.).

П р е о б р а з о в а н и е - изменение величины какого либо параметра, например, напряжения одного уровня в напряжение другого уровня, частоты, мощности, температуры и т.д. Эту функцию выполняют трансформаторы, преобразователи и др.

К о н т р о л ь - наблюдение за изменением какого-либо параметра, его измерение, выдача информации о состоянии контролируемой величины. Эту функцию выполняют датчики.

З а щ и т а электротехнического оборудования от аварийных режимов (короткого замыкания, перегрузки, изменения частоты тока, перенапряжения, изменения направления потоков электроэнергии и др.).

В3. Классификация электрических аппаратов. Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков: назначению, области применения, принципу действия, роду тока, исполнению защиты от воздействий окружающей среды, конструктивным особенностям и др.

В3.1. По назначению: *Коммутационные аппараты распределительных устройств*, служащие для включения и отключения электрических цепей. К этой группе относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели, предохранители. Для аппаратов этой группы характерно относительно редкое их включение и отключение.

Ограничивающие аппараты, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшим перегрузкам.

Пускорегулирующие аппараты, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или каких-либо других потребителей электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы и реостаты. Для аппаратов этой группы характерны частые включения и отключения, число которых достигает 3600 в час и более.

Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики. Для реле характерно плавное изменение входной (контролируемой) величины, вызывающее скачкообразное изменение выходного сигнала. Выходной сигнал обычно воздействует на схему автоматики. В датчиках непрерывное изменение входной величины преобразуется в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Это изменение выходной величины может быть как плавным (измерительные датчики), так и скачкообразным (реле-датчики). С помощью датчиков могут контролироваться как электрические, так и неэлектрические величины.

Аппараты для измерений. С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина

приобретает стандартное значение, удобное для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.

Электрические регуляторы. Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону. В частности, такие аппараты служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, частоты вращения и других величин.

В3.2. По областям применения: *Аппараты электрических систем и электроснабжения.* Сюда относятся в основном электрические аппараты распределительных устройств низкого и высокого напряжений и ограничивающие аппараты.

Аппараты управления. К этой группе относятся в основном пускорегулирующие аппараты.

Аппараты автоматики. Группа включает в себя аппараты контролирующих функций.

В3.3. По номинальному напряжению: Электрические аппараты разделяются на аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000 В).

В3.4. По исполнению защиты электрические аппараты разделяются на аппараты открытого исполнения, защищенного исполнения, герметичного исполнения и взрывобезопасного исполнения.

Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

1.1. Общие сведения.

Место перехода тока из одной токоведущей части в другую называется электрическим контактом. Поверхность проводника, соприкасающаяся с поверхностью другого проводника, называется контактной поверхностью.

Сборочная единица в составе электрического аппарата, с помощью которой в процессе работы аппарата производится замыкание или размыкание электрической цепи, называется контактной системой электрического аппарата. В контактной системе электрический контакт осуществляется нажатием одного токоведущего элемента на другой при помощи контактных пружин, болтов, резьбовых соединений и т.д. Усилие, с которым сжимаются токоведущие элементы контакта, называется контактным нажатием.

У электрического контакта следует различать кажущуюся и действительную площади соприкосновения. При самой тщательной обработке контактной поверхности на ней все же будут микроскопические бугорки и шероховатости. Поэтому в действительности две поверхности будут соприкасаться не по всей кажущейся площади, а лишь отдельными площадками. По кажущейся форме соприкосновения условно различают три типа контактов: *точечный, линейный и поверхностный* (рис.2).

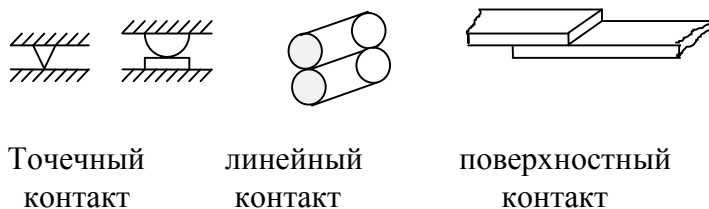


Рис.2

У точечного контакта соприкосновение происходит только в одной точке, кажущаяся и действительная площади соприкосновения совпадают. У линейных контактов соприкосновение происходит по линии. Действительная картина соприкосновения будет определена минимум двумя точками, расположенными на линии. У поверхностного контакта кажущееся соприкосновение происходит по поверхности, а физическое - по ряду точек, расположенных на этой поверхности.

Все контактные соединения должны удовлетворять требованиям надежности, механической прочности, термической и электродинамической устойчивости, стойкости против влияния внешней окружающей среды.

1.2. Переходное сопротивление контакта.

В месте перехода тока из одного проводника в другой возникает электрическое сопротивление, которое называется переходным сопротивлением контакта. Переходное сопротивление контакта можно представить как результат резкого повышения плотности тока в местах соприкосновения контактных поверхностей по сравнению с плотностью тока в самом контакте (рис.3). В местах соприкосновения проводников ток проходит через участки с малым сечением, которые представляют собой большое сопротивление. Сужение сечения приводит к увеличению плотности тока в них, росту потерь и падения напряжения.

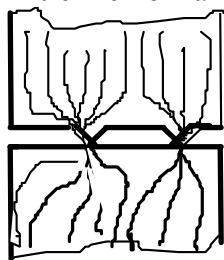


Рис.3

С уточнениями на основании опытных данных величина переходного сопротивления определяется выражением

$$R_n = \frac{k_{nx}}{(0,102F_k)^n} \quad (1)$$

Здесь k_{nx} - коэффициент, зависящий от материала и формы контакта, способа обработки и состояния контактной поверхности;

F_k - сила, сжимающая контакты;

n - показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения, для различных контактов имеет следующие значения:

точечный контакт	$n = 0.5,$
линейный контакт	$n = 0.5 - 0.7,$
поверхностный контакт	$n = 0.7 - 1.0.$

С увеличением контактного нажатия переходное сопротивление уменьшается (рис.4). Причем, после снятия F_k за счет остаточной деформации бугорков на поверхности контактов переходное сопротивление становится меньше, чем при увеличении F_k .

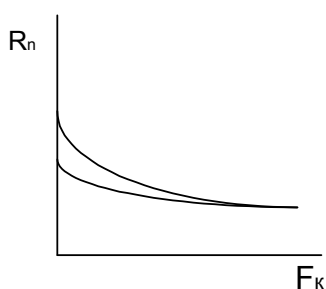


Рис.4

Переходное сопротивление очень чувствительно к окислению поверхности в виду того, что окислы многих металлов являются плохими проводниками. Окисление поверхности контактов происходит под воздействием кислорода воздуха. Вследствие окисления переходное сопротивление может возрасти в сотни и тысячи раз. Возрастание переходного сопротивления приводит к увеличению мощности на R_n и возрастанию температуры контактного соединения.

Для борьбы с окислением контактов их покрывают оловом, серебром или техническим вазелином.

1.3. Конструкции контактов

Конструкция разрывных контактов определяется значениями номинального тока, номинального напряжения, тока короткого замыкания, режимом работы, назначением аппарата.

На рис.5,а показан мостиковый контакт с точечными контактами. Контактное нажатие при

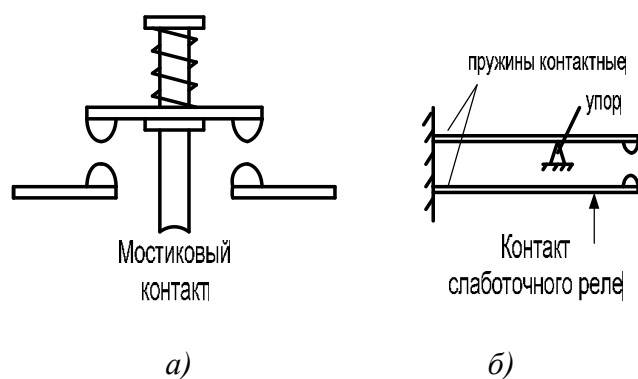


Рис. 5

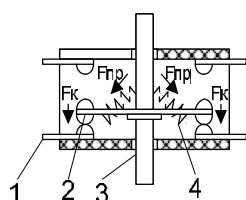


Рис. 6

замыкании создается цилиндрической контактной пружиной. Контакты такого типа рассчитаны на номинальный ток до 100 А и применяются, например, в магнитных пускателях, в промежуточных реле и др.

Контакты, показанные на рис.5,б выполнены в виде консольно закрепленных плоских пружин с контактными напайками, образующими точечный контакт. Контактное нажатие создается реакцией пружин при изгибе. Такие контакты находят применение в слаботочных реле на токи не более 1-2 А.

В реле широко применяются контакты спускового действия, конструкция которых приведена на рис.6.

Между двумя парами неподвижных контактов 1 размещен контактный мостик 2, установленный на траверсе 3. На мостик действуют две предварительно сжатые пружины 4, которые прижимают мостик к неподвижным контактам. При движении траверсы вниз пружины сжимаются и контактное нажатие F_k увеличивается.

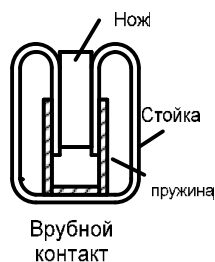


Рис.7

При переходе точки закрепления пружин на траверсе (точка О) через мостик направление действия сил F_{np} , создаваемых пружинами, меняется на противоположное и мостик скачком перемещается вверх, замыкая другую пару неподвижных контактов.

В силовых электрических аппаратах, например, в аппаратах распределительных устройств (рубильники, предохранители и др.) применяется врубной контакт (рис.7). Такой контакт состоит из неподвижного 1, подвижного 2 контакта и пружины 3. Это самоочищающийся контакт, так как после каждого замыкания и размыкания он за счет трения очищается от окисной пленки на соприкасающихся поверхностях.

1.4. Режимы работы контактов.

При коммутации электрической цепи работу контактов можно разделить на следующие режимы: режим замыкания, режим замкнутого состояния и режим размыкания.

Режим замыкания. В этом режиме возможны следующие процессы:

- а) вибрация контактов,
- б) эрозия контактов.

При замыкании подвижный контакт подходит к неподвижному с определенной скоростью. При соударении происходит упругая деформация материала обоих контактов. Это приводит к отбросу подвижного контакта, и он отскакивает от неподвижного на десятые или сотые доли миллиметра. Под действием контактной пружины происходит повторное замыкание контактов. Этот процесс может повторяться несколько раз с затухающей амплитудой. При каждом отбросе между контактами возникает электрическая дуга, вызывающая износ контактов в виде

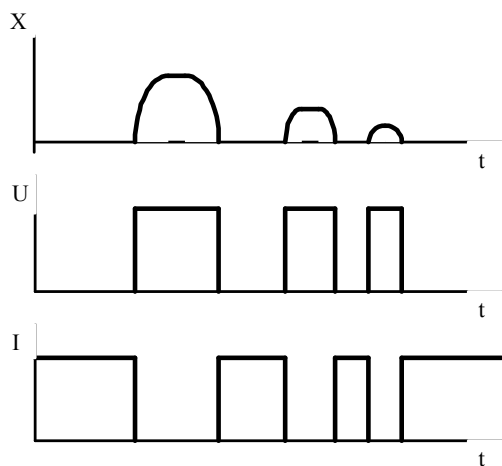


Рис. 8

оплавления и распыления материала контактов. Для уменьшения вибрации контактная пружина должна иметь предварительный натяг при разомкнутых контактах. В момент касания контактов сила нажатия возрастает не из нуля, а от величины предварительного нажатия.

Увеличение жесткости контактной пружины способствует уменьшению вибрации. На вибрацию контактов влияет момент инерции, с ростом которого вибрация усиливается. При протекании больших токов через контакты вибрация контактов также усиливается из-за возникновения электродинамических усилий, отбрасывающих контакты.

Поэтому для компенсации действия ЭДУ необходимо увеличивать нажатие контактных пружин.

В режиме замыкания контактов по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между контактами и при определенном расстоянии произойдет пробой межконтактного промежутка. В аппаратах НН пробой возникает при очень малом расстоянии и в дуговую форму разряд не переходит, так как подвижный контакт продолжает двигаться и замыкает контакт.

Однако пробой промежутка вызывает перенос металла с одного контакта на другой (с анода на катод). Происходит физический износ или эрозия. В аппаратах ВН при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникшая дуга горит долго, при этом возможно сваривание контактов. Для устранения пробоя применяют большое число разрывов, последовательно соединенных между собой.

Режим замкнутого состояния. В этом режиме возможны два случая:

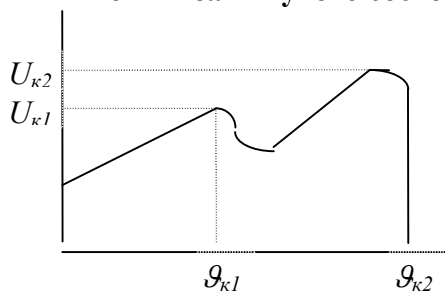


Рис.9

1) *через контакты проходит длительное время номинальный ток,*

2) *через контакты проходит ток короткого замыкания.*

При длительном номинальном токе на переходном сопротивлении контакта выделяется мощность, которая вызывает нагрев контакта. Это приводит к размягчению и плавлению материала контактов. Поэтому контакт характеризуется двумя точками (рис.9): точкой размягчения

(рекристаллизации) с параметрами $U_{к1}$ и $\theta_{к1}$ ($U_{к1}$ - падение напряжения, $\theta_{к1}$ - температура) и точка плавления с параметрами $U_{к2}$ и $\theta_{к2}$ (табл.1).

Таблица 1. параметры точек рекристаллизации и плавления контактов из различных материалов

Материал	$U_{к1}, В$	$\theta_{к1}, ^\circ C$	$U_{к2}, В$	$\theta_{к2}, ^\circ C$
медь	0.12	190	0.43	1083
серебро	0.09	150	0.35	960
алюминий	0.10	150	0.30	658

вольфрам	0.40	1000	1.00	3370

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе I_n падение напряжения на переходном сопротивлении было меньше допустимого

$$I_n R_n < U_{\text{доп}} = (0.5 - 0.8) U_{\text{кл}} \quad (2)$$

При коротком замыкании через контакты проходят токи в 10-20 раз превышающие номинальные значения. Из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки практически мгновенно повышается и может достигнуть температуры плавления. Это может привести к свариванию контактов.

Режим размыкания контактов. При размыкании сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает и растет температура точек касания. В момент разъединения контактов температура достигает температуры плавления и между контактами возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает либо дуговой разряд, либо тлеющий. При возникновении дугового разряда температура катодного и анодного пятен дуги достигает точки плавления материалов. Высокая температура контактов приводит к их интенсивному окислению, распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Все это влечет за собой износ контактов. Перенос материала с одного электрода на другой наиболее вреден при постоянном токе, так как направление переноса не меняется, что ведет быстрому выходу из строя контактов. Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависит от вида разряда и величины тока. Если величина тока и напряжения не превышают некоторых граничных значений I_0 и U_0 , то тлеющий разряд не переходит в дуговой (табл.2).

Таблица 2. Граничные значения I_0 и U_0 различных материалов контактов

Материал	U_0 , В	I_0 , А
серебро	12.0	0.40
золото	15.0	0.38
медь	12.3	0.43
вольфрам	17.0	0.90

Основными средствами борьбы с эрозией в аппаратах на токи от 1 до 600 А являются:

- 1) сокращение длительности горения дуги за счет применения дугогасительных устройств,
- 2) устранение вибрации при включении,
- 3) применение дугостойких контактных материалов.

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА И ДУГОГАШЕНИЕ

2.1. Процессы ионизации межконтактного промежутка.

В процессе размыкания контактов контактное нажатие уменьшается, переходное сопротивление увеличивается, увеличивается температура нагрева точек соприкосновения контактов и достигает температуры плавления материала контактов. В результате между

контактами возникает жидкометаллический мостик, который при расхождении контактов взрывается. На поверхности контактов остаются нагретые площадки, служащие источниками заряженных частиц в межконтактном промежутке.

Для того, чтобы межконтактный промежуток стал проводящим необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц. Процесс образования заряженных частиц называется процессом ионизации. Существуют четыре процесса ионизации - термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, ударная и термическая ионизации.

Термоэлектронная эмиссия - явление испускания электронов из накаливаемой поверхности. После взрыва жидкометаллического мостика на отрицательном электроде образуется, так называемое, катодное пятно, которое служит основанием дуги и очагом излучения электронов. Плотность тока термоэлектронной эмиссии не велика и может быть достаточной лишь для инициирования дуги.

Автоэлектронная эмиссия - явление испускания электронов из катода под воздействием сильного электрического поля. Расходящиеся контакты можно представить как конденсатор переменной емкости, который через сопротивление цепи заряжается и напряжение на нем растет от нуля до напряжения сети. Напряженность электрического поля в межконтактном промежутке возрастает и проходит через значения, превышающие 10 млн В/см. Такие напряженности достаточны для вырывания электронов даже из холодного электрода.

Ударная ионизация - процесс выбивания электрона из нейтральной частицы воздуха при соударении ее с движущимся электроном. Вновь образовавшийся электрон ионизирует следующую нейтральную частицу.

Термическая ионизация, это процесс ионизации межконтактного промежутка под воздействием высокой температуры, которая возникает при горении дуги. Термическая ионизация это единственный вид ионизации, который поддерживает горение дуги между контактами.

Одновременно с процессами ионизации в межконтактном промежутке происходят процессы деионизации. *Деионизацией* называется процесс образования нейтральной частицы из положительно и отрицательно заряженных частиц. Процесс деионизации может быть двух видов - рекомбинация и диффузия. Рекомбинация, это процесс воссоединения заряженных частиц и образования нейтральной частицы. Диффузия, это процесс перемещения заряженных частиц из межконтактного промежутка. В результате деионизации сопротивление межконтактного промежутка увеличивается.

2.2. Вольтамперные характеристики (ВАХ) дуги.

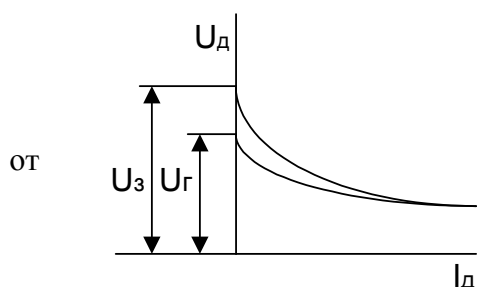
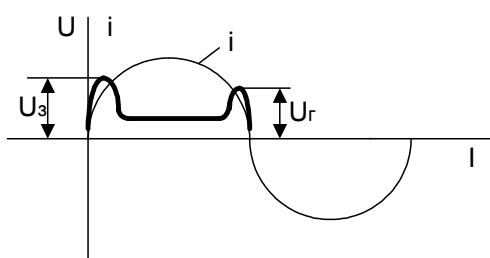


Рис.10

2.2.1. *ВАХ дуги постоянного тока.* Электрическая дуга между контактами загорается при некотором напряжении зажигания U_3 . Оно зависит от расстояния между контактами, температуры и давления среды, окружающей дугу, от температуры и материала контактов и др. По мере увеличения тока дуги напряжение на ней U_d уменьшается (рис10). Это обусловлено интенсивностью процессов ионизации.

Напряжение на дуге при уменьшении тока до нуля называется напряжением гашения U_2 . Это напряжение всегда меньше напряжения зажигания U_3 . Это объясняется большим нагревом и инерционностью тепловых процессов. Чем большей теплопроводностью и теплоемкостью обладает материал контактов и сама дуга, тем меньше будет разница между U_3 и U_2 . Напряжение на дуге U_d является



функцией тока дуги, расстояния между контактами и физических свойств контактов.

Рис.11

2.3.2. *ВАХ переменного тока.* Переменный ток изменяется

настолько быстро, что на процессы в дуге сказывается инерционность тепловых и ионных процессов. По мере нарастания тока напряжение на межконтактном промежутке возрастает и при U_3 дуга загорается.

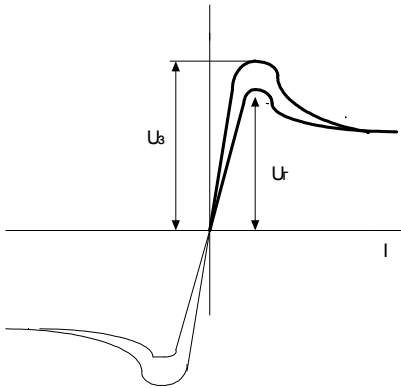


Рис.12

После этого, несмотря на увеличение тока дуги, напряжение уменьшается и на протяжении большей части полупериода остается практически постоянным. В области близкой к переходу тока через нулевое значение напряжение на дуге вновь увеличивается и к моменту гашения дуги оно достигает напряжения гашения U_2 (Рис.11). Вольтамперная характеристика дуги переменного тока имеет вид, показанный на рис.12.

В большинстве случаев в конце и в начале каждого полупериода величина тока в дуге изменяется не по синусоидальному закону, а по закону Ома. В этот момент сопротивление дугового промежутка резко увеличивается, что приводит к ступеньчато уменьшению тока практически до нуля. В результате величина этого тока в течение некоторого промежутка времени до его естественного прохождения через ноль и после становится очень малой (рис.13). Этот промежуток называется бестоковой паузой t_n . Она зависит от величины тока, напряжения, постоянной цепи (RLC) и от процессов внутри дугового промежутка

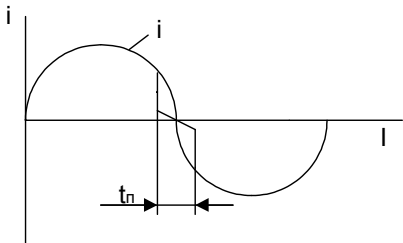


Рис. 13

2.3. Условия гашения дуги постоянного тока.

Рассмотрим процесс гашения электрической дуги при отключении цепи постоянного тока, состоящей из источника с напряжением U , сопротивления R , индуктивности L и коммутационного аппарата с напряжением на дуге U_d (рис.14,а)

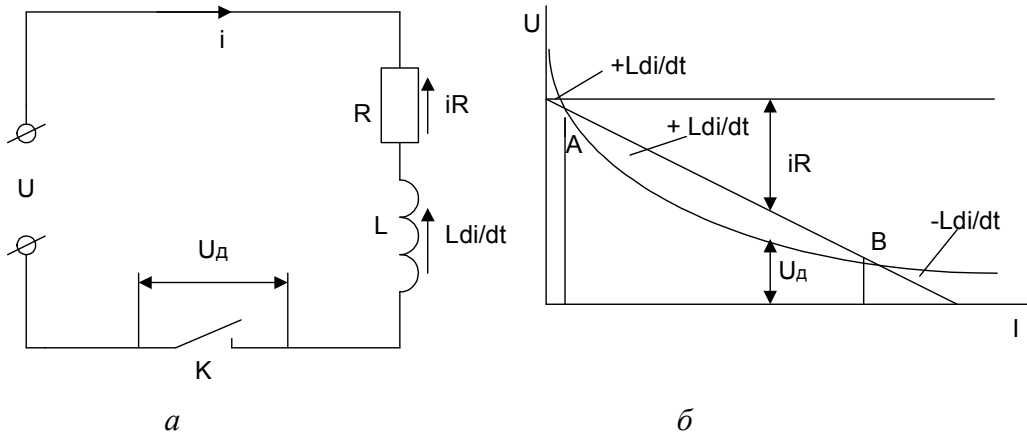


Рис.14.

При замкнутых контактах коммутационного аппарата $U_d = 0$.

Уравнение отключаемой цепи имеет вид

$$U = iR + U_d + L di/dt \quad (3)$$

При устойчивом горении дуги, когда ток не изменяется уравнение (3) будет иметь вид

$$U = iR + U_{\delta} \quad (4)$$

Если это равенство не будет удовлетворяться, то при условии $U > (iR + U_{\delta})$ появляется положительная эдс самоиндукции $(+Ldi/dt)$ и ток будет увеличиваться. Если $U < (iR + U_{\delta})$, то возникает отрицательная эдс самоиндукции $(-Ldi/dt)$ и ток будет уменьшаться.

Графически уравнение равновесия напряжений (3) представлено на рис.8б. Прямая, параллельная оси абсцисс, соответствует напряжению источника U , а прямая, проведенная под углом к оси абсцисс, соответствует падению напряжения на сопротивлении R . Кривая 1 представляет статическую ВАХ дуги. Отрезки, заключенные между кривой $U_{\delta}=f(i)$ и прямой $(U - iR)$, соответствуют Ldi/dt .

ВАХ дуги и прямая $(U - iR)$ пересекаются в точках А и В. Уравнение (4) удовлетворяется лишь в этих двух точках. Действительно, если по каким-либо причинам произойдет увеличение тока I_{δ} , то в цепи возникает положительная эдс самоиндукции $(+Ldi/dt)$, уменьшающая ток до значения I_{δ} . Наоборот, при уменьшении тока I_{δ} в цепи возникает отрицательная эдс самоиндукции $(-Ldi/dt)$, которая будет увеличивать ток до значения I_{δ} . Таким образом, точка В является точкой устойчивого горения дуги. Анализируя аналогичным образом изменение тока в точке А приходим к выводу, что точка А является точкой неустойчивого горения дуги, так как при уменьшении тока I_a отрицательная эдс самоиндукции $(-Ldi/dt)$ будет уменьшать ток до нуля и дуга погаснет.

Таким образом, электрическая дуга постоянного тока погаснет, если будет ликвидирована точка устойчивого горения (точка В), т.е. если ВАХ дуги будет лежать выше прямой $U_{\delta} > (U - iR)$ и не будет с ней пересекаться. Отсюда следует, что выражение

$$U_{\delta} > (U - iR) - \text{условие гашения дуги постоянного тока.}$$

Достигнуть этого можно либо увеличением сопротивления R , либо повышением падения напряжения на дуге. В первом случае увеличивается угол наклона прямой $iR = f(i)$. Во втором случае ВАХ $U_{\delta} = f(i)$ поднимается выше.

В дугогасительных устройствах применяются следующие способы, позволяющие повысить падение напряжения на дуге:

- 1) растягивание дуги, при этом ВАХ перемещается параллельно самой себе в сторону больших падений напряжений;
- 2) деление дуги на ряд коротких дуг, при этом используются околоэлектродные падения напряжения;
- 3) повышение давления газов в дуговом промежутке;
- 4) движение дуги в газовой среде, или наоборот, обдувание дуги газами;
- 5) соприкосновение дуги с поверхностью твердого изоляционного материала.

Последние три метода повышают падение напряжения на дуговом промежутке за счет увеличения градиента напряжения в створе дуги.

2.4. Перенапряжения при отключении дуги постоянного тока.

В момент погасания дуги, когда ток равен нулю, напряжение на дуговом промежутке равно напряжению гашения U_2 . В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$U = Ldi/dt + U_2 \quad (5)$$

отсюда

$$U_2 = U - Ldi/dt \quad (6)$$

Но так как $Ldi/dt < 0$, то (6) можно записать

$$U_2 = U + (Ldi/dt) \quad (7)$$

Таким образом, в момент гашения дуги напряжение на контактах равно напряжению источника плюс модуль напряжения на индуктивности. Увеличение напряжения на контактах относительно напряжения источника питания называется перенапряжением. Чем больше индуктивность коммутируемой цепи, чем больше скорость спада тока в момент гашения, тем больше перенапряжение на контактах коммутирующего аппарата. Скорость спада тока (di/dt) зависит от скорости роста сопротивления дугового промежутка, от скорости его деионизации. Поэтому быстродействующие аппараты при отключении цепи постоянного тока могут давать большие перенапряжения. Эти перенапряжения могут в десятки раз превышать напряжение источника.

2.5. Особенности гашения дуги переменного тока.

Электрическая дуга переменного тока, как и дуга постоянного тока, окончательно погаснет тогда, когда скорость деионизации дугового промежутка будет больше скорости его ионизации.

В период бестоковой паузы в результате интенсивной деионизации уменьшается проводимость дугового промежутка, и он превращается в диэлектрик. Одновременно с этим на нем растет напряжение так, что ток в дуге, равный U_d/i_d , будет увеличиваться или уменьшаться в зависимости от того, что растет быстрее: U_d или R_d . Если R_d растет быстрее, то ток уменьшается до нуля и дуга погаснет. Если с некоторого момента времени напряжение U_d будет расти быстрее чем R_d , то ток в дуговом промежутке будет увеличиваться, сопротивление R_d уменьшаться и произойдет новое зажигание дуги.

Таким образом, условие гашения дуги переменного тока можно сформулировать так: *если после прохождения тока через ноль электрическая прочность дугового промежутка в каждый заданный момент времени будет больше напряжения на нем, то дуга погаснет. Если же в какой-либо момент времени напряжение, приложенное к дуговому промежутку, станет выше электрической прочности промежутка, то процесс гашения дуги прекратится и дуга загорится вновь.*

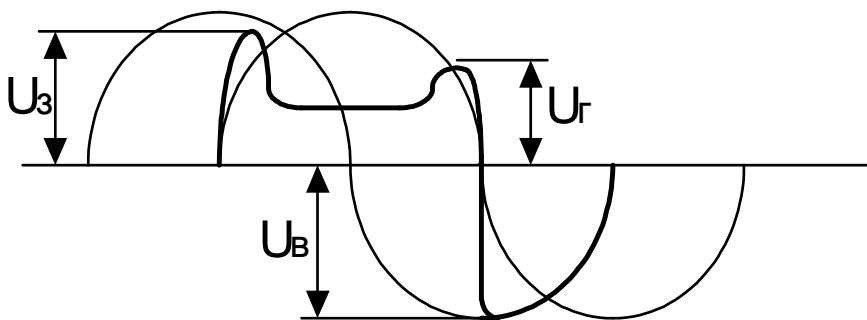


Рис.15

При погасании дуги напряжение на дуговом промежутке нарастает от величины напряжения гашения U_2 до мгновенного значения напряжения сети или эдс источника питания (Рис.15).

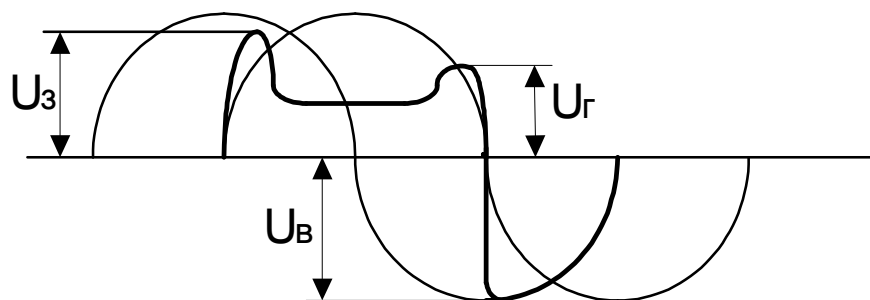
Процесс изменения напряжения на дуговом промежутке после прохождения тока через нуль называется восстановлением напряжения. Процесс

восстановления напряжения происходит за промежуток времени порядка десятка или сотен микросекунд. Эдс источни капитания, меняющаяся с частотой 50 Гц, можно считать постоянной за такой промежуток времени.

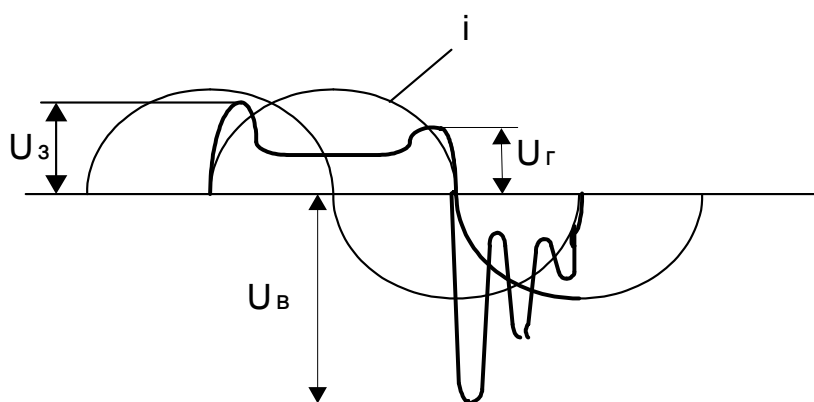
Мгновенное значение напряжения на дуговом промежутке, возникающее в процессе восстановления напряжения, называется восстанавливающимся напряжением U_e . После того как дуга погасла, восстанавливающееся напряжение стремится пробить дуговой промежуток, электрическая прочность которого восстанавливается. Дуга окончательно погаснет в том случае,

если в любой момент времени электрическая прочность дугового промежутка будет больше восстанавливающегося напряжения.

Восстановление напряжения на дуговом промежутке при индуктивной нагрузке может происходить аperiodически или носить колебательный характер.



а) Аperiodический процесс восстановления



б) Колебательный процесс восстановления

Рис.16

В первом случае напряжение на промежутке $U_в$ не может быть больше амплитуды эдс источника питания E_m . Во втором случае напряжение практически не превышает двойной амплитуды эдс, т.е. $U_{в\max} \leq 2E_m$. Частота и амплитуда колебаний переходного процесса зависит от параметров цепи и источника питания.

При отключении цепи, обладающей только активным сопротивлением, ток и эдс проходят через ноль одновременно, поэтому восстанавливающееся напряжение будет равно нулю. Поэтому отключение активной нагрузки происходит легче, чем индуктивной.

Гашение дуги переменного тока повышенной частоты имеет некоторые особенности.

При больших частотах частота колебательного процесса при восстановлении напряжения может иметь тот же порядок, что и частота тока. При этом уже нельзя считать эдс источника неизменной за время переходного процесса. Совпадение частот собственных колебаний и источника тока оказывает значительное влияние на изменение характера переходного процесса.

2.6. Способы гашения электрической дуги дуги.

Гашение дуги может быть достигнуто увеличением скорости деионизации дугового промежутка, уменьшением скорости восстановления напряжения, либо совместным использованием обоих этих факторов.

Ко всем дугогасительным устройствам предъявляются следующие требования:

- 1) время гашения дуги должно быть минимальным;
- 2) энергия, выделяемая дугой должна быть минимальной;
- 3) при гашении дуги не должно возникать опасных перенапряжений;

2.6.1. *Растягивание электрической дуги* приводит к повышению падения напряжения на дуговом промежутке за счет деионизации, происходящей в стволе дуги. Однако градиент напряжения (падение напряжения на единицу длины дуги) составляет небольшую величину - примерно 15 В/см. Поэтому гашение дуги только путем ее растягивания привело бы к увеличению габаритов отключающего аппарата. Обычно растягивание электрической дуги применяется лишь в низковольтных слаботочных аппаратах. В коммутационных аппаратах (например в контакторах.) растягивание дуги используется в совокупности с другими методами гашения дуги.

2.6.2. *Магнитное дутье.* Перемещение электрической дуги в воздушной среде приводит к интенсивной деионизации ствола дуги в связи с:

- 1) усилением охлаждения дуги,
- 2) возрастанием диффузии заряженных частиц из области горения дуги в окружающее пространство,
- 3) с повышением давления внутри дуги в результате уменьшения диаметра ее ствола.

Эффективность каждого из перечисленных факторов, увеличивающих градиент напряжения в дуге, возрастает с повышением скорости ее перемещения. Электрическая дуга перемещается под воздействием электродинамических сил, возникающих в результате взаимодействия дуги с внешним магнитным полем. Внешнее магнитное поле для перемещения электрической дуги в низковольтных аппаратах может быть получено:

- 1) при помощи электромагнитов с катушкой, включаемой последовательно с контактами, между которыми возникает электрическая дуга;
- 2) при помощи электромагнитов с катушкой, включаемой параллельно на напряжение сети;
- 3) при помощи постоянных магнитов.

Способ дугогашения с использованием внешнего магнитного поля называется магнитным дутьем. Исключительное распространение получила последовательная дугогасительная катушка. Основными достоинствами этого способа возбуждения магнитного поля гашения является надежность и независимость направления силы, действующей на дугу, от направления тока.

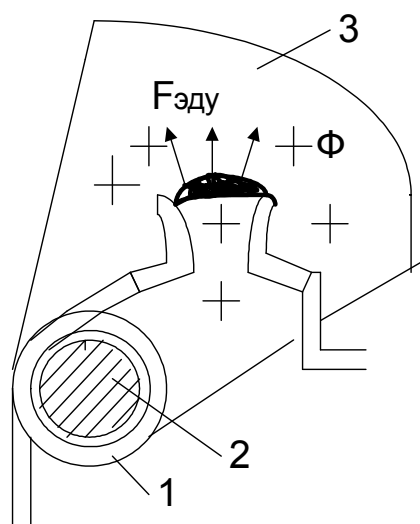


Рис.17.

Изменение направления тока в цепи вызывает и изменение направления поля, создаваемого катушкой. Направление силы в таком случае, действующей на дугу, остается неизменной.

2.6.4. *Гашение дуги в узких щелях.* Соприкосновение дуги с поверхностью твердого диэлектрика способствует усиленной рекомбинации заряженных частиц на его поверхности, а также интенсивному отводу тепла из области горения дуги, в связи с хорошим тепловым контактом, возникающим между дугой и диэлектриком.

Дугогасительные устройства, использующие этот принцип гашения дуги, представляют собой узкую щель, образованную двумя стенками из дугостойкого изоляционного материала. В щель дуга затягивается электродинамическими силами, увеличенными с помощью катушек магнитного дутья.

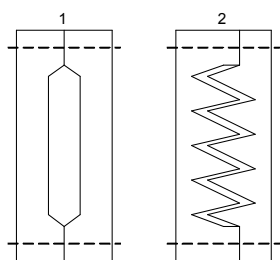


Рис.18.

В качестве материала для камеры обычно используется асбоцемент и керамика. Керамическая масса по сравнению с асбоцементом более устойчива к выгоранию от действия электрической дуги. Кроме того, поверхность ее глаже и потому сопротивление входу дуги в щель меньше, чем в камере из асбоцемента.

Дугогасительные устройства с узкой щелью используются в аппаратах как постоянного, так и переменного тока.

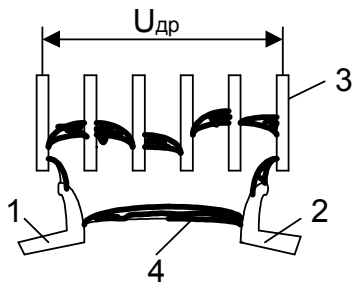


Рис.19

гашение. В дугогасительной решетке по мере расхождения контактов, дуга последовательно входит в промежутки между пластинами решетки. При этом напряжение на дуге возрастает приблизительно по линейному закону, а длительность горения дуги будет уменьшаться с возрастанием скорости расхождения контактов и числа пластин, приходящихся на единицу длины дуги.

На гашение дуги переменного тока в дугогасительной решетке в основном оказывают влияние процессы, происходящие у катода при прохождении тока через нуль. В этот момент времени околокатодное пространство мгновенно приобретает электрическую прочность порядка 150-250 В.

Дугогасительная решетка для гашения дуги переменного тока имеет значительно меньшее количество пластин, чем для дуги постоянного тока, так как в последней $U_g = 20-25$ В. При гашении дуги переменного тока действие дугогасительной решетки в 7-8 раз эффективнее, чем при гашении дуги постоянного тока. Поэтому дугогасительные решетки нашли более широкое применение в сетях переменного тока.

2.6.5. *Устройства для бездуговой коммутации.* Принцип бездуговой коммутации состоит в шунтировании главных контактов тиристорами в моменты вибрации контактов или их размыкания. Устройство, выполняющее эти функции, может иметь следующую схему. Основным элементом схемы управления тиристорами 2 и 3 является трансформатор тока 4. При замыкании контактов 1 и возникновении тока в главной цепи трансформатор тока 4 через диоды 5 и 6 подает отпирающий сигнал на управляющие электроды тиристоров 2 и 3. В момент размыкания контактов ток главной цепи переходит в цепь того из тиристоров, проводящее направление которого совпадает с полярностью тока в коммутируемой цепи. Прямое падение напряжения на открытом тиристоре, составляющее 1,5-2,0 В, надежно защищает контактную пару от дугового разряда.

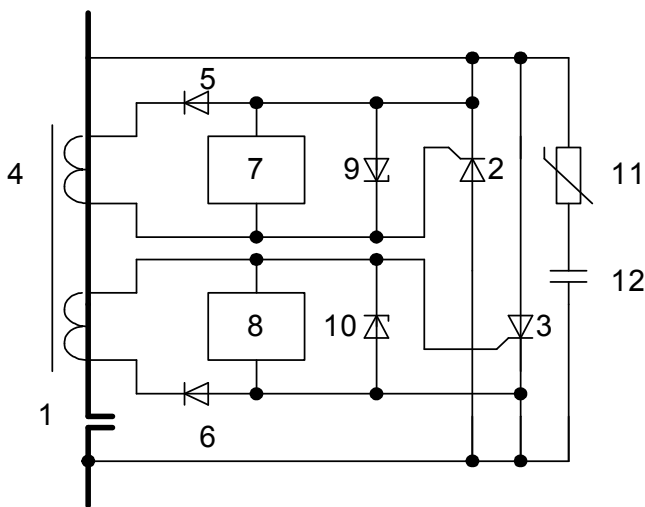


Рис.20

Полное отключение цепи происходит при переходе тока в тиристоре через нуль. В промежутках между коммутациями при любом токе нагрузки в пределах рабочих токов тиристоры находятся в открытом состоянии по цепи управления, но зашунтированы главными контактами.

Для предотвращения включения тиристоров при сквозных токах короткого замыкания, вызывающих отброс главных контактов, в устройстве применяется специальная схема защиты от токов короткого замыкания 7 и 8. При сквозных токах короткого замыкания, превышающих 10-ти кратный номинальный ток контактора,

схема защиты от к.з. срабатывает и шунтирует управляющие электроды тиристорov, предотвращая переход тока их цепи контактов в цепь тиристорov.

Стабилитроны 9 и 10 ограничивают напряжение на управляющих электродах тиристорov до допустимой величины. Цепь, состоящая из резистора 11 и конденсатора 12 служит для снижения скорости нарастания и амплитуды восстанавливающегося напряжения на контактах в моменты их размыкания, а также защищает тиристоры от кратковременных перенапряжению существующих в сети.

Глава 3. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.

3.1. Источники тепла в электрических аппаратах.

Источниками тепла в электрических аппаратах являются электрические и добавочные потери в токоведущих частях и потери в стали магнитопровода. Электрические потери возникают в результате протекания тока по активному сопротивлению токоведущих элементов аппаратов, например, в катушках, на переходном сопротивлении контактов, в токоподводящих шинах и в других элементах. Эти потери определяются произведением квадрата тока на сопротивление токоведущего элемента, т.е.

$$P = i^2 R, \quad \text{Вт} \quad (8)$$

Энергия, выделяющаяся в токоведущем элементе в результате этих потерь, будет равна

$$W = i^2 R dt, \quad \text{Дж} \quad (9)$$

На переменном токе в массивных токоведущих элементах возникают добавочные потери вследствие увеличения сопротивления проводника от поверхностного эффекта и эффекта близости. Увеличение сопротивления учитывается коэффициентом добавочных потерь

$$K_{\delta} = \frac{R_{\text{пер}}}{R_{\text{ном}}} \quad (10)$$

равный отношению активного сопротивления проводника переменному току $R_{\text{пер}}$ к сопротивлению проводника постоянному току $R_{\text{ном}}$. Тогда выражение (8) с учетом добавочных потерь можно записать так

$$W = K_{\delta} i^2 R dt, \quad \text{Дж} \quad (11)$$

Поверхностный эффект это явление вытеснения тока в проводнике под действием собственного магнитного поля.

Эффект близости это явление вытеснения тока в проводнике под действием магнитного поля соседних проводников с током.

В результате этих эффектов плотность тока в поверхностном слое проводника будет больше чем в среднем сечении.

Потери в стали в основном имеют место в электрических аппаратах переменного тока, а также в некоторых аппаратах постоянного тока, работа которых связана с большой частотой включений. Потери в стали обусловлены потерями на вихревые токи и на гистерезис и выделяются также в виде тепла.

3.2. Способы передачи тепла.

Существует три способа передачи тепла нагретым телом: теплопроводность, конвекция и лучеиспускание.

Теплопроводность - свойство тел передавать тепло от более нагретых мест к менее нагретым. Путем теплопроводности тепло передается через твердые, жидкие и газообразные тела.

Количество тепла dQ , проходящее в единицу времени dt через элементарную площадку dS от более нагретого участка тела к менее нагретому, пропорционально градиенту температуры $d\vartheta/dx$ в направлении, перпендикулярном площадке и зависит от теплопроводящих свойств материала, т.е.

$$dQ = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx} dS \cdot dt \quad (12)$$

где λ - коэффициент теплопроводности.

Знак (-) показывает, что передача тепла идет от мест более нагретых к менее нагретым.

Коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, проходящему через площадку в 1 м^2 изотермической поверхности в течение 1 с при градиенте температуры в $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$.

Конвекция. Нагретое тело, помещенное в газ или жидкость, отдает свое тепло частичкам газа или жидкости, которые, нагреваясь, становятся легче и поднимаются вверх, а на их место поступают более холодные частички. Интенсивность охлаждения зависит от скорости движения частиц охлаждающей среды. Если движение частиц охлаждающей среды создается только за счет нагрева их у поверхности горячего тела, то такая конвекция называется естественной конвекцией.

Если движение частиц создается принудительно, например, при помощи вентиляторов, насосов, то такая конвекция называется искусственной. Количество тепла, отдаваемого поверхностью нагретого тела в единицу времени за счет конвекции, определяют по формуле

$$Q = K_{\text{ток}} (\theta_1 - \theta_0) \quad (13)$$

где $K_{\text{ток}}$ - коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/^\circ\text{C} \cdot \text{см}^2$

θ_1 - температура нагретой поверхности, $^\circ\text{C}$

θ_0 - температура охлаждающей среды,

S - площадь поверхности охлаждения, м^2 .

Лучеиспускание. Это процесс отдачи тепла, при котором тепловая энергия, превращаясь в лучистую, передается от нагретого тела в окружающую среду. Источником лучистой энергии является любое тело, у которого температура отлична от абсолютного нуля. Поглощение лучистой энергии телом зависит от длины волны и состояния его поверхности. Тело, поверхность которого поглощает все падающие на нее лучи, называется абсолютно черным телом. При нагревании оно обладает максимальной способностью излучения энергии. Излучательная способность других тел сравнивается с абсолютно черным телом как с эталоном. Количество тепла, отдаваемого при излучении с поверхности нагретого тела в 1с, может быть определено по формуле

$$Q = K_{\text{мол}} \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_0}{100} \right)^4 \right] S \quad (14)$$

где $K_{\text{мол}}$ - коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, $\text{Вт}/^\circ\text{C}^4 \cdot \text{м}^2$.

Отдача тепла нагретым телом обычно происходит одновременно путем теплопроводности, конвекции и лучеиспускания. При этом трудно определить, какая часть тепла передается в окружающую среду тем или иным способом. В практических расчетах количество тепла, отводимого с поверхности нагретого тела всеми видами теплоотдачи можно определить по формуле Ньютона

$$Q = K_{\text{мо}} (\theta_1 - \theta_0) S \quad (15)$$

где $K_{\text{то}}$ - эквивалентный коэффициент теплоотдачи, учитывающий отдачу тепла всеми способами.

Эквивалентный коэффициент теплоотдачи при небольших температурах изменяется незначительно. Поэтому при приближенных расчетах коэффициент теплоотдачи можно принимать постоянным.

3.3. Допустимые температуры нагрева электрических аппаратов.

Предельной допустимой температурой нагрева проводов и аппаратов называется такая температура, при которой гарантируется надежная длительная их работа. Предельной температурой изоляции и проводов с изоляцией называется такая наибольшая температура, воздействию которой изоляция может подвергаться длительное время без понижения ее электрических и механических свойств. Для длительного установившегося теплового процесса нормы допустимого нагрева изоляции и проводов с изоляцией предусмотрены ГОСТами. Согласно ГОСТ все виды изоляционных материалов разделены на семь классов нагревостойкости, каждому из которых соответствует допустимая температура нагрева.

Классы нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Допустимая температура нагрева, °C	90	110	120	140	160	180	>180

Температура окружающей среды по ГОСТ равна 40 °C.

3.4. Нагревание и охлаждение проводника в продолжительном режиме.

Рассмотрим проводник с постоянным по длине сечением. Если при протекании по проводнику тока мощность потерь равна P , то за время dt в нем выделится энергия

$$P \cdot dt = K_o(I^2 \cdot R)dt \quad (16)$$

Часть этой энергии идет на нагревание проводника, а другая часть отводится в окружающую среду. Уравнение теплового баланса проводника будет иметь вид

$$P \cdot dt = cG \cdot d\tau + K_{mo}S \cdot \tau \cdot dt \quad (17)$$

Здесь $cG \cdot d\tau$ - энергия, затрачиваемая на нагревание проводника,
 $K_{mo}S \cdot \tau \cdot dt$ - энергия, рассеиваемая в окружающую среду.

Процесс нагревания проводника характеризуется зависимостью превышения температуры проводника от времени $\tau = f(t)$.

Решая уравнение (17) относительно τ , получим

$$\tau = \frac{P}{K_{mo}S} \left(1 - e^{-\frac{K_{mo}S \cdot t}{cG}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{K_{mo}S \cdot t}{cG}} \quad (18)$$

$$\text{Введем обозначения } T = \frac{cG}{K_{mo}S}, \quad \tau_y = \frac{P}{K_{mo}S} \quad (19)$$

и подставим их в (18), получим уравнение, определяющее изменение температуры проводника во времени

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (20)$$

Если в начальный момент температура окружающей среды равна нулю, т.е. $\tau_0 = 0$, то

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (21)$$

Уравнение (20) представляет собой экспоненциальную кривую 1, начинающуюся в точке τ_0 .

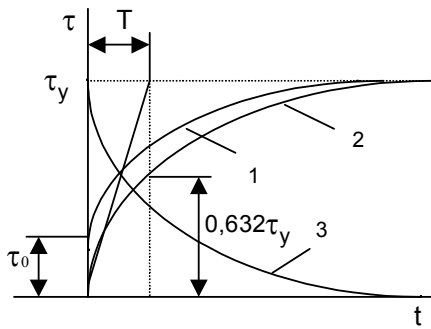


Рис.21

Величина $T = \frac{cG}{K_{mo}S}$ называется постоянной времени, она представляет собой отношение тепловоспринимающей способности тела (cG) к теплоотдающей способности ($K_{mo}S$). При нагревании проводника без отвода тепла в окружающую среду уравнение теплового баланса будет $Pdt = cGd\tau$,

отсюда
$$d\tau = \frac{P}{cG} dt \quad (23)$$

Интегрируя, получим

$$\tau = \frac{Pt}{cG}.$$

Учитывая, что $\frac{cG}{K_{mo}S} = T$, а $P = K_{mo}S\tau_y$, то окончательно получим

$$\tau = \frac{\tau_y t}{T} \quad (24)$$

Таким образом, при $K_{mo} = 0$ нагрев проводника идет по касательной к кривой $\tau = f(t)$ в начале координат. При $t = T$ $\tau = \tau_y$.

Постоянную времени T можно представить как время, в течение которого проводник достиг бы установившейся температуры τ_y , если бы отдачи тепла в окружающую среду не было.

В реальных условиях, при $\tau_0 = 0$ и наличии теплоотдачи, температура проводника за время T повысится до значения

$$\tau = \tau_y(1 - e^{-1}) = 0,632\tau_y \quad (25)$$

Это соотношение используют для определения величины постоянной времени, если кривая нагрева известна и получена опытным путем. На кривой нагрева находится точка $\tau = 0,632\tau_y$ и величина T определяется отрезком, лежащим между началом координат и перпендикуляром, опущенным на ось абсцисс из этой точки. Величина постоянной времени нагрева может быть определена величиной отрезка, на прямой установившегося превышения температуры, отсекаемого касательной, проведенной из начала координат к кривой нагрева.

Процесс охлаждения проводника начнется в тот момент, когда по проводнику перестанет протекать ток. Зависимость $\tau = f(t)$ для процесса охлаждения можно получить из уравнения теплового баланса, приняв в нем $Pdt=0$. Тогда уравнение теплового баланса будет иметь вид

$$0 = cGd\tau + K_{mo}Sdt \quad (26)$$

Решение этого уравнения будет

$$\tau = \tau_{no} e^{-\frac{t}{T}} \quad (27)$$

Уравнение (21) описывает экспоненциальную кривую 2 для случая, когда начальная температура проводника равна температуре окружающей среды $\tau_0 = 0$.

Физический смысл величин τ_y и T определяется из анализа уравнений (20) и (21). При $t = \infty$

$$\tau = \frac{P}{K_{mo}S} = \tau_y \quad (22)$$

Следовательно, τ_y - это значение установившегося превышения температуры проводника над температурой окружающей среды.

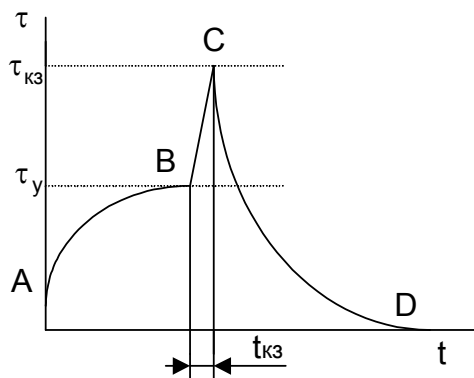
Здесь $\tau_{но}$ - начальное превышение температуры для процесса охлаждения. Если $\tau_{но} = \tau_y$, то кривая охлаждения (кривая 3 на рис.21) будет представлять собой зеркальное отражение кривой нагрева (кривая 2).

3.5. Нагрев проводника при токе короткого замыкания.

При нагреве проводников токами короткого замыкания почти не происходит отдачи тепла в окружающую среду из-за кратковременности их протекания. Почти вся энергия выделяемая в проводнике, идет на его нагрев. В этом случае энергетический баланс проводника представляется уравнением

$$K_0 I^2 R dt = c G d\tau \quad (28)$$

Кривая изменения температуры проводника имеет вид на рис.22. В пределах нормального режима работы нагрев изменяется по экспоненте AB , а с момента возникновения короткого замыкания (точка B) по линии BC до момента отключения к.з. (точка C).



Охлаждение проводника происходит по линии CD . Ввиду того, что температура проводника при к.з. может достигать больших значений, необходимо учитывать изменение сопротивления и удельной теплоемкости от температуры. При расчете процессов нагрева принимают линейную зависимость R и c от температуры

$$R = \rho_0 (1 + \alpha \tau) \frac{l}{g}; \quad c = c_0 (1 + \beta \tau) \quad (29)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление проводника при 0°C , Ом.м;
 α - температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$;

Рис.22

c_0 - удельная

теплоемкость при 0°C

β - температурный коэффициент теплоемкости, $1/^\circ\text{C}$;

g - площадь сечения проводника

Выразим вес проводника G через плотность γ , сечение g и длину проводника l

$$G = \gamma \cdot g \cdot l \quad (30)$$

Подставляя (29), (30) в (28) и упрощая выражение, получим

$$\frac{I^2}{g^2} dt = \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \cdot \tau)}{K_0 \rho_0 (1 + \alpha \tau)} d\tau \quad (31)$$

После интегрирования правой и левой части уравнения (31) получаем

$$\int_0^{t_{кз}} \frac{I^2}{g^2} dt = \int_{\tau_y}^{\tau_3} \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \tau)}{K_0 \rho_0 (1 + \alpha \tau)} d\tau \quad (32)$$

где $t_{кз}$ - длительность короткого замыкания,

τ_y - температура проводника до начала короткого замыкания,

$\tau_{кз}$ - температура проводника в конце процесса к.з..

Интеграл левой части уравнения (32) является мерой теплового воздействия тока короткого замыкания на токопровод за время короткого замыкания. Если принять, что действующее значение тока короткого замыкания не меняется, то интеграл левой части уравнения примет вид

$$\frac{I^2}{g^2} t_{кз} = j^2 t_{кз} \quad (33)$$

Так как температура проводника в конце процесса короткого замыкания строго ограничена, то каждый аппарат может быть охарактеризован так называемой термической устойчивостью.

Под термической устойчивостью аппарата понимается его способность выдерживать без повреждений и перегрева свыше норм термическое действие токов короткого замыкания определенной длительности.

Термическая устойчивость аппарата характеризуется допустимым током термической устойчивости I_{Δ} , соответствующим некоторому времени t_{Δ} , или произведением $I_{\Delta}^2 t_{\Delta}$. Это произведение характеризует определенное количество тепла, которое выделяется в аппарате при протекании тока I_{Δ} в течении времени t_{Δ} . Для обеспечения термической устойчивости аппарата необходимо, чтобы тепло, выделяемое в нем при протекании тока короткого замыкания, не превышало допустимых значений.

$$I^2 t_{кз} \leq I_{\Delta}^2 t_{\Delta} \quad (34)$$

Длительность протекания тока термической устойчивости задается либо собственным временем срабатывания аппарата, либо определенным временем - обычно секунда или полсекунды.

3.6. Нагрев проводника в кратковременном режиме.

Кратковременным называется такой режим, при котором за период работы проводника он не успевает нагреваться до допустимой температуры, а за время паузы он охлаждается до температуры окружающей среды.

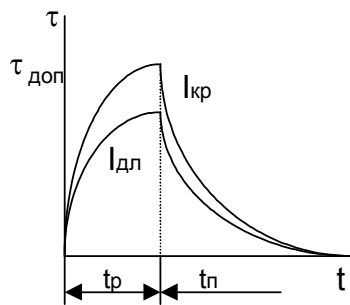


Рис.23

Если $I_{кр} = I_{\Delta}$, то за $t = t_p$ $\tau_{кр} < \tau_{\Delta}$;

если $I_{кр} = p I_{\Delta}$, то за $t = t_p$ $\tau_{кр} = \tau_{\Delta}$.

где $I_{кр}$ - ток кратковременного режима,

I_{Δ} - ток длительного режима,

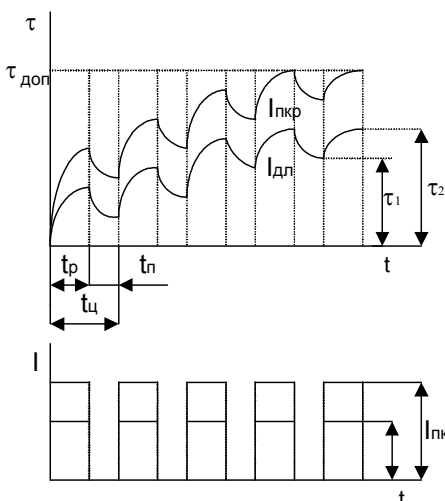
$\tau_{кр}$ - температура проводника в кратковременном

режиме,

p - коэффициент перегрузки.

$$p = \frac{1}{(1 - e^{-\frac{t_p}{T}})^{0.5}} \quad (35)$$

3.7. Нагрев проводника в повторно-кратковременном режиме.



Повторно-кратковременным режимом называется такой режим, при котором за время работы проводника (аппарата) он не успевает нагреваться до допустимой температуры, а за время паузы не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Если $I_{пкр} = I_{\Delta}$, то за $t = t_p$ $T_{пкр} < T_{\Delta}$,

если $I_{пкр} = p I_{\Delta}$, то за $t = t_p$ $T_{пкр} = T_{\Delta}$.

$I_{пкр}$ - ток повторно-кратковременного режима,

$T_{пкр}$ - температура проводника в повторно-кратковременном режиме.

$$p = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_u \cdot 100\%}{T \cdot ПВ\%}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}} \quad (36)$$

Рис.24

где $ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_u} \cdot 100 = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100$

Глава 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ.

4.1. Общие сведения

Обтекаемый ток i проводник длиной l , расположенный в магнитном поле с индукцией B испытывает механическую силу (рис.25)

$$F = Bli \sin \beta, \quad (37)$$

где β - угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

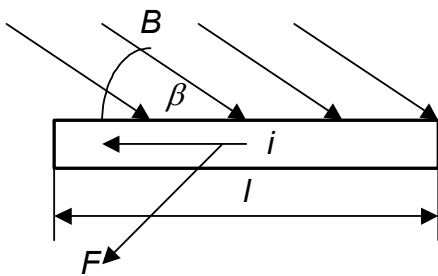


Рис.25

Для системы из нескольких проводников, обтекаемых током, можно всегда представить, что любой из этих проводников находится в магнитном поле, созданном токами других проводников и взаимодействует с этим полем. Точка между проводниками охваченными общим магнитным потоком, всегда возникают механические силы. Эти силы называются электродинамическими (ЭДУ). Направление действия силы определяется правилом левой руки.

Электродинамические силы в электрических аппаратах определяют их электродинамическую стойкость.

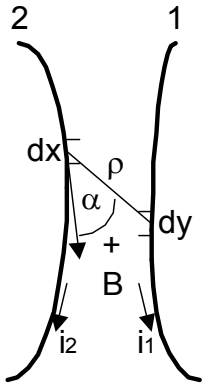
Электродинамической стойкостью аппарата называется способность противостоять силам, возникающим между токоведущими элементами аппарата при прохождении по ним токов короткого замыкания.

4.2. Методы расчета ЭДУ.

Расчет ЭДУ ведется обычно либо на основании закона взаимодействия проводника с током и магнитным полем (закон Ампера $dF = i \cdot [d\vec{B} \times d\vec{l}]$), либо по изменению запаса магнитной энергии системы.

1-й метод. Возьмем систему из двух произвольно расположенных проводников 1 и 2, обтекаемых токами i_1 и i_2 (Рис.26). Напряженность магнитного поля, создаваемого элементом dy проводника 2 в месте расположения элемента dx проводника 1, будет равна

$$dH_{dx} = \frac{i_2 dy}{4\pi r^2} \sin \alpha \quad (38)$$



где α - угол между вектором ρ и направлением тока по элементу dy . Весь проводник 2 создает в месте расположения элемента dx напряженность магнитного поля, равную

$$H_{dx} = \int_{l_2} dH_{dx} = \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{4\pi \cdot \rho^2} \sin \alpha \quad (39)$$

Учитывая, что $B = \mu_0 \cdot H_{dx}$ элементарная сила, действующая на элемент dx , обтекаемый током i_1 будет равна

$$dF_{dx} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot H_{dx} \cdot i_1 dx \cdot \sin \beta = i_1 dx \cdot \sin \beta \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha \quad (40)$$

Рис.26.

где β - угол между вектором магнитной индукции B и вектором тока i_1 ,

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха.

Полную силу взаимодействия между проводниками 1 и 2 получим после интегрирования (40) по всей длине проводника 1,

$$F = \int_{l_1} dF_{dx} = \int_{l_1} i_1 dx \cdot \sin \beta \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_2} \frac{i_2 dy}{\rho^2} \sin \alpha \quad (41)$$

Считая токи i_1 и i_2 неизменными по всей длине проводников последнее уравнение можно переписать в виде произведения

$$F = (i_1 i_2 \frac{\mu_0}{4\pi}) (\int_{l_1} dx \sin \beta \cdot \int_{l_2} \frac{dy}{\rho^2} \sin \alpha) \quad (42)$$

Первый член этого выражения зависит только от значений токов. Второй член зависит только от взаимного геометрического расположения проводников и представляет собой безразмерную величину. Эту величину часто называют коэффициентом контура и обозначают буквой C .

Тогда
$$F = C \cdot i_1 i_2 \frac{\mu_0}{4\pi} \quad (43)$$

Учитывая, что $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, то тогда
$$F = C \cdot i_1 i_2 10^{-7}, \text{ н} \quad (44)$$

т.е. сила взаимодействия между проводниками, обтекаемыми токами i_1 и i_2 пропорциональна произведению этих токов и зависит от геометрии проводников и их взаимного расположения.

2-й метод. Электромагнитное поле вокруг проводников и контуров с током обладает определенным запасом энергии. Электромагнитная энергия контура, обтекаемого током i равна

$$W = L \frac{i^2}{2} \quad (45)$$

Электромагнитная энергия двух контуров, обтекаемых токами i_1 и i_2

$$W = L_1 \frac{i_1^2}{2} + L_2 \frac{i_2^2}{2} + M \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (46)$$

где L_1 и L_2 - индуктивности контуров;

M - взаимная индуктивность контуров.

Всякая деформация контура или изменение взаиморасположения контуров приводит к изменению запаса магнитной энергии. При этом работа сил в любой системе равна изменению запаса электромагнитной энергии этой системы.

$$F dx = dW \quad (47)$$

Здесь dW - изменение запаса магнитной энергии системы при деформации в направлении x под действием силы F .

На этом законе и основан второй метод определения ЭДУ в контурах. ЭДУ в контуре или между контурами, действующее в направлении x , равно скорости изменения запаса энергии системы при деформации ее в том же направлении

$$F_x = dW/dx \quad (48)$$

Согласно этому, ЭДУ в контуре, обтекаемом током

$$F_x = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{dx}$$

где dx - деформация контура по радиусу (если $dx=0$, то и $dL=0$).

ЭДУ между двумя взаимосвязанными контурами с токами i_1 и i_2 будет равно

$$F_x = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dx} + \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_2}{dx} + i_1 i_2 \frac{dM}{dx} \quad (49)$$

4.3. Расчет ЭДУ, действующих на различные элементы токоведущей цепи.

4.3.1. ЭДУ между параллельными проводниками. Сила взаимодействия между двумя

проводниками, расположенными параллельно и обтекаемыми токами i_1 и i_2 определяется следующим образом:

а) если один проводник имеет бесконечную длину, а второй имеет длину l и расположен симметрично относительно первого, то

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \quad (50)$$

б) если оба проводника имеют конечную длину, т.е. $l_1=l_2=l$, то

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right) \quad (51)$$

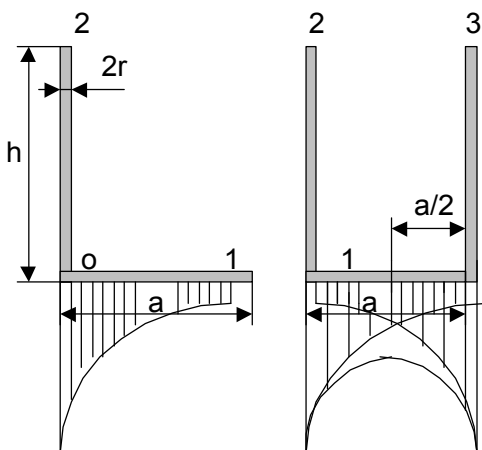
Приведенные формулы справедливы для проводников круглого и трубчатого сечений, для которых можно считать, что ток протекает по их геометрической оси. Для проводников прямоугольного сечения (шин)

вводится поправочный коэффициент - коэффициент формы K_ϕ , зависящий от

размеров проводников и расстояний между ними

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 K_\phi \frac{2l}{a} \quad (52)$$

4.3.2. ЭДУ между взаимно перпендикулярными проводниками. Такое расположение проводников встречается в распределительных шкафах, в присоединительных токоподводящих шинах и др.



а) При $h = \infty$ $F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}$, (53)

б) при h конечном

$$F = 10^{-7} i^2 \ln \frac{\frac{a}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \quad (54)$$

Момент сил относительно точки O (Рис. 28).

$$M = 10^{-7} i^2 (a - r),$$

$$M = 10^{-7} i^2 a \left(\ln \frac{a - r}{r} + r \right) \quad (55)$$

Рис.28.

4.3.3. ЭДУ в кольцевом витке и между кольцевыми витками. В кольцевом витке с током i возникают радиальные силы f_r , стремящиеся увеличить его периметр, то-есть разорвать виток:

а) для витка круглого сечения при $R \gg r$

$$F_R = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) \quad (56)$$

где R - радиус витка,

r - радиус провода;

б) для витка прямоугольного сечения

$$F_R = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} + 0,5 \right) \quad (57)$$

Эти формулы применимы не только к одному витку, но и к обмоткам с любым числом витков, занимающим данное сечение. В катушках аппаратов, кроме сил, действующих внутри каждого витка, будут существовать ЭДУ между витками.

При одинаковом направлении тока в витках между витками возникает сила притяжения F , которую можно представить как результирующую двух сил F_x и F_y .

F_x - сила, стремящаяся притянуть витки друг к другу,

F_y - сила, стремящаяся один виток, а именно виток с меньшим диаметром (при одинаково направленных токах) растянуть, а другой виток, большего диаметра - сжать.

Таким образом, в одном из витков сила F_x будет складываться с силой F_r , а в другом вычитаться из нее. Силы F_x и

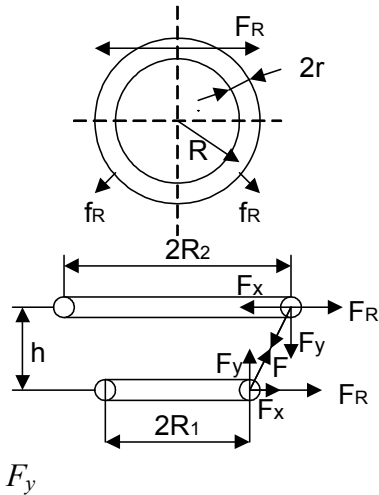


Рис.29.

зависят от расстояния между витками.

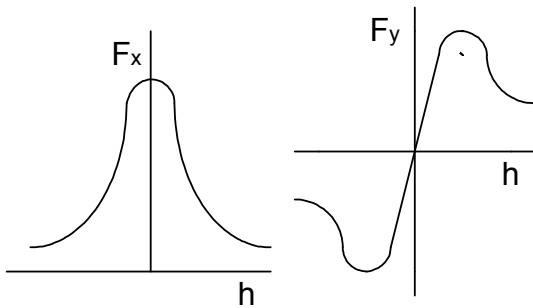


Рис.30

$$F_y \approx 10^{-7} 4\pi \cdot i_1 i_2 \frac{R_1 h}{h^2 + c^2} \quad (58)$$

$$F_x \approx 10^{-7} 4\pi \cdot i_1 i_2 \frac{R_1 c}{h^2 + c^2} \quad (59)$$

$$c = R_2 - R_1$$

4.3.4. ЭДУ в проводниках переменного сечения. В проводнике силы взаимодействия отдельных нитей тока с собственным магнитным полем проводника направлены перпендикулярно линиям тока. При неизменном сечении проводника все нити тока параллельны и силы не имеют осевой составляющей (в цилиндрическом проводнике они направлены по радиусу).

При изменении сечения проводника линии тока искривляются и, кроме поперечной силы F_r , появляется продольная составляющая F_l , стремящаяся разорвать проводник в узком сечении. Эта сила всегда направлена в сторону большего сечения проводника и равна

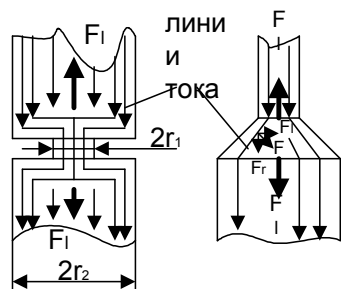


Рис.31

$$F_l = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (60)$$

4.3.5. ЭДУ между проводником с током и ферромагнитной массой. Вблизи ферромагнитной массы магнитное поле вокруг проводника с током искажается, магнитные силовые линии стремятся замкнуться на массе. В

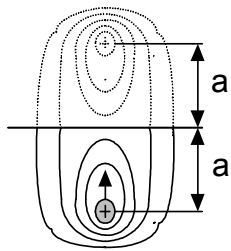


Рис 32

результате этого возникают силы, стремящиеся притянуть проводник к этой массе. Значение силы притяжения может быть определено из следующих соображений.

Заменим действие ферромагнитной массы вторым проводником с током того же направления, расположенным на таком же расстоянии от границы раздела сред. Картина поля при этом не нарушится, так как

одновременно с удвоением длины магнитной силовой линии удвоилась и магнитодвижущая сила, то есть такая замена вполне правомерна (рис.32).

Сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками подсчитываются (51) и (52). Только в данном случае вместо расстояния "a" надо брать "2a", т.е

$$F = 10^{-7} i^2 \frac{l}{a} \quad (58)$$

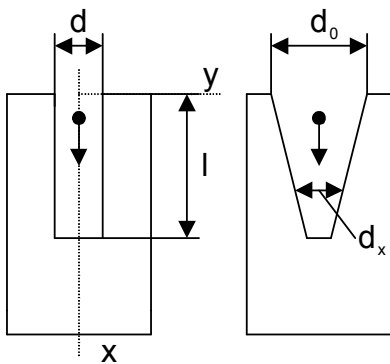


Рис.33

Если проводник с током находится в щели, образованной стенками из ферромагнитной массы, то электродинамические силы будут отталкивать проводник от границы раздела воздуха и ферромагнитной массы, то есть проводник будет затягиваться в щель. Сила, действующая на проводник в этом случае определяется выражением

$$F = 6,3 \cdot 10^{-7} i^2 \frac{l}{\delta_x} \quad (59)$$

Здесь l - длина щели, δ_x - ширина щели в месте расположения

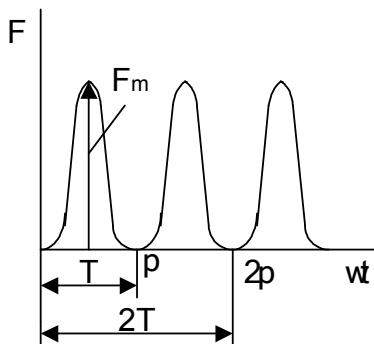


Рис.34.

проводника. В щели постоянного сечения сила, затягивающая проводник в глубь, будет неизменной, а в щели переменного сечения - переменной, возрастающей по мере сужения щели. Этот случай используется для гашения электрической дуги в дугогасительных решетках.

4.3.6. ЭДУ при переменном однофазном токе.

Рассмотрим силы, действующие между параллельными проводниками. Согласно выражения (51) для этого случая ЭДУ будет равно

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a}$$

Для конкретной системы можно положить, что при $i_1 = i_2$

$$\text{и } 10^{-7} \frac{2l}{a} = c_1, \text{ то } f = c_1 i^2.$$

На переменном токе $i = I_m \sin \omega t$, тогда сила будет равна

$$f = c_1 I_m^2 \sin^2 \omega t = c_1 I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad (60)$$

Отсюда следует, что ЭДУ на переменном токе состоит из двух составляющих - постоянной $c_1 \frac{I_m^2}{2}$ и переменной $c_1 \frac{I_m^2}{2} \cos 2\omega t$. Причем переменная составляющая ЭДУ пульсирует с двойной частотой сети по косинусоидальному закону и дважды за период изменяется по величине от максимального значения $f = c_1 I_m^2$ до нуля. В расчетах учитывается максимальное значение силы

$$F_m = c_1 I_m^2 = 2c_1 I^2, \quad \text{где } I_m = \sqrt{2}I.$$

Отсюда видно, что при переменном однофазном токе максимальное значение ЭДУ при одном и том же токе в два раза больше чем на постоянном. Однако в отличие от постоянного тока, при котором максимальное значение тока короткого замыкания равно его установившемуся значению $I_{уст}$ при $R=const$, при переменном токе в зависимости от момента к.з. первая амплитуда ударного тока $i_{уд.макс}$ может существенно превосходить амплитудное значение установившегося тока к.з.

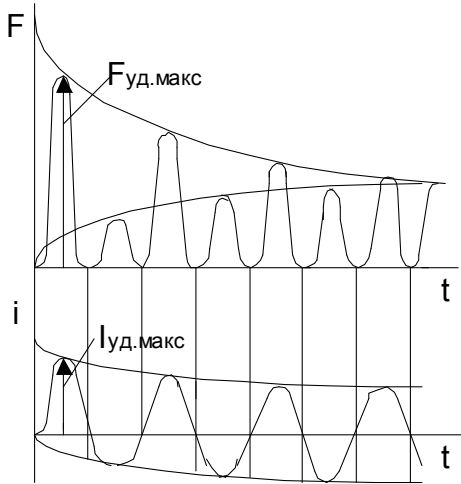


Рис.35.

Случай, когда проводники расположены в одной плоскости на равном расстоянии друг от друга (рис.35). Проводник 1 будет взаимодействовать с проводниками 2 и 3. Пусть ЭДУ между проводниками 1 и 2 равно F_{12} , а между проводниками 1 и 3 - F_{13} . Токи в фазах раны. Тогда полная сила, действующая на проводник 1, будет

$$f = F_{12}i_1i_2 + F_{13}i_1i_3 = 0,25[(F_{13} - F_{12})\sqrt{3} \sin 2\omega t - (F_{13} + F_{12})(1 - \cos 2\omega t)]2I^2 \quad (66)$$

В отличие от однофазного тока при 3-х фазном токе сила меняется не только во времени, но и по знаку. При положительных значениях $\sin 2\omega t$ и $\cos 2\omega t$ получим силу, притягивающую проводник 1 к двум другим проводникам.

При отрицательных значениях \sin и \cos получим силу, отталкивающую проводник 1 от двух других.

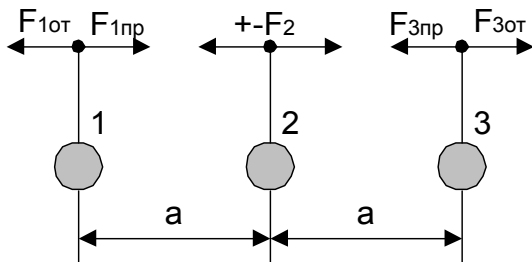


Рис.36.

Так как расстояние между проводниками одинаково, то $F_{13}=0,5F_{12}$ и тогда в установившемся режиме максимальная притягивающая сила

$$F_{1пр} = 0,055F_{12}2I^2 = 0,11F_{12}I^2 \quad (67)$$

максимальная отталкивающая сила

$$F_{1от} = 0,805F_{12}2I^2 = 1,61F_{12}I^2 \quad (68)$$

ЭДУ, действующие на проводник 3 будут аналогичными, а на проводник 2

$$F_2 = \pm 0,87F_{12}2I^2 = 1,74F_{12}I^2 \quad (69)$$

С учетом переходной составляющей, возникающей в момент к.з. максимальные ЭДУ будут большими, чем по вышеприведенным формулам.

В момент возникновения к.з.

$$F_{1отmax} = 6,48F_{12}I^2 \quad \text{при } \varphi = -15^\circ$$

$$F_{1пр} = 0$$

$$F_{1прmax} = 0,468F_{12}I^2 \quad \text{при } \varphi = -75^\circ$$

$$F_{1от} = 0,75F_{12}I^2$$

Глава 5. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

5.1. Общие сведения.

Электромагнитные механизмы нашли широкое применение в электроаппаратостроении и как элементы привода контактной системы, например, контакторы, пускатели, реле и т.п. и как устройства, создающие электромагнитные усилия, например, удерживающие электромагниты, муфты сцепления, тормозы и др.

Составной частью электромагнитного механизма (ЭММ) является магнитная цепь (м.ц.), которая служит для усиления и направления магнитного потока.

Магнитной цепью называется совокупность ферромагнитных деталей и немагнитных промежутков между ними, через которые замыкается магнитный поток, создаваемый магнитодвижущей силой катушки или постоянного магнита.

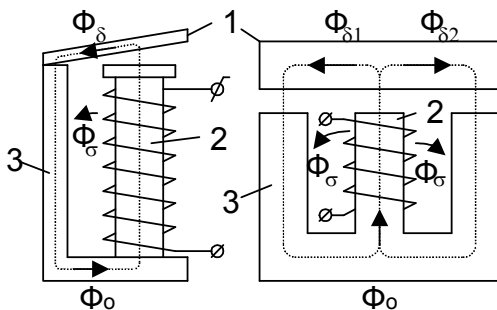


Рис.37.

Магнитные цепи ЭММ бывают неразветвленные и разветвленные и содержат следующие основные элементы. Подвижная часть магнитной цепи называется якорем 1. Часть м.ц., на которой расположена намагничивающая обмотка, называется сердечником 2. Часть м.ц., соединяющая сердечник с якорем называется ярмом 3. Намагничивающая обмотка создает м.д.с., под действием которой возбуждается магнитный поток Φ . Этот поток замыкается как через зазор, так и

между другими частями магнитной цепи, имеющими

различные магнитные потенциалы.

Воздушный зазор δ , меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим зазором. Соответственно поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим потоком Φ_δ . Все остальные потоки в магнитной цепи называются потоками рассеяния Φ_s . Поток в основании или в сердечнике равен

$$\Phi_0 = \Phi_\delta + \Phi_s \quad (70)$$

По конструкции ЭММ можно свести к нескольким основным группам (Рис.36.): с внешним притягиваемым якорем а);

с втяжным якорем б);

с поперечно движущимся якорем в).

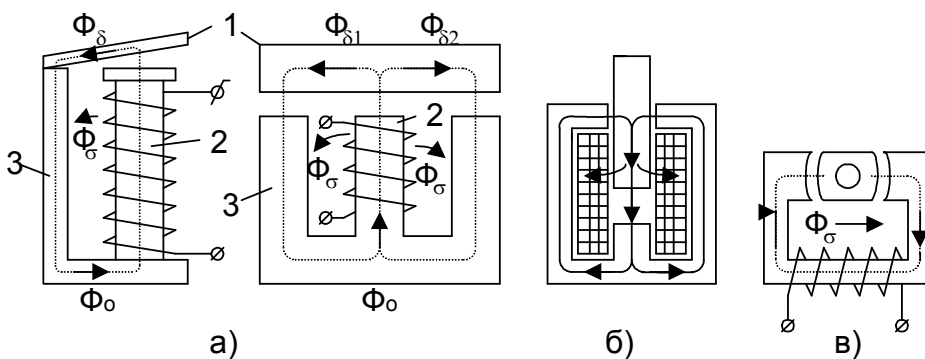


Рис.38 Шихтовка сердечника

По роду тока м.ц. бывают постоянного и переменного тока. Отличительной особенностью м.ц. переменного тока является шихтованный из листов электротехнической стали сердечник и наличие короткозамкнутого экрана.

Электромагниты постоянного тока, позволяет уменьшить влияние потерь в стали от вихревых токов и гистерезиса на работу ЭММ, а к.з. экран уменьшает вибрацию якоря.

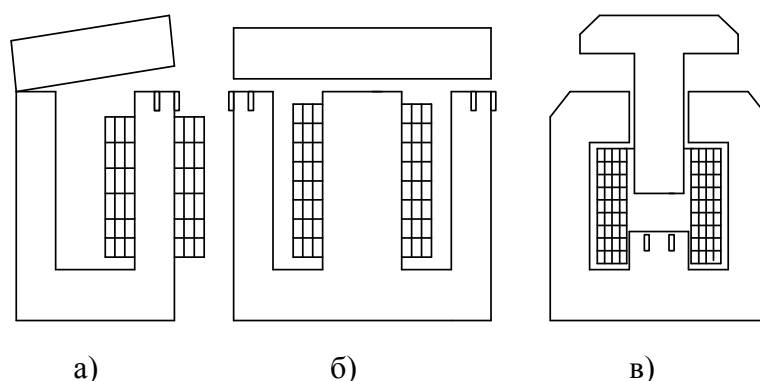


Рис.39. Электромагниты переменного тока.

5.2. Основные законы магнитной цепи.

Задачей расчета магнитной цепи является либо определение намагничивающей силы (н.с.) катушки, необходимой для создания рабочего потока заданной величины (прямая задача), либо определение рабочего потока по известной н.с. катушки (обратная задача). Расчет магнитных цепей базируется на основных законах магнитной цепи. Их можно выразить исходя из формальной аналогии с электрическими цепями следующим образом.

Закон полного тока. Сумма магнитодвижущих сил, действующих в замкнутом контуре равна полному току, охватываемому этим контуром

$$\Sigma(Iw) = \oint Hdl \quad (71)$$

Закон Ома. Магнитный поток Φ равен разности магнитных потенциалов U_m на каком-либо участке магнитной цепи, помноженной на магнитную проводимость этого участка G_m

$$\Phi = U_m G_m \text{ или } \Phi = U_m / R_m \quad (72)$$

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи из ферромагнитного

материала равно
$$R_m = \frac{1}{\mu S} = \frac{l}{G_m}, \quad 1/\Gamma \quad (73)$$

где l - длина участка, м

S - площадь сечения участка магнитопровода, м²

μ - магнитная проницаемость материала, Г/м

G_m - магнитная проводимость участка магнитопровода, Г

$$G_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu S}{l} \quad (74)$$

Если размеры магнитопровода неизменны, то есть $l=const$ и $S=const$, то магнитная проводимость будет определяться магнитной проницаемостью материала участка, то есть

$$G_m \equiv \mu. \text{ Но так как } \mu = \frac{B}{H} \text{ следовательно } G_m = f\left(\frac{B}{H}\right).$$

Отсюда следует, что магнитное сопротивление и магнитная проводимость являются сложной нелинейной функцией индукции. Зависимость относительной магнитной

проницаемости $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, а следовательно и магнитной проводимости, от величины напряженности для магнитного материала имеет следующий вид

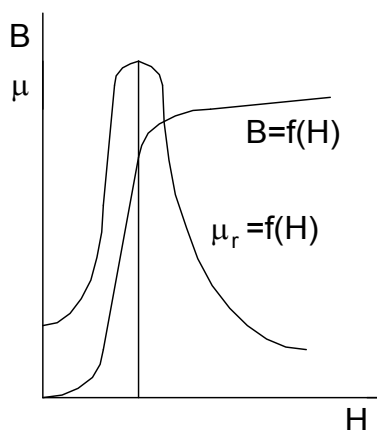


Рис.40

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$$

Максимальное значение магнитной проницаемости μ_{\max} имеет место при средних величинах индукции.

В слабых и сильных полях магнитное сопротивление материала резко возрастает. Изменение магнитного сопротивления от величины индукции сильно затрудняет решение как прямой так и обратной задачи.

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равняется нулю

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0 \quad (75)$$

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений магнитного потенциала в замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме м.д.с., действующих в этом контуре при постоянном магнитном потоке $\Phi = \text{const}$.

$$\Phi R_{M1} + \Phi R_{M2} + \dots + \Phi R_{Mi} = (Iw)_1 + (Iw)_2 + \dots + (Iw)_k \text{ или } \sum_{i=1}^n \Phi R_{M_i} = \sum_{k=1}^m (Iw)_k \quad (76)$$

5.3. Схемы замещения магнитной цепи.

Для удобства расчета магнитную цепь заменяют эквивалентной электрической цепью. В электрической схеме замещения м.д.с. заменяется э.д.с, магнитный поток - электрическим током, магнитные сопротивления - электрическими сопротивлениями.

Составим таблицу эквивалентных величин.

Магнитная цепь			Электрическая цепь		
Обозначения		Размерность	Обозначения		Размерность
Магн. поток	Φ	Вб= В*с	Ток	I	А
М.д.с	Iw	А	Э.д.с	E	В
Магн. напряж.	U_m	А	Электр. напряж.	U	В
Магн. сопрот.	R_m	А/В*с=1/Г	Электр. сопрот.	R	Ом
Магн. провод.	G_m	Г	Электр. провод.	G	1/Ом

Принцип составления схемы замещения магнитной цепи.

Магнитная цепь условно разбивается на участки с равномерным сечением и постоянной магнитной проницаемостью. Затем каждый участок магнитной цепи заменяется элементом электрической цепи, а распределенная на участке мдс заменяется источником эдс. Так например, схемы замещения м.ц. на рис.31,а) и рис.32,а) будут иметь вид

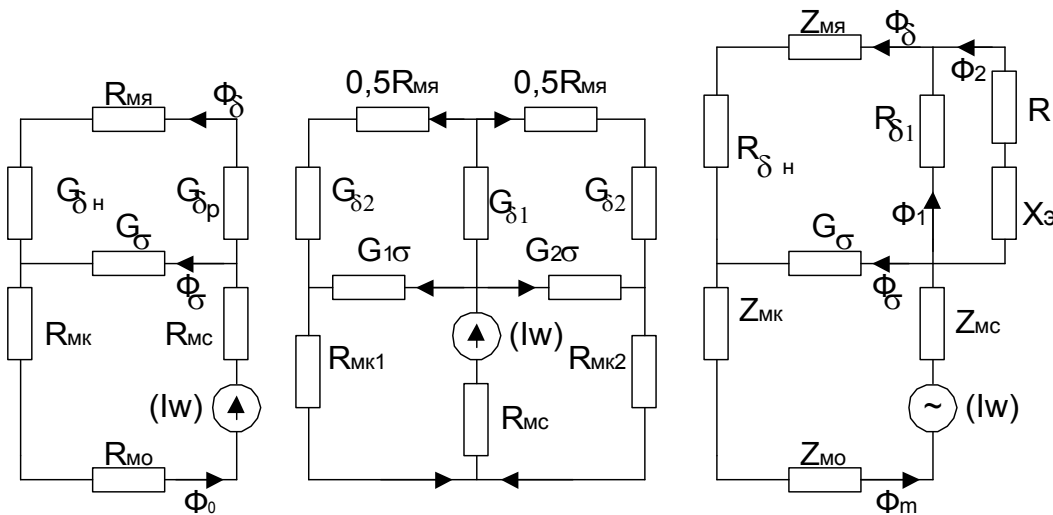


Рис.41.

5.4. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров.

При расчете магнитной цепи и определении тяговой характеристики электромагнита необходимо знать магнитную проводимость рабочего воздушного зазора и проводимости потоков рассеяния. Величина магнитной проводимости определяется конфигурацией поверхностей полюсов, ограничивающих воздушный зазор, их размерами и величиной воздушного зазора.

Существуют несколько методов расчета магнитных проводимостей. Наиболее распространенными из них являются аналитический метод, метод вероятного пути потока (метод Роттерса), метод расчетных полюсов и метод построения картины поля. Рассмотрим более подробно лишь два из этих методов, а именно аналитический и метод Роттерса.

5.4.1. *Аналитический метод.* Если линии магнитного поля в воздушном зазоре параллельны, а эквипотенциальные поверхности представляют собой параллельные плоскости, то магнитная проводимость определяется по формуле

$$G_m = \frac{\mu_0 S}{\delta} \quad (77)$$

где S - площадь поверхности полюса, ограничивающей воздушный зазор,

δ - величина воздушного зазора,

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха.

Для полюсов простой конфигурации, как например, на рис.35, с размерами полюсов $a \times b$ магнитная проводимость будет равна

$$G_m = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta},$$

для полюсов цилиндрической формы с диаметром d

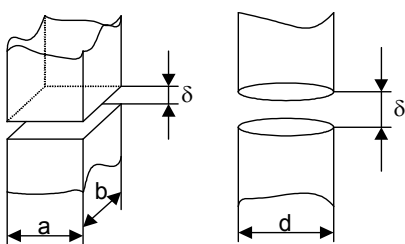


Рис.42

$$G_m = \mu_0 \frac{\pi \cdot d^2}{4\delta}. \quad (79)$$

Однако даже для таких простых конфигураций полюсов из-за существования поперечных сил в магнитном поле линии магнитной индукции стремятся занять возможно больший объем, выпучиваясь по краям полюсов, образующих воздушный зазор. Выпучивание искажает поле и делает его неравномерным вблизи краев. Поэтому фактически магнитное поле в зазоре является неравномерным и вышеприведенные формулы для расчета проводимостей

весьма не точны. Практически этими формулами можно пользоваться для определения всей проводимости между полюсами плоской формы, если размеры a , b и d значительно больше δ , т.е.

$$\frac{\delta}{a} \leq 0,2; \quad \frac{\delta}{b} \leq 0,2; \quad \frac{\delta}{d} \leq 0,2.$$

При относительно простых формах полюсов выпучивание можно учесть поправочным коэффициентом. Например, если проводимость между полюсами, изображенными на рис.42 определяется по формуле

$$G_m = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0,307 \cdot \delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0,307 \cdot \delta}{\pi} \right) \quad \Gamma, \quad (80)$$

то поправочный коэффициент $\left(\frac{0,307 \cdot \delta}{\pi} \right)$ учитывает выпучивание магнитных силовых линий в зазоре. Формулы для расчета проводимостей зазоров между другими конфигурациями полюсов приводятся в справочной литературе.

5.4.2. Метод вероятного пути потока или метод Роттерса. Сущность этого метода заключается в том, что поле в воздушном зазоре разбивается на элементарные трубки, имеющие форму простых геометрических фигур, для которых легко определить площадь и соответственно магнитную проводимость. Полная проводимость между полюсами подсчитывается как сумма проводимостей всех элементарных трубок (геометрических фигур), на которые разбито магнитное поле в зазоре. Например, поле между полюсом A прямоугольной формы и плоскостью B при $B \gg A$ может быть представлено как сумма таких простых фигур:

- параллелепипеда 1 с площадью основания $a \times b$ и высотой δ ,
- четырех четвертей круглого цилиндра 2 радиусом основания δ и длиной образующих a и b ;
- четырех четвертей полого цилиндра 3 с внутренним радиусом δ , толщиной $m=(1-2)\delta$ и длиной образующих a и b ;
- четырех половин шарового квадранта 4 радиусом δ ;
- четырех половин квадранта шаровой оболочки 5 толщиной m и внутренним радиусом δ .

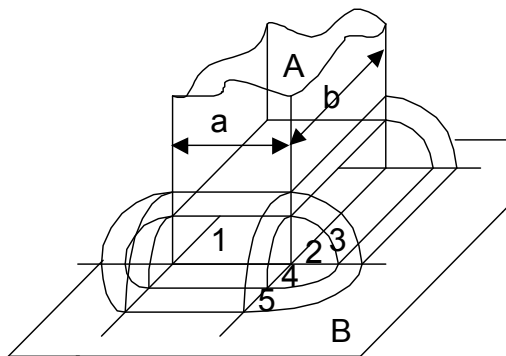
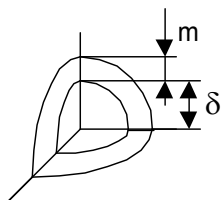


Рис.43

	<p>Проводимость</p> <p>фигуры 1</p> $G_1 = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta}$	<p>фигуры 2</p> $G_2 = 0,52 \mu_0 b(a)$
	<p>фигуры 3</p> $G_3 = 0,64 \mu_0 \frac{b}{\left(\frac{\delta}{m} + 0,5 \right)}$	<p>фигуры 4</p> $G_4 = 0,308 \mu_0 \delta$

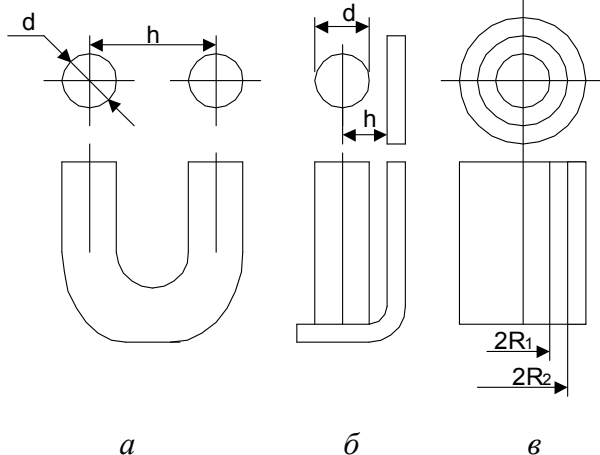


фигуры 5
 $G_5 = 0,125\mu_0 m$

Результирующая проводимость

$$G_\delta = G_1 + 2(G_{2a} + G_{2b}) + 2(G_{3a} + G_{3b}) + 4G_4 + 4G_5 \quad (81)$$

Магнитная проводимость рассеяния зависит от конфигурации магнитной цепи и взаимного расположения ее элементов. Так, для наиболее распространенных форм электромагнитов удельную проводимость рассеяния можно рассчитать по следующим формулам.



Для электромагнита по рис.42,а

$$g = \frac{2\mu_0\pi}{\ln\left(\frac{h}{d} + \sqrt{\left(\frac{h}{d}\right)^2 - 1}\right)} \quad (82)$$

Для электромагнита по рис.42,б

$$g = \frac{2\mu_0\pi K_a}{\ln\left(2\frac{h}{d} - \sqrt{4\left(\frac{h}{d}\right)^2 - 1}\right)} \quad (83)$$

где $K_a = 0,85 \div 0,92$ при $b = (1,25 \div 2,5)h$

Рис.42.

Для электромагнита по рис.42,в

$$g = \frac{2\mu_0\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (84)$$

Геометрическая проводимость рассеяния $G = gl \quad (85)$

Приведенная проводимость рассеяния $G_\sigma = \frac{gl}{2} \quad (86)$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi_0}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{G_\sigma}{G_\delta} = 1 + \frac{gl}{2G_\delta} \quad (87)$$

5.5. Расчет магнитных цепей постоянного тока

При расчете магнитной цепи решается одна из двух задач - прямая или обратная. При решении прямой задачи должны быть заданы магнитный поток в рабочем воздушном зазоре, размеры магнитопровода и материал магнитопровода должен быть задан в виде кривой намагничивания. Необходимо определить намагничивающую силу катушки.

При решении обратной задачи обычно бывают заданы намагничивающая сила, размеры и материал магнитопровода. Необходимо найти магнитный поток в рабочем воздушном зазоре.

Существует несколько методов для решения этих задач, а именно: графоаналитический метод, метод расчета по коэффициентам рассеяния и метод расчета по участкам. Для примера рассмотрим более подробно графоаналитический метод и метод по участкам.

5.5.1. Графоаналитический метод расчета магнитной цепи постоянного тока.

Прямая задача. Дано: поток в рабочем воздушном зазоре Φ_δ ,

размеры магнитной цепи,

кривая намагничивания материала $B(H)$.

Найти: намагничивающую силу катушки (IW) .

Порядок расчета. Магнитная цепь разбивается на участки с равномерным сечением и постоянной магнитной проницаемостью по всей длине участка. Так, в данном примере выделены такие участки: якорь, ярмо (корпус), основание и сердечник.

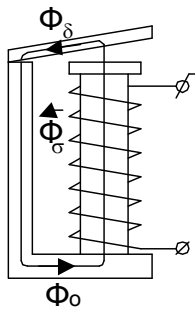


Рис.43.

Задаются несколькими значениями потока в долях от заданного значения, например:

$$\Phi_1=0.5\Phi_\delta; \quad \Phi_2=1.0\Phi_\delta; \quad \Phi_3=1.5\Phi_\delta$$

Определяют индукцию на каждом участке магнитопровода от действия каждого из потоков

$$B=\Phi/S, \quad (88)$$

где S - площадь поперечного сечения участка магнитной цепи.

По кривой намагничивания $B(H)$ находят напряженность магнитного поля H_i на стальных участках магнитной цепи от действия каждого потока.

Определяют магнитное напряжение на каждом участке магнитной цепи от действия каждого потока

$$U_{мстi} = H_i l_i - \text{на стальных участках,} \quad (89)$$

$$U_{м\delta} = \Phi \left(\frac{1}{G_\delta} + \frac{1}{G_{\delta n}} \right) - \text{на воздушных зазорах,} \quad (90)$$

Здесь l_i - средняя длина силовой линии магнитного потока на участке магнитной цепи.

G_δ и $G_{\delta n}$ - магнитные проводимости рабочего и нерабочего воздушных зазоров.

Определяется суммарное магнитное напряжение на стальных участках магнитопровода от действия каждого потока

$$U_{мст1} = H_{c1} l_c + H_{я1} l_{я} + H_{к1} l_k \quad (91)$$

$$U_{мст2} = H_{c2} l_c + H_{я2} l_{я} + H_{к2} l_k \quad (92)$$

$$U_{мст3} = H_{c3} l_c + H_{я3} l_{я} + H_{к3} l_k \quad (93)$$

Строятся зависимости $\Phi = f(U_{мст})$ и $\Phi = f(U_{м\delta})$

Суммируя абсциссы функций $\Phi = f(U_{мст})$ и $\Phi = f(U_{м\delta})$ получают результирующую кривую $\Phi = f(U_m)$.

На оси ординат откладывают заданное значение потока Φ_δ и сносят на кривую $\Phi = f(U_m)$, получая на ней точку "а". Из точки "а" проводят луч к оси абсцисс под углом α , который определяется следующим образом

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Phi_\delta}{U_{м\delta}} \frac{n}{m} = G_{\delta p} \frac{n}{m}, \quad (94)$$

где n - масштаб по оси потока,

m - масштаб по оси напряжений,

$G_{\delta p}$ - результирующая магнитная проводимость воздушных зазоров.

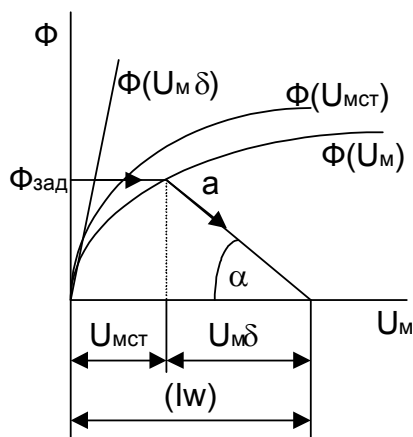
На оси абсцисс определяют искомое значение намагничивающей силы, а опустив перпендикуляр из точки a на ось абсцисс легко определить составляющие этой намагничивающей силы, т.е.,

$$(IW) = U_{м\delta} + U_{мст}. \quad (95)$$

Обратная задача решается аналогичным образом, а искомое значение магнитного потока находится из графика зависимости $\Phi = f(U_m)$ по заданной намагничивающей силе (IW) .

5.5.2. *Распределение магнитных потоков и напряжений в магнитной цепи электромагнита.* На рис.45 показано распределение потока рассеяния и потока в сердечнике, а также магнитного напряжения по длине

Рис.44.



сердечника электромагнита, из которого видно, что поток рассеяния Φ_δ и поток в сердечнике Φ имеют параболическое распределение. Причем, на магнитной

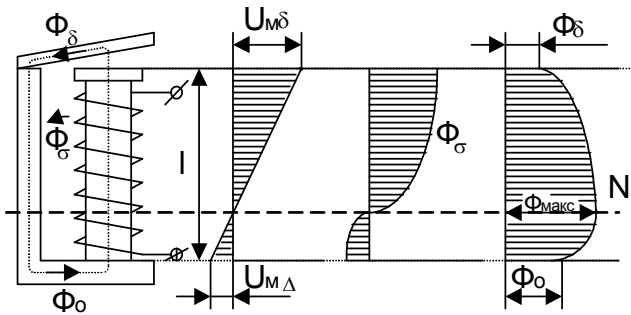


Рис.45.

нейтрали поток рассеяния равен нулю, а поток в сердечнике максимален. Магнитное напряжение по длине сердечника распределено по линейному закону и на магнитной нейтрали равно нулю. Такое распределение магнитных потоков создает определенные трудности для его учета при расчете магнитной цепи. Для этого магнитная цепь разбивается на участки не только по условию равномерности сечения и постоянства магнитной проницаемости, но и по условию

возможности принятия равномерного распределения

потока рассеяния по длине участка. То есть, параболическое распределение потока рассеяния на каждом участке заменяется линейным, равномерным по всей длине. Тогда можно считать, что поток рассеяния сосредоточен в середине участка и делит его пополам. Отсюда следует, что, чем более точным должен быть расчет магнитной цепи, тем на большее количество участков она должна быть разбита.

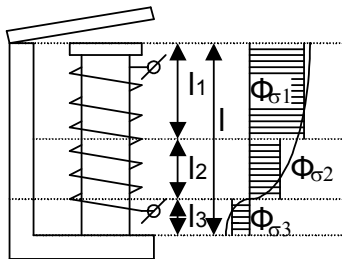
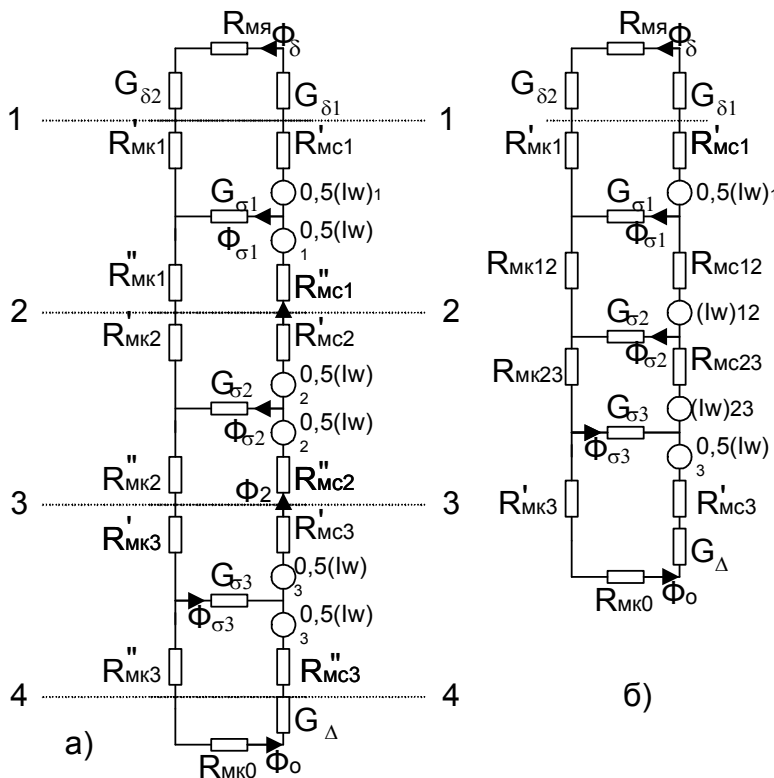


Рис.46.

распределен равномерно, а на границах участков изменяется скачком.

Для примера разобьем магнитную цепь (рис.46) на такие участки: якорь, рабочий и нерабочий воздушные зазоры, сердечник, ярмо и основание. Кроме того, сердечник и ярмо разобьем еще на три участка, два из них над магнитной нейтралью и один под ней. Местоположение магнитной нейтрали определяется соотношением воздушных зазоров рабочего и зазора стыка основания с сердечником. Считаем, что поток рассеяния на каждом участке

Составим схему замещения. Причем, участки l_1 , l_2 и l_3 сердечника и ярма представляем Т-образной схемой замещения (Рис.47,а), так как проводимость рассеяния на каждом из этих участков делит их пополам (согласно принятому условию).



Развернутую схему замещения (рис.47,а) можно упростить, если учесть, что на участках между точками $a-b$ и $b-c$ действуют потоки неизменные по всей длине каждого участка, а меняются только на границах участков, а именно в точках a , b и c . В связи с этим элементы схемы на этих участках можно объединить, то есть

$$(Iw)_{12} = \frac{(Iw)_1}{2} + \frac{(Iw)_2}{2}; \quad (96)$$

$$R_{mc12} = R''_{mc1} + R'_{mc2}; \quad (97)$$

$$R_{mk12} = R''_{mk1} + R'_{mk2}; \quad (98)$$

$$(Iw)_{23} = \frac{(Iw)_2}{2} + \frac{(Iw)_3}{2}; \quad (99)$$

$$R_{mc23} = R''_{mc2} + R'_{mc3}; \quad (100)$$

$$R_{.mk23} = R_{.mk2}'' + R_{.mk3}' \quad (101)$$

Рис.47.

Таким образом, расчетная схема замещения рассматриваемой магнитной цепи приведена на рис.47,б.

5.5.3. *Расчет магнитных цепей методом участков. Прямая задача.* Дано: рабочий магнитный поток Φ_δ , размеры магнитной цепи, материал задан кривой намагничивания $B(H)$. Найти намагничивающую силу катушки.

1) Определяем магнитное напряжение в якоре

$$U_{.мя} = H_{.я} \cdot l_{.я} \quad (102)$$

здесь $l_{.я}$ - длина средней магнитной линии в якоре,

$H_{.я}$ - напряженность магнитного поля в якоре, которая определяется из кривой намагничивания $B(H)$ по индукции в якоре $B_{.я}$, где $B_{.я} = \Phi / S_{.я}$,

$S_{.я}$ - площадь сечения якоря.

2) Определяем магнитное напряжение между точками 1-1

$$U_{.м1} = U_{.мя} + \Phi \left(\frac{1}{G_{\delta1}} + \frac{1}{G_{\delta2}} \right) + (H_{c1} + H_{к1}) \cdot \frac{l_1}{2} - \frac{(IW)_1}{2} \quad (103)$$

Значения H_{c1} и $H_{к1}$ определяются аналогично $H_{.я}$. При этом

$$B_c = \frac{\Phi}{S_c}, \quad B_{к} = \frac{\Phi}{S_{к}}. \quad (104)$$

S_c и $S_{к}$ - площади сечений сердечника и ярма.

$$(IW)_1 = \frac{(IW) \cdot l_1}{l}, \quad (105)$$

где $l = l_1 + l_2 + l_3$ - длина сердечника,

(IW) - намагничивающая сила катушки (искомая), которой предварительно можно задаться согласно выражению

$$(IW) = (1,2 \div 1,3) \frac{\Phi}{G_p}. \quad (106)$$

Здесь $G_p = \frac{G_{\delta1} \cdot G_{\delta2}}{G_{\delta1} + G_{\delta2}}$ - результирующая магнитная проводимость воздушных зазоров.

3) Определяем поток рассеяния $\Phi_{\sigma1}$ и поток Φ_1 на участке l_1

$$\Phi_{\sigma1} = U_{.м1} G_{\sigma1}, \quad \Phi_1 = \Phi + \Phi_{\sigma1}. \quad (107)$$

Здесь $G_{\sigma1}$ - магнитная проводимость рассеяния

$$G_{\sigma1} = \frac{g \cdot l_1}{2} \quad (108)$$

4) Магнитное напряжение между точками 2-2

$$U_{.м2} = U_{.м1} + (H_{c1} \cdot \frac{l_1}{2} + H_{c2} \cdot \frac{l_2}{2}) + (H_{к1} \cdot \frac{l_1}{2} + H_{к2} \cdot \frac{l_2}{2}) - (IW)_{12}. \quad (109)$$

Здесь H_{c2} и $H_{к2}$ - напряженности магнитного поля в сердечнике и ярме от действия потока Φ_1 . Они определяются из кривой намагничивания по

$$B_{c2} = \frac{\Phi_1}{S_c}, \quad B_{к2} = \frac{\Phi_1}{S_{к}}. \quad (110)$$

5) Поток рассеяния $\Phi_{\sigma2}$ и поток Φ_2

$$\Phi_{\sigma2} = U_{.м2} \cdot G_{\sigma2}, \quad \Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_{\sigma2}. \quad (111)$$

6) Аналогично пп.4 и 5 определяется магнитное напряжение между точками 3-3 $U_{.м3}$, поток рассеяния $\Phi_{\sigma3}$ и поток Φ_0 .

7) Магнитное напряжение в основании ярма

$$U_{m3} = U_{m2} + (H_{c3} + H_{\kappa3}) \frac{l_3}{2} - \frac{(Iw)_3}{2} \quad (112)$$

8) Нескомпенсированная часть м.д.с. катушки

$$U_{m0} = U_{m3} - H_0 l_0 + \Phi \frac{1}{G_{\Delta}}, \quad (113)$$

где H_0 - напряженность магнитного поля в основании ярма, определяемая из кривой $B(H)$ по индукции

$$B_0 = \frac{\Phi_0}{S_{\kappa}}. \quad (114)$$

Если $U_{m0} > 0$, то это свидетельствует о том, что принятая предварительно м.д.с. катушки недостаточна для создания соответствующего магнитного потока Φ и нужно задаться ее большим значением. В случае, если $U_{m0} < 0$, то принятая м.д.с. больше необходимой и нужно задаться меньшим значением. Необходимо стремиться, чтобы погрешность, определяемая как $\frac{U_{m0}}{(Iw)} \cdot 100$ не превышала (3-5)%.

5.6. Расчет магнитных цепей переменного тока.

5.6.1. Особенности расчета магнитных цепей переменного тока.

Магнитные цепи переменного тока обладают следующими особенностями. Ток в катушке электромагнита зависит в основном от индуктивного сопротивления, которое в свою очередь определяется величиной воздушного зазора. Магнитное сопротивление цепи зависит от потерь в стали и наличия короткозамкнутых обмоток, расположенных на магнитопроводе.

Магнитопровод обычно выполняется шихтованным (с целью уменьшения потерь на вихревые токи) прямоугольного поперечного сечения, что ведет к увеличению средней длины витка обмотки и расходу меди.

Рассмотрим влияние этих особенностей на расчет магнитной цепи переменного тока.

5.6.2. Учет влияния потерь в стали. Векторная диаграмма магнитной цепи при переменном токе имеет вид, показанный на рис.43 и подобна векторной диаграмме трансформатора в режиме холостого хода.

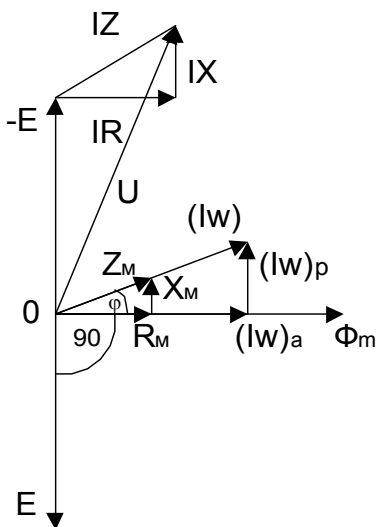


Рис.48.

М.д.с. катушки (Iw) сдвинута относительно потока Φ_m на угол φ и может быть разложена на две составляющие:

$(Iw)_a$ - активную составляющую, совпадающую по фазе с магнитным потоком и расходуемую на проведение потока через все участки магнитной цепи,

$(Iw)_p$ - реактивную составляющую, сдвинутую по отношению к магнитному потоку на угол 90 градусов, которая расходуется на компенсацию воздействия потерь в стали от перемагничивания и вихревых токов.

По аналогии с электрическими цепями можно записать

$$R_m = \frac{(Iw)_a}{\Phi_m} - \text{активная составляющая магнитного}$$

сопротивления магнитной цепи,

$$X_m = \frac{(Iw)_p}{\Phi_m} - \text{реактивная составляющая магнитного сопротивления}$$

магнитной цепи,

$$Z_m = \frac{(Iw)}{\Phi_m} - \text{полное магнитное сопротивление.}$$

Таким образом, влияние перемагничивания магнитопровода и возникающих в нем вихревых токов может быть учтено введением в схему замещения магнитной цепи индуктивных магнитных сопротивлений X_m . Следовательно, участки магнитопровода магнитной цепи переменного тока характеризуются полным комплексным магнитным сопротивлением

$$Z_m = R_m + jX_m \text{ или } Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}. \quad (115)$$

Значения магнитных сопротивлений можно определить следующим

$$X_m = \frac{\gamma \cdot p_{cm} V}{\pi \cdot f \cdot B_m S^2} = \frac{P_{cm}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_m^2}. \quad (116)$$

Здесь γ - плотность стали,

$p_{ст}$ - удельные потери в стали,

V - объем стали участка магнитной цепи,

f - частота сети,

B_m - амплитуда магнитной индукции,

S - площадь сечения стального участка м.ц.,

Φ_m - амплитуда магнитного потока.

$$Z_m = \frac{U_m}{\Phi_m} = \frac{H_m l}{B_m S} = \frac{l}{\mu_a S}, \quad (117)$$

Здесь U_m - магнитное напряжение на рассматриваемом участке м.ц.,

l - средняя длина магнитной линии на участке м.ц.,

H_m - напряженность магнитного поля на участке м.ц.,

μ_a - магнитная проницаемость стали на участке м.ц..

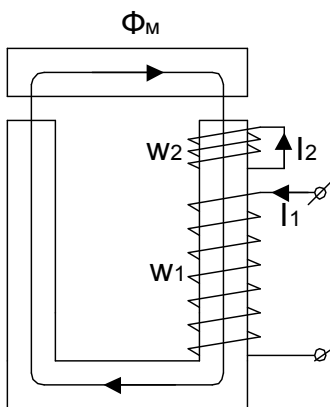
Значения H_m , B_m и μ_a определяются по кривой намагничивания, снятой на переменном токе. Тогда активное сопротивление магнитопровода будет равно

$$R_m = \sqrt{Z_m^2 - X_m^2}. \quad (118)$$

Участки магнитной цепи в виде воздушных промежутков создают только активное магнитное сопротивление, так как на этих участках нет потерь на перемагничивание и вихревые токи. Для них

$$R_{m\delta} = \frac{1}{G_\delta}. \quad (119)$$

5.6.3. Учет влияния короткозамкнутой обмотки. Влияние короткозамкнутой обмотки рассмотрим на примере электромагнита переменного тока П-образного типа, с короткозамкнутой обмоткой, охватывающей все сечение сердечника.



Потоками рассеяния пренебрегаем. Составим уравнение равновесия м.д.с. по второму закону Кирхгофа в комплексной форме

$$\Phi_m (2R_{m\delta} + R_{mcm} + jX_{mcm}) = I_1 w_1 + I_2 w_2, \quad (120)$$

$$\text{где } I_2 = \frac{E_2}{r_2 + jx_2}$$

r_2 - активное сопротивление к.з. обмотки,

x_2 - индуктивное сопротивление к.з. обмотки.

Эдс, наводимая в к.з. обмотке

$$E_2 = -j\omega \cdot w_2 \cdot \Phi_m \quad (121)$$

Подставляем (*) в I_2 и делаем преобразования

Рис.49.
$$I_2 = \frac{-j\omega w_2 \Phi_b}{x_2 + jr_2} \frac{r_2 - jx_2}{r_2 - jx_2} = \frac{-\omega w_2 \Phi_b (x_2 + jr_2)}{r_2^2 + x_2^2} \quad (122)$$

Значение I_2 подставим в уравнение равновесия и решаем относительно $I_1 w_1$

$$I_1 w_1 = \Phi_m (2R_{m\delta} + R_{mct} + jX_{mct} + \frac{\omega w_2^2 x_2}{r_2^2 + x_2^2} + j \frac{\omega w_2^2 r_2}{r_2^2 + x_2^2}). \quad (123)$$

Введем обозначения

$$R_{m2} = \frac{\omega w_2^2 x_2}{r_2^2 + x_2^2} \quad X_{m2} = \frac{\omega w_2^2 r_2}{r_2^2 + x_2^2} \quad (124)$$

Таким образом, короткозамкнутая обмотка учитывается при расчете магнитной цепи с помощью двух магнитных сопротивлений - активного R_{m2} и индуктивного X_{m2} . Тогда уравнение магнитной цепи с короткозамкнутой обмоткой описывается законом Ома

$$I_1 w_1 = \Phi_m (2R_{m\delta} + R_{mct} + jX_{mct} + R_{m2} + jX_{m2}). \quad (125)$$

В магнитных цепях переменного тока короткозамкнутая обмотка выполняется в виде одного витка - экрана, охватывающего часть полюса в воздушном зазоре. Экран служит для устранения вибрации якоря. В связи с этим индуктивное сопротивление экрана мало ($x_2 \ll r_2$), так как $w_2=1$ и им можно пренебречь ($x_2=0$). Тогда

$$R_{m2} = 0 \quad X_{m2} = X_s = \frac{\omega}{r_2}. \quad (126)$$

В схеме замещения экран учитывается введением индуктивного сопротивления X_s .

5.6.4. *Зависимость тока и потока от воздушного зазора.* Рассмотрим простейшую магнитную цепь переменного тока без учета сопротивления стали ($R_{mct}=0$), потерь в ней ($P_{ct}=0$), потоков рассеяния ($\Phi_\sigma = 0$) и короткозамкнутых экранов ($X_s=0$).

Напряжение сети, приложенное к катушке, уравнивается активным и реактивным падением напряжения

$$U^2 = (IR)^2 + (IX)^2, \quad (127)$$

где U и I берутся в действующих значениях.

$$IX = I\omega L = I\omega \frac{\Psi}{I} = \omega w \Phi_\delta = \omega w l w G_\delta = \omega w^2 \frac{\mu_0 S}{\delta} \quad (128)$$

Отсюда следует, что индуктивное сопротивление обмотки будет равно

$$X = \omega w^2 \frac{\mu_0 S}{2\delta} \quad (129)$$

то-есть, оно обратно пропорционально воздушному зазору.

Для шунтовой обмотки, т.е. обмотки, подключаемой параллельно зажимам источника питания, активное сопротивление обмотки значительно меньше реактивного ($R \ll \omega L$).

Поэтому в первом приближении можно пренебречь активным сопротивлением ($R=0$) и тогда

$$U=IX. \quad (130)$$

Но так как $IX = 4,44 f w \Phi_m$, то тогда получим

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w} \text{ - амплитудное значение потока.}$$

Таким образом, при сделанных допущениях ($R=0$ и $P_{ct}=0$), поток, связанный с катушкой, не зависит от рабочего зазора и является величиной постоянной, а при $U=IX$ следует

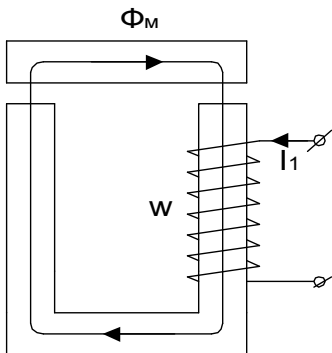


Рис.50.

$$I = \frac{U}{X} = \frac{2U\delta}{\omega w^2 \mu_0 S} \quad (131)$$

то есть, с ростом воздушного зазора индуктивное сопротивление обмотки уменьшается, а ток в ней увеличивается.

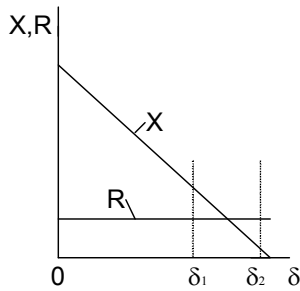


Рис.51.

Однако, принятое допущение ($R \ll \omega L$) справедливо лишь в ограниченном диапазоне изменений воздушных зазоров. Так, из графиков видно, что в диапазоне зазоров $\delta_1 - \delta_2$ активное сопротивление R соизмеримо с индуктивным X и даже больше его. Поэтому, с учетом активного сопротивления обмотки магнитный поток будет равен

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{U^2 - (IR)^2}}{4,44fw} \quad (132)$$



Таким образом, с ростом рабочего воздушного зазора ток в обмотке возрастает, а поток в магнитной цепи будет падать также, как и в магнитной цепи постоянного тока. Но в магнитной цепи постоянного тока уменьшение потока происходит в результате роста магнитного сопротивления воздушного зазора, а в магнитной цепи переменного тока еще и в результате увеличения падения напряжения на активном сопротивлении обмотки. Если учитывать поток рассеяния Φ_s , то при увеличении зазора ток в обмотке будет нарастать не пропорционально, как это следует из формулы (131), а значительно медленнее (Рис.52).

Рис.52.

Таким образом, активное сопротивление и магнитный поток рассеяния сдерживают рост тока в катушке электромагнита.

5.7. Расчет магнитной цепи переменного тока с учетом потерь в стали и к.з. витка.

Для примера возьмем П-образный электромагнит переменного тока с к.з. витком на полюсе.

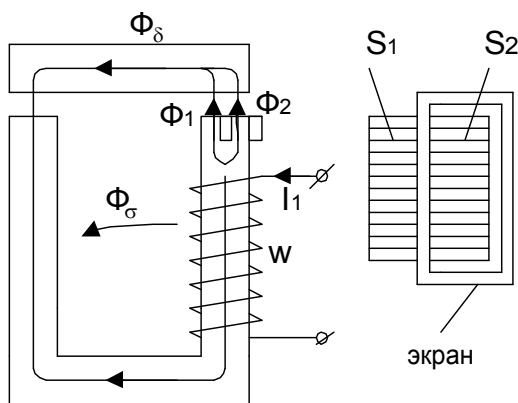


Рис.53.

S_1 - площадь полюса, не охваченная экраном, S_2 - экранированная площадь полюса.

Магнитный поток Φ_m , проходя в воздушный зазор разветвляется на два потока, один из которых Φ_1 проходит через неохваченную экраном часть полюса, а другой Φ_2 проходит через экран и наводит в нем эдс. Возникающий при этом в экране ток создает в экранированной части полюса свой магнитный поток Φ_s , направленный встречно по отношению к потоку Φ_m и замыкающийся через воздушный зазор и якорь. В результате совместного

действия потоков Φ_{20} и Φ_3 , результирующий поток Φ_2 в экранированной части полюса будет сдвинут по фазе на угол ψ

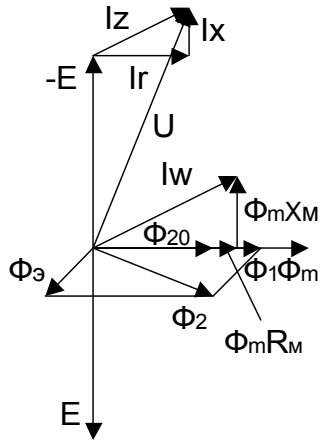


Рис.54.

относительно потока Φ_1 в неохваченной экраном части полюса. Таким образом, в воздушном зазоре благодаря экрану действуют два магнитных потока, сдвинутых друг относительно друга по фазе. Это способствует устранению вибрации якоря электромагнита переменного тока.

Векторная диаграмма электромагнита с экраном показана на рис. 54. Составим схему замещения магнитной цепи с учетом влияния потерь в стали и экрана.

Решаем прямую задачу. Дано: поток в воздушном зазоре Φ_σ , размеры магнитной цепи и материал магнитопровода.

Найти намагничивающую силу катушки.

- 1) Известным методом определяются магнитные сопротивления (проводимости) воздушных зазоров и проводимость рассеяния

$$R_{\delta 1} = \frac{\delta}{\mu_0 S_1}, \quad R_{\delta 2} = \frac{\delta}{\mu_0 S_2}, \quad R_{\delta n} = \frac{\delta}{\mu_0 S_n}; \quad G_\sigma = \frac{gl}{2} \quad (133)$$

- 2) Определяется магнитное напряжение между точками аb схемы

$$U_{маб} = \Phi_\delta \frac{R_{\delta 1}(R_{\delta 2} + jx_3)}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2} + R_{\delta 3}}, \quad (134)$$

здесь $x_3 = \frac{\omega}{r_3}$, r_3 - активное сопротивление экрана,

$\omega = 2\pi \cdot f$ - угловая частота сети.

- 3) Индукция в якоре $B_\gamma = \frac{\Phi_\delta}{S_\gamma}$, S_γ - площадь сечения якоря,

- 4) Магнитное сопротивление якоря. По кривой намагничивания $B(H)$ определяется напряженность магнитного поля H_γ и затем

$$Z_{мя} = \frac{\sqrt{2} H_\gamma l_\gamma}{B_\gamma S_\gamma}. \quad (135)$$

Если это необходимо, то можно найти также

$$X_{мя} = \frac{P_{стя}}{\pi \cdot f \cdot \Phi_\delta^2}, \quad R_{мя} = \sqrt{Z_{мя}^2 - X_{мя}^2}; \quad (136)$$

Здесь $P_{стя}$ - потери в стали якоря,
 f - частота сети.

- 5) Магнитное напряжение в якоре

$$U_{мя} = \Phi_\delta (R_{мя} - jX_{мя}). \quad (137)$$

- 6) Магнитное напряжение между точками ас

$$U_{мас} = U_{маб} + U_{мя} + \Phi_\delta R_{\delta n} \quad (138)$$

- 7) Поток рассеяния

$$\Phi_\sigma = U_{мас} G_\sigma \quad (139)$$

- 8) Поток в основании электромагнита

$$\Phi_m = \Phi_\delta + \frac{2}{3} \Phi_\sigma \quad (140)$$

- 9) Магнитное напряжение в сердечнике

$$U_{mc} = \Phi_m (R_{mc} + jX_{mc}) \quad (141)$$

10) Искомая мдс катушки

$$(Iw) = U_{mac} + U_{mc} \quad (142)$$

При решении обратной задачи необходимо задаться потоком Φ_δ и решать методом последовательных приближений.

Глава 6. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

6.1. Общие сведения

Постоянный магнит представляет собой кусок стали или какого-либо другого твердого сплава, который, будучи намагниченным, устойчиво сохраняет запасенную часть магнитной энергии. Назначение магнита – служить источником магнитного поля, не изменяющимся под влиянием каких-либо внешних факторов. Постоянные магниты применяются в разнообразных устройствах и приборах: реле, электроизмерительных приборах, электрических машинах и др.

Различают следующие основные группы сплавов для постоянных магнитов:

- 1) мартенситовые стали – углеродистые, вольфрамовые, хромистые, кобальтовые;
- 2) сплавы на основе стали-никеля-алюминия с добавлением в некоторых случаях кобальта, силиция: ални (Fe, Al, Ni), алниси (Fe, Al, Ni, Si) магнико (Fe, Ni, Al, Co);
- 3) сплавы на основе серебра, меди, кобальта.

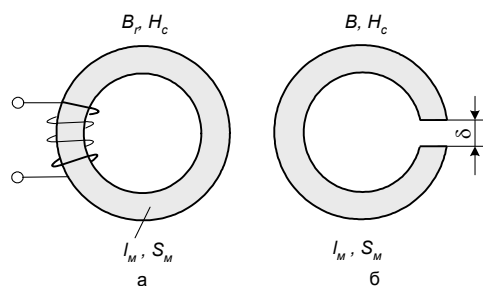


Рис.56

Величинами, характеризующими постоянный магнит, являются остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c (рис.56). Для определения магнитных характеристик готовых магнитов пользуются кривыми размагничивания (рис.57), представляющими собой зависимость $B=f(-H)$. Кривая снимается для кольца, которое сначала намагничивается до индукции насыщения, а затем размагничивается до $B=0$.

Магнитный поток в воздушном зазоре. Для использования энергии магнита необходимо изготовить его с воздушным зазором (рис.56,б). Составляющая МДС, затрачиваемая постоянным магнитом на проведение потока в воздушном зазоре, называется свободной МДС. Наличие воздушного зазора δ снижает индукцию в магните от B_r до B (рис.57) аналогично тому, как если бы по катушке, надетой на кольцо (рис.56,а), пропустили размагничивающий ток, создающий размагничивающий ток, создающий напряженность H . Это соображение положено в основу приведенного ниже способа вычисления потока в воздушном зазоре магнита.

При отсутствии зазора вся МДС расходуется на проведение потока через магнит:

$$(Iw) = H_c l_m \quad B = B_r,$$

где l_m - длина магнита.

При наличии воздушного зазора часть МДС $(Iw)_\delta$ будет расходоваться на проведение на проведение потока через зазор:

$$(Iw) = (Iw)_m + (Iw)_\delta. \quad (143)$$

Допустим, мы создали такую размагничивающую напряженность магнитного поля H , что

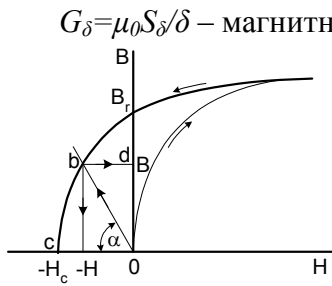
$$H l_m = (Iw)_\delta$$

И индукция при этом равна B .

При отсутствии рассеяния поток в магните равен потоку в воздушном зазоре

$$B S_m = (Iw)_\delta G_\delta \quad (144)$$

где S_m – площадь сечения магнита;



δ и

Рис.57

Отрезок bc определяет индукцию B магнита. Отсюда поток в воздушном зазоре будет

$$\Phi_{\delta} = BS_{\text{м}} . \quad (146)$$

При определении $tg\alpha$ учитываются масштабы оси ординат и абсцисс:

$$tg\alpha = \frac{G_{\delta} l_{\text{м}}}{pS_{\text{м}}} , \quad (147)$$

где $p=n/m$ – отношение масштабов осей B и H .

С учетом рассеяния поток Φ_{δ} определяется следующим образом. Проводят прямую Ob под углом α , где $tg\alpha$ определяется по (147). Полученное значение B характеризует индукцию в среднем сечении магнита. Поток в среднем сечении магнита

$$\Phi_{\text{м}} = BS_{\text{м}} \quad (148)$$

Поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta} = \frac{BS_{\text{м}}}{\sigma} , \quad (149)$$

где σ – коэффициент рассеяния.

Индукция в рабочем зазоре

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}} . \quad (150)$$

Прямые магниты. Выражение (150) дает решение задачи для магнитов замкнутой формы, где проводимости воздушных зазоров могут быть вычислены с достаточной для практических целей точностью. Для прямых магнитов задача вычисления проводимостей потока рассеяния весьма трудна. Поток вычисляется с помощью опытных зависимостей, связывающих напряженность поля магнита с размерами магнита.

6.2. Свободная магнитная энергия

Это та энергия, которую отдает магнит в воздушных зазорах. При расчете постоянных магнитов, выборе материалов и требуемых соотношений размеров стремятся к максимальному использованию материала магнита, сводящемуся к получению максимального значения свободной магнитной энергии.

Магнитная энергия, сосредоточенная в воздушном зазоре, пропорциональна произведению потока в зазоре и МДС:

$$W_{\text{м}} = \frac{1}{2} \Phi_{\delta} (Iw)_{\delta} \quad (151)$$

Учитывая, что

$$\Phi_{\delta} = BS_{\text{м}} ; \quad (Iw)_{\delta} = H \cdot l_{\text{м}} . \quad (152)$$

получаем

$$W_{\text{м}} = \frac{BH}{2} S_{\text{м}} l_{\text{м}} = \frac{BH}{2} V , \quad (153)$$

где V – объем магнита.

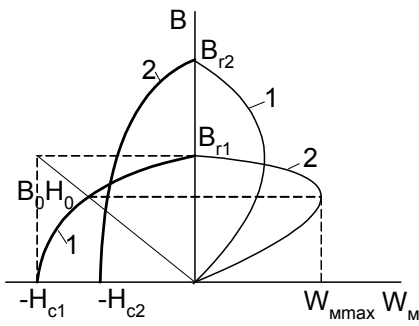


Рис.58

Материал магнита характеризуется магнитной энергией, отнесенной к единице его объема. Пользуясь кривой размагничивания можно построить кривую $W_m=f(B)$ при $V=1$ (рис.58). Кривая $W_m=f(B)$ имеет максимум при каких-то значениях B и H , которые обозначены B_0 и H_0 . Практически применяется способ нахождения B_0 и H_0 без построения кривой $W_m=f(B)$. Точка пересечения диагонали четырехугольника, стороны которого равны B_r и H_c с кривой размагничивания достаточно близко соответствует значениям

B_0 и H_0 . Остаточная индукция B_r в относительно малых пределах (1-2,5), а коэрцитивная сила H_c в больших (1-20). Поэтому различают материалы низкокоэрцитивные, у которых W_m (кривая 2), высококоэрцитивные, у которых W_m больше (кривая 1).

6.3. Кривые возврата

В процессе работы может меняться воздушный зазор. Допустим, что до введения якоря индукция была $B_1 \operatorname{tg} \alpha_1$, при введении якоря зазор δ изменяется и такому состоянию системы соответствует угол α_2 (рис.59) и большая индукция. Однако увеличение индукции происходит не по кривой размагничивания, а по некоторой другой кривой b_1cd , называемой кривой возврата. При полном замыкании ($\delta=0$) мы имели бы индукцию B_2 . При изменении зазора в обратном направлении индукция меняется по кривой dfb_1 .

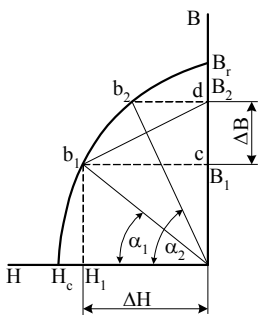


Рис.59

велика и петлю можно заменить прямой b_1d . Отношение $\Delta B/\Delta H$ называется обратной проницаемостью магнита.

6.4. Старение и стабилизация магнитов.

Под старением понимают явление уменьшения магнитного потока магнита с течением времени. Это явление определяется рядом причин.

Структурное старение. Материал магнита после закалки или отливки имеет неравномерную структуру. Со временем эта неравномерность переходит в более стабильное состояние, что приводит к изменению значений B и H .

Механическое старение. Происходит вследствие ударов, толчков, вибраций и влияния высоких температур, которые ослабляют поток магнита.

Магнитное старение. Определяется влиянием внешних магнитных полей.

Стабилизация магнитов. Всякий магнит перед установкой его в аппарат должен быть подвергнут дополнительному процессу стабилизации, после которого увеличивается сопротивляемость магнита уменьшению потока.

Структурная стабилизация. Заключается в дополнительной термической обработке, которая проводится до намагничивания магнита (кипячение закаленного магнита в течение 4 ч. после закалки). Сплавы на основе стали, никеля и алюминия не требуют структурной стабилизации.

Механическая стабилизация. Намагниченный магнит подвергается перед установкой в аппарат ударам, сотрясениям, вибрации в условиях, близких режиму работы.

Магнитная стабилизация. Намагниченный магнит подвергают действию внешних полей переменного знака. После чего магнит становится более устойчивым к воздействию внешних полей, к температурным и механическим воздействиям.

Глава 7. РАСЧЕТ ТЯГОВЫХ СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

7.1. Энергетический баланс электромагнита постоянного тока.

При подключении катушки электромагнита к сети напряжением U в нем возникает переходный процесс, описываемый уравнением

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt}, \quad (154)$$

где i - ток в катушке;

R - омическое сопротивление катушки;

ψ - потокосцепление.

Умножив каждый член уравнения на idt , получим выражение энергетического баланса электромагнита за время dt

$$Uidt = i^2 Rdt + id\psi. \quad (155)$$

Первый член этого выражения ($Uidt$) представляет собой энергию, поступившую из сети за время dt ; второй член ($i^2 Rdt$) представляет потери энергии в омическом сопротивлении катушки; третий член $id\psi$ - приращение энергии магнитного поля в электромагните.

Полное значение магнитной энергии

$$W_m = id\psi \quad (156)$$

Зависимость потокосцепления от тока (Рис.51) в общем случае носит нелинейный характер, причем для каждой величины воздушного зазора эта зависимость будет иной - при больших зазорах $\psi = f(i)$ обычно идет более полого, а при малых зазорах - более круто. Это обусловлено степенью насыщения магнитопровода.

В момент трогания якоря, которому соответствует ток i_1 в катушке и зазор δ_1 , магнитная энергия, запасенная электромагнитом, равна площади S_{oab}

$$W_{m1} = id\psi = S_{oab} m_i m_\psi, \quad (157)$$

здесь m_i и m_ψ - масштаб по осям тока и потокосцепления.

При быстром движении якоря зависимость между потокосцеплением и током носит более сложный характер, так как при этом изменяется индуктивность системы, вследствие чего возникает добавочная эдс самоиндукции (эдс движения), действующая навстречу напряжению сети

$$L = w^2 G_\delta, \quad \psi = L \cdot i, \quad \frac{d\psi}{dt} = \frac{Ldi}{dt} + \frac{idL}{dt}. \quad (158)$$

Эта эдс может привести к снижению величины тока в катушке.

С уменьшением воздушного зазора от δ_1 до δ_2 магнитная энергия электромагнита возрастает на величину

$$\Delta W_m = id\psi = S_{jmcd} m_i m_\psi, \quad (159)$$

Магнитная энергия при зазоре δ_2 будет равна

$$W_{m2} = id\psi = S_{odc} m_i m_\psi. \quad (160)$$

Следовательно при уменьшении воздушного зазора от δ_1 до δ_2 магнитная энергия изменяется на величину

$$\Delta W_m = (S_{oab} + S_{abcd} + S_{odc}) m_i m_\psi = S_{ocb} m_i m_\psi. \quad (161)$$

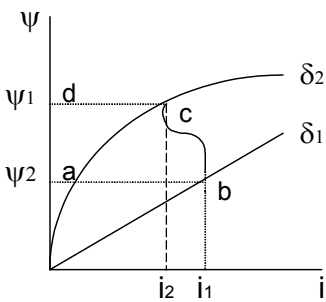


Рис.60

Согласно закону сохранения энергии это изменение должно быть равно механической работе, совершаемой движущимся якорем электромагнита на интервале

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2, \text{ т.е. } \Delta A = F \cdot \Delta\delta = \Delta W_m \quad (162)$$

где F - среднее значение тяговой силы на участке $\Delta\delta$.

Отсюда получим

$$F = \frac{\Delta W_m}{\Delta\delta} = \lim\left(\frac{\Delta W_m}{\Delta\delta}\right) = \frac{dW_m}{d\delta}. \quad (163)$$

Следовательно, для того чтобы, исходя из энергетического баланса рассчитать тяговую характеристику электромагнита, необходимо располагать семейством кривых $\psi = f(i)$, построенными для различных положений якоря и определить изменения магнитной энергии.

7.2. Методы расчета тяговой силы электромагнита.

7.2.1. Графический метод. Для расчета должно быть задано семейство магнитных характеристик $\psi = f(i)$ для нескольких положений якоря в диапазоне хода от начального зазора δ_n до конечного δ_k и установившееся значение тока в катушке. Эти зависимости определяются путем расчета магнитной цепи электромагнита.

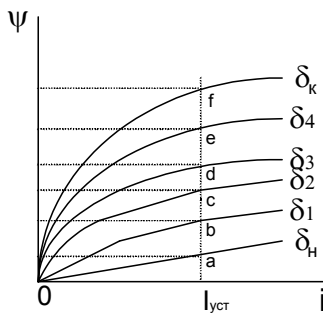


Рис.61

На интервале движения якоря $\delta_1 - \delta_n$ работа, совершенная электромагнитом будет равна ΔA . Обозначим величину перемещения $\delta_1 - \delta_n = x$, тогда $\Delta x = -\Delta\delta$, так как $\delta_n > \delta_1$.

Определим среднюю тяговую силу на этом интервале

$$F_{cp} = \frac{\Delta A}{\Delta x} = \frac{\Delta A}{-\Delta\delta} = -\frac{\Delta A}{\delta_1 - \delta_n} \quad (164)$$

или
$$F = \lim F_{cp} = \frac{dA}{dx} = -\frac{dA}{d\delta}. \quad (165)$$

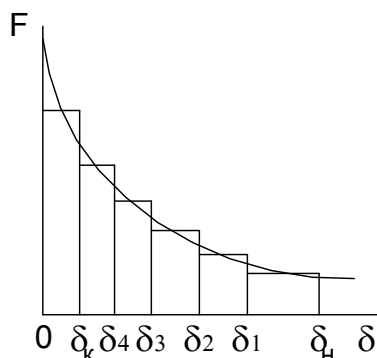
Знак (-) здесь показывает, что тяговая сила действует в сторону уменьшения воздушного зазора.

Поскольку $\Delta A_1 = S_{ob} m_i m_\psi$, то
$$F_1 = S_{ob} m_i m_\psi \frac{1}{-(\delta_1 - \delta_n)}. \quad (166)$$

На интервале $\delta_1 - \delta_2$

$$F_2 = S_{obc} m_i m_\psi \frac{1}{\delta_1 - \delta_2} \quad (167)$$

На следующих интервалах решают аналогично. Определив тяговые силы на всех интервалах от δ_n до δ_k , строят статическую тяговую характеристику электромагнита.



Статической тяговой характеристикой называется зависимость тяговой силы электромагнита от воздушного зазора при неизменном токе в катушке. Считая, что тяговая сила на границах интервала изменяется скачком, а в пределах интервала она остается

постоянной, строим ступенчатый график $F = f(\delta)$ (Рис.62.).

Затем через точки, соответствующие средним воздушным зазорам на каждом интервале $\delta_{cp1} = \frac{\delta_n + \delta_1}{2}$, $\delta_{cp2} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$ и т.д., проводим плавную линию, которая и будет

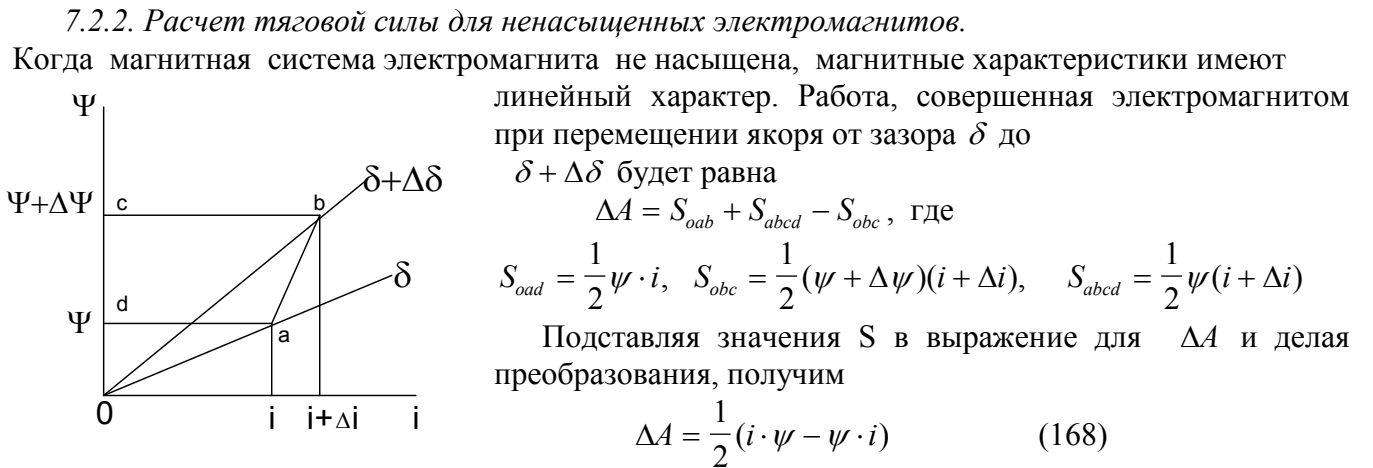


Рис.63.

Тяговая сила будет равна

$$F = \lim\left(-\frac{\Delta A}{\Delta \delta}\right) = -\frac{1}{2}\left(i \frac{d\psi}{d\delta} - \psi \frac{di}{d\delta}\right) \quad (169)$$

а) Если система работает при постоянной намагничивающей силе (т.е. $I = const$), то работа определяется по выражению

$$\Delta A = \frac{1}{2} i \cdot \psi, \text{ т.е. } dA = \frac{1}{2} i \cdot d\psi.$$

Если учесть, что $\psi = L \cdot i$ и $d\psi = L di + i dL$, тогда

$$F = -\frac{dA}{d\delta} = -\frac{1}{2} i \left(L \frac{di}{d\delta} + i \frac{dL}{d\delta} \right), \quad (170)$$

Так как $i = const$ $\frac{di}{d\delta} = 0$ тогда $F = -\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\delta}$.

Учитывая, что $L = w^2 G_m$ и $\frac{dL}{d\delta} = w^2 \frac{dG_m}{d\delta}$ тогда получим

$$F = -\frac{1}{2} (Iw)^2 \frac{dG_m}{d\delta}, \text{ Н} \quad (171)$$

где $G_m = G_\delta + \frac{2}{3} G_\sigma$. (172)

б) Если система работает при постоянном потокосцеплении (т.е. $\psi = const$), то

$$\Delta A = \frac{1}{2} \psi \cdot i \quad F = \frac{1}{2} \psi \frac{di}{d\delta}. \quad (173)$$

Так как $i = \frac{\psi}{L}$, то $\frac{di}{d\delta} = -\frac{\psi}{L^2} \frac{dL}{d\delta}$. Подставляя в выражение для силы, получим

$$F = -\frac{1}{2} \frac{\psi^2}{L^2} \frac{dL}{d\delta}. \quad (174)$$

Учитывая, что $\psi = \Phi \cdot w$, $L = w^2 G_m$ и $\frac{dL}{d\delta} = w^2 \frac{dG_m}{d\delta}$, получим

$$F = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{G_m^2} \frac{dG_m}{d\delta}. \quad (175)$$

Так как $\Phi_m = \sigma \cdot \Phi_\delta$, то

$$F = \frac{1}{2} \frac{\Phi_m^2}{\sigma^2 G_\delta^2} \frac{dG_\delta}{d\delta}. \quad (176)$$

Если не учитывать потери мдс в стали (т.е. $R_{мст}=0$), то $\frac{\Phi}{\sigma G_\delta} = Iw$, $\frac{dG_\delta}{d\delta} = \mu_0 \frac{S}{\delta^2}$.

Тогда

$$F = -(Iw)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2}. \quad (177)$$

7.2.3. Расчет тяговой силы электромагнита по формуле Максвелла.

Формула Максвелла, устанавливающая связь между значением тяговой силы и величиной магнитного потока в воздушном зазоре, а также размерами полюса электромагнита имеет вид

$$F = \frac{1}{\mu_0} \oint_S [(B_\delta n) B_\delta - \frac{1}{2} B_\delta^2 n] dS \quad (178)$$

где B_δ - вектор индукции в воздушном зазоре на поверхности полюса;

n - единичная нормаль к поверхности полюса;

S - площадь поверхности полюса.

Формула Максвелла учитывает как неравномерное распределение потока в воздушном зазоре, так и возможность неперпендикулярного направления вектора индукции к поверхности полюса.

Поверхность полюса S является поверхностью раздела двух сред с различной магнитной проницаемостью (μ_a и μ_0). Если $\mu_a \gg \mu_0$, то угол между нормалью и вектором индукции в среде с μ_0 будет небольшим, а потому с достаточной точностью можно принять, что вектор B_δ совпадает с нормалью n . В этом случае формула Максвелла приобретает более простой вид

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \int_S B_\delta^2 dS \quad (179)$$

Если индукция постоянна по всей поверхности полюса, т.е. магнитный поток равномерно распределен по воздушному зазору, то выражении (179) интеграл по площадке S можно опустить и формула Максвелла принимает вид

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 S \quad \text{Н.} \quad (180)$$

Подставляя $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, $B_\delta = \frac{B\delta}{m^2}$, S м² получим

$$F = 4,06 \cdot 10^{-7} B_\delta^2 S \quad \text{кгс.} \quad (181)$$

Равномерное распределение магнитного потока в воздушном зазоре может быть принято лишь для некоторых частных случаев, например при цилиндрических полюсах, когда $\frac{\delta}{d} \leq 0,2$, т.е., когда воздушный зазор очень мал (например, при притяннутом якоре) и магнитная цепь не насыщена, когда потоки выпучивания отсутствуют совсем, либо они малы и ими можно пренебречь.

В большинстве случаев условие равномерности распределения магнитного потока в зазоре не соблюдается. Поэтому формулой Максвелла в упрощенном виде (180) и (181) целесообразно пользоваться для ориентировочных расчетов.

7.3. Тяговые характеристики электромагнитов.

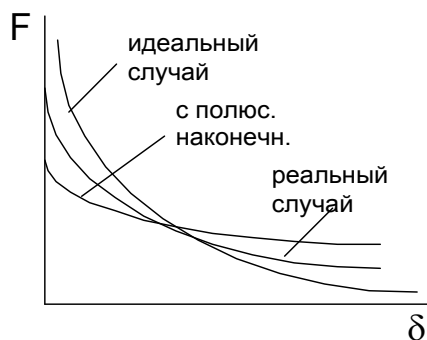
Зависимость электромагнитных тяговых усилий F_3 от величины воздушного зазора δ между якорем и сердечником при постоянной намагничивающей силе обмотки представляет собой статическую тяговую характеристику электромагнита $F_3 = f(\delta)$.

7.3.1. Электромагнит с притягивающимся якорем.

Расчет статической тяговой характеристики производится по энергетической формуле, при этом возможны два частных случая:

а) *идеальный случай*, при котором потоки выпучивания и магнитное сопротивление стали магнитопровода малы и ими можно пренебречь, т.е. $\Phi_{\text{вып}}=0$ и $R_{\text{мст}}=0$;

Тогда вся н.с. обмотки электромагнита расходуется на преодоление магнитного сопротивления воздушного зазора и на создание тяговой силы, которая будет определяться выражением



$$F_3 = \frac{1}{2}(Iw)^2 \frac{dG_\delta}{d\delta},$$

где $G_\delta = \mu_0 \frac{S}{2\delta}$ - магнитная проводимость воздушных зазоров,

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха,

S - площадь полюса, ограничивающая воздушный зазор.

Если производную магнитной проводимости определить как

$$\frac{dG_\delta}{d\delta} = \mu_0 \frac{S}{2\delta^2},$$

Рис.64.

то тяговая сила электромагнита будет равна

$$F_3 = \frac{1}{2}(Iw)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2}, \quad (182)$$

т.е. обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора. В этом случае тяговая сила при $\delta = 0$ равна бесконечности. Такая тяговая характеристика называется крутопадающей.

б) *реальный случай*, при котором учитываются потоки выпучивания и магнитное сопротивление стали магнитопровода. Тогда одна часть н.с. обмотки ($U_{\text{мб}}$) расходуется на преодоление магнитного сопротивления воздушного зазора и создание тягового усилия, а другая часть идет на преодоление магнитного сопротивления стальных участков магнитопровода ($U_{\text{мст}}$), т.е.

$$(Iw) = U_{\text{мб}} + U_{\text{мст}}. \quad (183)$$

В этом случае тяговая сила электромагнита определяется только той частью н.с., которая расходуется в воздушном зазоре, а именно $U_{\text{мб}}$

$$F_3 = \frac{1}{2}U_{\text{мб}}^2 \frac{dG_\delta}{d\delta}, \text{ Н.} \quad (184)$$

Так как потоки выпучивания должны быть учтены, то магнитная проводимость воздушного зазора определяется с учетом этих потоков одним из известных способов, например, методом Роттерса. Тяговая характеристика в этом случае имеет менее крутопадающий вид и при $\delta = 0$ тяговая сила имеет конечное значение из-за влияния насыщения магнитопровода, а в связи с наличием потоков выпучивания при больших зазорах тяговая характеристика будет выше идеальной (Рис.64.).

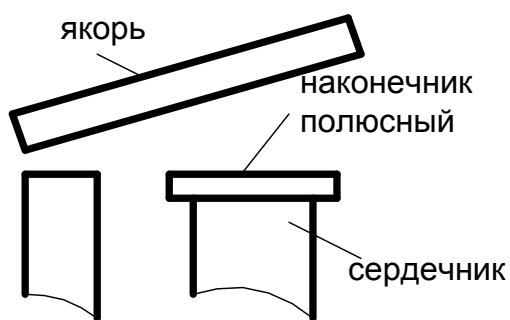


Рис.65.

Крутизну тяговой характеристики в некоторых пределах уменьшают введением полюсных наконечников. Тогда при больших воздушных зазорах магнитная цепь не насыщена

$$\text{и } \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \equiv S_{\delta} \quad \text{следовательно } F_{\delta} \equiv S_{\delta}.$$

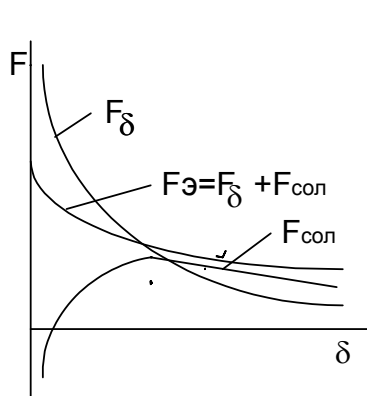
При малых воздушных зазорах магнитный поток не зависит от площади полюса потому, что он определяется насыщением стали. По формуле Максвелла

$$F_{\delta} = \frac{1}{2\mu_0} B_{\delta}^2 S_{\delta} \quad \text{или} \quad F_{\delta} = \frac{1}{2\mu_0} \frac{\Phi_{\delta}^2}{S_{\delta}} \equiv \frac{1}{S_{\delta}}, \quad \text{т.е. при}$$

малых зазорах F_{δ} обратно пропорциональна площади полюса.

7.3.2. Электромагниты с вытягивающимся якорем.

Тяговая сила такого электромагнита состоит из двух составляющих



$$\boxed{\phantom{F_{\delta} + F_{\text{сол}}}} \quad (185)$$

Здесь $U_{m\delta}$ - магнитное напряжение в воздушном зазоре,

g - удельная проводимость рассеяния,

$l_{яп}$ - расчетная длина якоря,

l_k - длина катушки,

$F_{\text{сол}}$ - соленоидная тяговая сила.

Под действием соленоидной силы тяговая характеристика

электромагнита с

вытягивающимся якорем имеет более пологий вид чем у электромагнитов с притягивающимся якорем.

7.3. Тяговые силы электромагнитов переменного тока.

Тяговая сила электромагнитов переменного тока, так же как и электромагнитов постоянного тока, может быть определена либо по формуле Максвелла, либо по формуле, полученной из анализа энергетического баланса.

Пренебрегая искажением формы кривой потока (в связи с возможным насыщением магнитопровода), можно считать, что изменение магнитного потока во времени происходит по синусоидальному закону

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (186)$$

тогда тяговая сила по формуле Максвелла будет равна

$$F = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{S} = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi_m^2}{S} \sin^2 \omega t \quad (187)$$

$$\text{но } \sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}.$$

Подставляя в формулу тяговой силы, получим

$$F = 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi_m^2}{S} - 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi_m^2}{S} \cos 2\omega t = F_m - F_m \cos 2\omega t = F' - F'' = F_m (1 - \cos 2\omega t) \quad (188)$$

Отсюда видно, что тяговая сила электромагнитов переменного тока содержит две составляющие – постоянную F' и переменную F'' . Последняя изменяется во времени по закону $\cos 2\omega t$ и имеет амплитуду, равную постоянной составляющей.

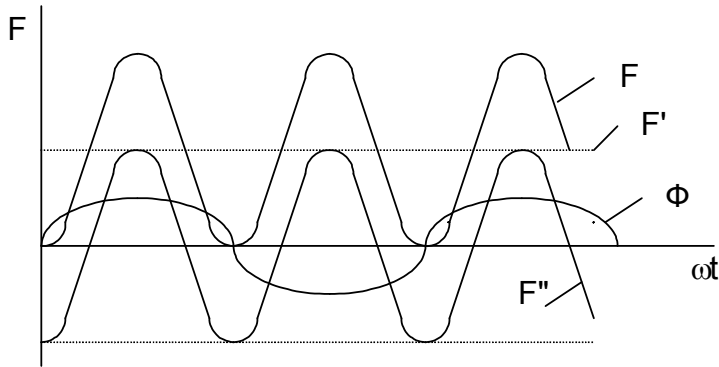


Рис.67.

Так же как и для электромагнита постоянного тока, формула Максвелла дает достаточно точные результаты лишь при малых значениях воздушного зазора, когда можно принять, что поток в зазоре распределен равномерно по поверхности полюса.

Тяговая сила электромагнита переменного тока имеет пульсирующий характер и дважды за период, когда магнитный поток равен нулю, равна нулю.

Среднее за период значение тяговой силы равно ее постоянной составляющей

$$\boxed{} \quad (189)$$

7.5. Вибрация якоря однофазных электромагнитов и способы ее устранения.

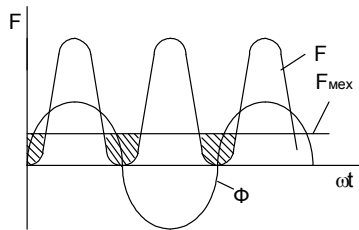


Рис.68.

Мгновенное значение тяговой силы электромагнита переменного тока дважды за период равно нулю. В эти моменты времени якорь под действием противодействующих сил $F_{мех}$ будет отходить от сердечника. Затем, когда тяговая сила вновь превысит $F_{мех}$, якорь опять притянется. Таким образом, возникает вибрация якоря, которая ускоряет износ отдельных частей электромагнита.

Устранить это нежелательное явление в однофазном электромагните переменного тока можно путем создания в воздушном зазоре между якорем и сердечником двух магнитных потоков, сдвинутых по фазе.

Принципиально такая задача может быть решена двумя способами:

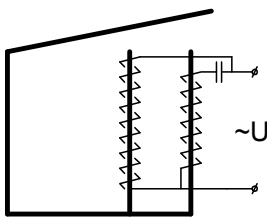


Рис.69.

- 1) расщеплением магнитопровода на две части, каждая из которых имеет свою катушку намагничивания, при этом токи в катушках не должны совпадать по фазе.

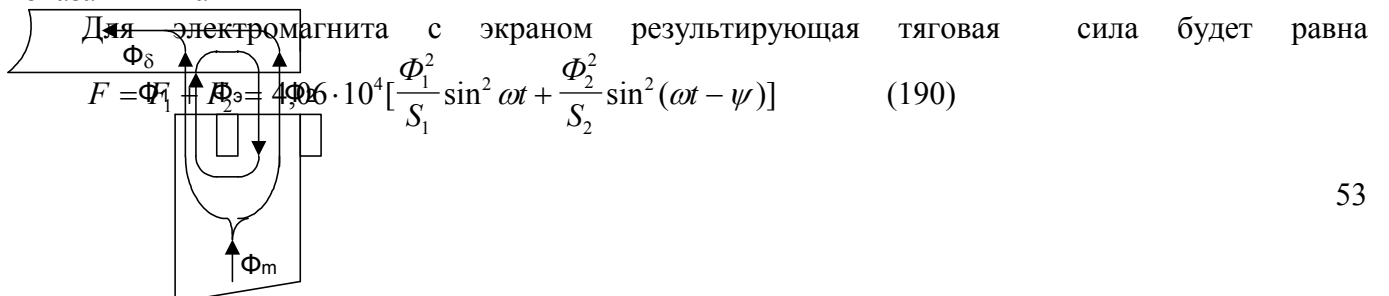
Этот способ неэкономичен и практически не применяется.

- 2) Применение экрана (короткозамкнутого витка), охватывающего часть площади торца магнитопровода в воздушном зазоре. Этот метод нашел широкое применение в однофазных электромагнитах переменного тока.

Сдвиг по фазе между потоками Φ_1 и Φ_2 возникает в связи с появлением в зазоре потока экрана Φ_3 .

$$\Phi_2 = \Phi_{20} + \Phi_3$$

Здесь Φ_{20} – поток, протекающий по охваченной экраном площади полюса при $r_3 = \infty$, он совпадает по фазе с потоком Φ_1 . Векторная диаграмма электромагнита с экраном имеет вид, показанный на



или



(191)

где $F' = 2,03 \cdot 10^4 \left(\frac{\Phi_1^2}{S_1} + \frac{\Phi_2^2}{S_2} \right)$ - постоянная составляющая силы;

Рис.70.

$F'' = 2,03 \cdot 10^4 \left[\frac{\Phi_1^2}{S_1} \cos 2\omega t + \frac{\Phi_2^2}{S_2} \cos(2\omega t - 2\psi) \right]$ - переменная

составляющая силы.

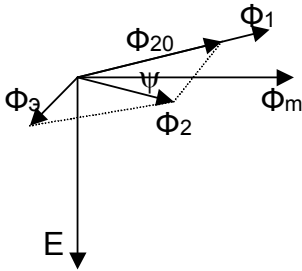


Рис.71.

Из формулы (191) видно, что переменная составляющая будет равна нулю лишь при условиях, что $\Phi_1 = \Phi_2$ и угол $\psi = 90^\circ$. Последнее условие практически невыполнимо и поэтому результирующая тяговая сила электромагнита с экраном будет также пульсирующей, как и при отсутствии экрана, но минимальное значение силы будет больше нуля. Максимальное и минимальное значение тяговой силы будут равны:

$$F_{\max} = F' + F''_a \quad F_{\min} = F' - F''_a$$

Амплитуда результирующей пульсирующей тяговой силы F''_a равна диагонали параллелограмма, сторонами которого являются векторы переменных составляющих сил, созданных потоками Φ_1 и Φ_2 .

$$F''_a = \sqrt{F_1''^2 + F_2''^2 + 2F_1''F_2'' \cos 2\psi} \quad (192)$$

где $F_2'' = F_2' = 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi_2^2}{S_2}$

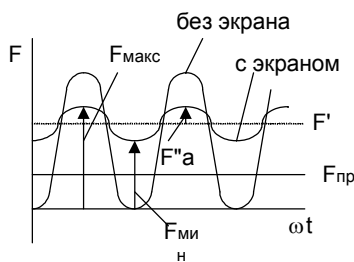
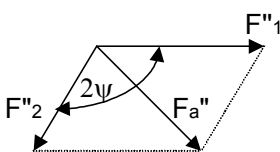


Рис72

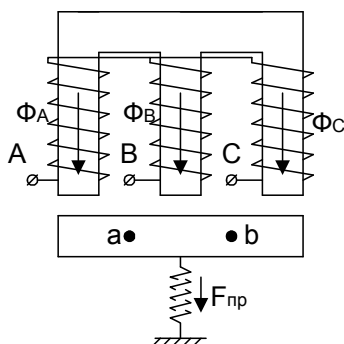
Для электромагнитов переменного тока наиболее важной величиной является F_{\min} . Избежать вибрации якоря можно лишь при условии $F_{\min} > F_{\text{пр}}$. Нетрудно установить, что величина F_{\min} в значительной степени зависит от площади, охваченной экраном и его активного сопротивления r_3 .



- Если
- 1) $S_2 = 0$ - экран отсутствует, то $F_{\min} = 0$;
 - 2) $S_2 = S$ - экран охватывает весь полюс, то $F_{\min} = 0$;
 - 3) $r_3 = \infty$ - это условие равноценно отсутствию экрана, тогда $F_{\min} = 0$;
 - 4) $r_3 = 0$ - магнитные потоки Φ_{20} и Φ_3 будут сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180° , а поток Φ_2 будет совпадать по фазе с потоком Φ_1 : угол $\psi = 0$ и $F_{\min} = 0$.

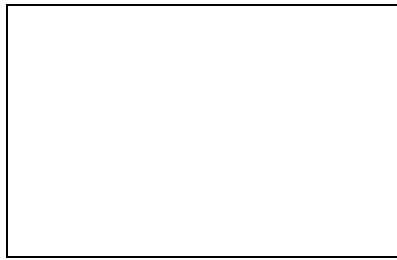
7.6. Трехфазный электромагнит.

Трех фазный электромагнит можно рассматривать как три однофазных, токи в которых сдвинуты друг относительно друга на 120° . Такой же сдвиг имеют и магнитные потоки в магнитоприводе.



$$\begin{aligned} \Phi_A &= \Phi_m \sin \omega t; & \Phi_B &= \Phi_m \sin(\omega t - 120); \\ \Phi_C &= \Phi_m \sin(\omega t - 240); \end{aligned} \quad (193)$$

Если допустить, что в магнитном отношении все три фазы симметричны и насыщение отсутствует, то величина силы, развиваемой под каждым полюсом, будет равна



(194)

Результирующая сила, действующая на якорь равна сумма этих сил

$$F = \frac{3}{2} F_m = const. \quad (195)$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако и в этом электромагните вибрация полностью не устраняется. При прохождении потока в каждой фазе через ноль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения равнодействующей электромагнитной силы оставшихся двух фаз перемещается между точками а и b (рис.73). Поскольку точка приложения противодействующей силы $F_{пр}$ неизменна, то возникает перекачивание якоря, т.е. вибрация. Устраняется такая вибрация путем укорочения среднего стержня.

У трехфазных электромагнитов результирующая сила на якоре в 1,5 раза больше максимальной и в 3 раза больше средней силы однофазного электромагнита.

7.7. Механические характеристики электромагнитных механизмов.

Одной из важнейших функций электромагнитных механизмов является создание электромагнитной силы необходимой для преодоления механических усилий, создаваемых со стороны приводных механизмов.

Результирующая механическая сила может складываться из отдельных составляющих, обусловленных различными факторами, присущими конкретному устройству, в котором применяется электромагнитный механизм. Так, например, механическая сила, действующая на якорь электромагнита реле, будет складываться из следующих составляющих: силы противодействующей пружины, силы контактных пружин, силы трения подвижных частей о детали корпуса, силы, создаваемой весом подвижных частей.

Зависимость механической силы от хода якоря или от воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита называется механической характеристикой

Для примера построим механическую характеристику одноконтактного реле (Рис.74).

Здесь $F_{пр}$ – сила противодействующей пружины;

$F_{в}$ – сила, создаваемая весом подвижных частей и трением;

$F_{к}$ – сила контактной пружины.

Раствор контактов – максимальное расстояние между контактами при отпущенном якоре.

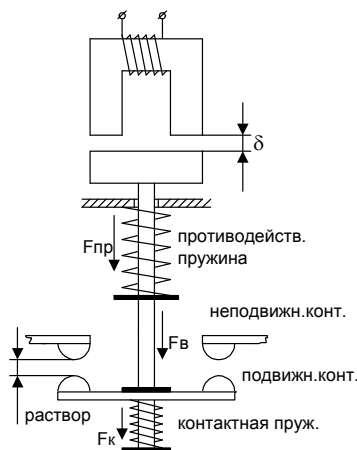
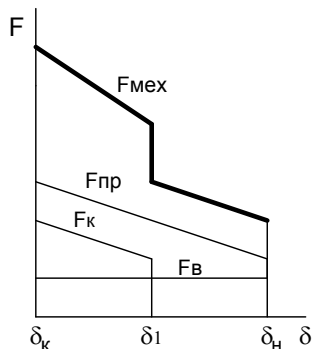


Рис. 74

Провал контактов – расстояние, на которое переместится подвижный контакт при притянутом якоре, если убрать неподвижный контакт.



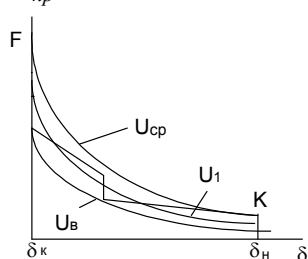
7.8. Согласование тяговых и механических характеристик электромагнитов.

Рассмотрим работу электромагнитного механизма реле постоянного тока, имеющего простейшую клапанную систему и одну пару замыкающих контактов (например, по рис.74). Основным условием согласования тяговых и

Рис.75 механической характеристик является превышение тяговых усилий над механическими на всем ходе подвижных частей, т.е. тяговая характеристика должна располагаться выше механической.

Рассмотрим процесс повышения напряжения на катушке электромагнита. При некотором малом напряжении U_1 у которой усилие электромагнита будет меньше противодействующего усилия

$$F_{\text{э}} = F_{\text{пр}}.$$



При напряжении $U_2 > U_1$ тяговая сила электромагнита при больших зазорах меньше противодействующей, а при малых зазорах больше противодействующей силы. При таком согласовании электромагнит не срабатывает, так как при начальном зазоре не выполняется условие срабатывания, т.е. $F_{\text{э}} < F_{\text{пр}}$.

При напряжении U_3 тяговая характеристика совпадает с механической в начальной точке K (при δ_n), т.е. $F_{\text{э.нач}} = F_{\text{пр.нач}}$, а во

всех

Рис.76 остальных точках $F_{\text{э}} > F_{\text{пр}}$. Точка K называется критической точкой, в которой наблюдается неустойчивое равновесие тяговой и механической сил. Отклонение от равновесия при любом уменьшении воздушного зазора может быть только при действии избыточной тяговой силы

$$F_{\text{изб}} = F_{\text{э}} - F_{\text{пр}} > 0$$

Под действием избыточной тяговой силы якорь электромагнита получает ускорение в сторону уменьшения воздушного зазора и скачком переходит из начального положения в конечное. Это называется процессом срабатывания электромагнита.

Таким образом, напряжение U_3 есть минимальное напряжение, необходимое для срабатывания электромагнита и называется оно напряжением срабатывания.

При номинальном напряжении тяговая характеристика пойдет еще выше на всем ходе якоря. В этом случае условия срабатывания обеспечиваются с определенным запасом, т.е. независимо от действия случайных факторов.

$$U_n = K_3 U_{cp} \quad \text{отсюда} \quad K_3 = U_n / U_{cp} > 1$$

K_3 - коэффициент запаса.

Вместо напряжения можно рассматривать ток I или м.д.с. (Iw).

$$I_{cp} = \frac{U_{cp}}{R_k(Z_k)}; \quad (Iw)_{cp} = I_{cp} w; \quad (Iw)_n = I_{cp} w; \quad (195)$$

$$I_n = \frac{U_n}{R_k(Z_k)}$$

Рассмотрим уменьшение напряжения от U_n до 0. Пока левый конец тяговой характеристики лежит выше механической якорь остается в притянутом состоянии. При этом правая часть тяговой характеристики может лежать ниже механической, но отпуская якоря не будет, так как $\delta = \delta_k$.

В точке M левые концы тяговой и механической характеристик совпадут. Тогда $F_{\text{э.кон}} = F_{\text{пр.кон}}$.

В точке M наступает неустойчивое равновесие и при случайном увеличении зазора противодействующая сила становится больше тяговой силы, и она скачком возвращает якорь в начальное положение. Это называется процессом возврата электромагнита

Напряжение, при котором тяговая характеристика лежит ниже механической на всем ходе якоря от начального до конечного зазора и имеет с ней общую точку M при конечном зазоре δ_k есть максимальное напряжение, при котором возможен возврат и называется напряжением возврата $U_{\text{в}}$.

7.8. Расчет параметров срабатывания и возврата.

Исходя из согласования тяговой и механической характеристик, можно утверждать, что срабатывание электромагнита произойдет при таких параметрах срабатывания, при которых будет выполнено условие срабатывания на интервале движения якоря в пределах

$$\delta_k \leq \delta \leq \delta_n \quad F_{\text{я}} \geq F_{\text{мех}}$$

На основании этого условия можно записать, что

$$\text{при } \delta = \delta_{\text{кр}} \quad F_{\text{я}} = F_{\text{мех}}$$

где $\delta_{\text{кр}}$ - критический воздушный зазор, при котором тяговая сила равна противодействующей механической силе. Если это условие выполняется при $\delta = \delta_n$, то тогда $\delta_{\text{кр}} = \delta_n$.

Подставив значение тяговой силы по энергетической формуле, получим

$$-\frac{1}{2}(Iw)^2 \frac{dG_{\delta_{\text{кр}}}}{d\delta} = F_{\text{мех}} \quad (196)$$

Учитывая, что срабатывание происходит при параметре срабатывания, найдем его

$$(Iw)_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2F_{\text{мех}}}{\frac{dG_{\delta_{\text{кр}}}}{d\delta}}} \quad (197)$$

Аналогичные рассуждения по отношению к процессу возврата электромагнита дают условие возврата, а именно

$$\delta_k \leq \delta \leq \delta_n \quad F_{\text{я}} \leq F_{\text{мех}}$$

Тогда при $\delta = \delta_k \quad F_{\text{я}} = F_{\text{мех}}$.

Так как при конечном зазоре магнитный поток определяется не площадью полюса, а насыщением магнитопровода (см. выше), то применяя формулу Максвелла, можно записать

$$\frac{1}{2\mu_0} \frac{\Phi_{\delta}^2}{S_{\delta}} = F_{\text{мех}} \quad (198)$$

отсюда находим

$$\Phi_{\delta} = \sqrt{2\mu_0 S_{\delta} F_{\text{мех}}} \quad (199)$$

Так как магнитная цепь насыщена, то

$$\Phi_{\delta} = \mu_{\text{ст}} H_{\text{ст}} S_{\text{ст}} \quad (200)$$

Здесь G_{δ} - магнитная проводимость конечного воздушного зазора,

$H_{\text{ст}}$ - напряженность магнитного поля в стальных участках магнитной цепи;

$l_{\text{ст}}$ - средняя длина магнитной силовой линии на стальных участках магнитопровода.

Напряженность магнитного поля определяется из кривой размагничивания по

$$B_{\text{ст}} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}}$$

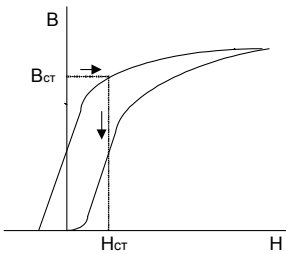
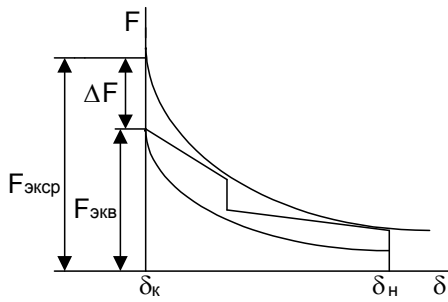


Рис.77

7.10. Коэффициент возврата и способы его повышения.

Коэффициент возврата определяется отношением параметра отпущения к параметру срабатывания.



$$K_{\epsilon} = \frac{U_{\epsilon}}{U_{\text{ср}}} = \frac{I_{\epsilon}}{I_{\text{ср}}} = \frac{(Iw)_{\epsilon}}{(Iw)_{\text{ср}}} < 1 \quad (201)$$

Обычно $K_{\epsilon}=0,1 - 0,95$ в зависимости от назначения и конструкции электромагнита. Для контакторов и тормозных электромагнитов K_{ϵ} низкий, в реле защиты K_{ϵ} большой.

$$F_{\text{экр}} = \frac{1}{2\mu_0} \frac{\Phi_{\text{экр}}^2}{S_{\delta}} \quad \text{при } U_{\text{ср}}$$

Рис.78.

$$F_{\text{экр}} = F_{\text{пр.к}} = \frac{1}{2\mu_0} \frac{\Phi_{\text{экр}}^2}{S_{\delta}}$$

при U_{ϵ}

где $\Phi_{\text{экр}}$ и $\Phi_{\text{пр.к}}$ - потоки срабатывания и возврата при конечном зазоре.

Если пренебречь насыщением магнитопровода, то можно записать

$$\frac{\Phi_{\text{экр}}}{\Phi_{\text{пр.к}}} = \frac{(Iw)_{\epsilon}}{(Iw)_{\text{ср}}} = \frac{U_{\epsilon}}{U_{\text{ср}}} = K_{\epsilon} \quad (202)$$

В то же время

$$\frac{F_{\text{экр}}}{F_{\text{пр.к}}} = \frac{\Phi_{\text{экр}}^2}{\Phi_{\text{пр.к}}^2} \quad \text{отсюда} \quad K_{\epsilon} = \frac{\Phi_{\text{экр}}}{\Phi_{\text{пр.к}}} = \sqrt{\frac{F_{\text{экр}}}{F_{\text{пр.к}}}} \quad (203)$$

Но из рис.78 видно, что

$$F_{\text{экр}} = F_{\text{пр.к}} = F_{\text{экр}} - \Delta F \quad (204)$$

Тогда

$$K_{\epsilon} = \sqrt{\frac{F_{\text{экр}} - \Delta F}{F_{\text{экр}}}} = \sqrt{1 - \frac{\Delta F}{F_{\text{экр}}}} \quad (205)$$

Отсюда видно, что K_{ϵ} будет тем ближе к 1 чем ближе будут лежать точки M и N , т.е. чем меньше ΔF . Следовательно, для повышения K_{ϵ} необходимо сближать тяговую и механическую характеристики. Это можно сделать следующими способами.

1) Повысить жесткость противодействующей и контактных пружин (Рис.79).

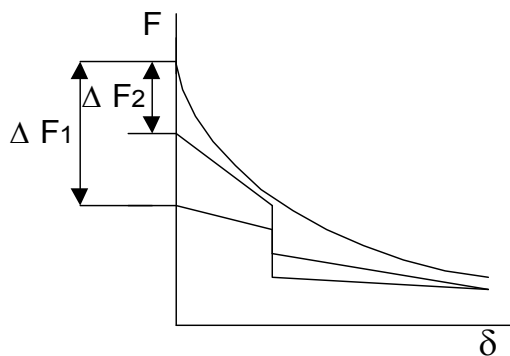


Рис.79

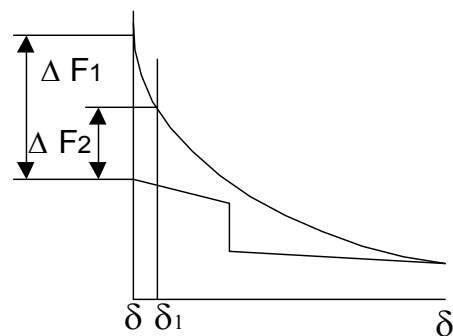


Рис.80

$$K_{\epsilon 2} > K_{\epsilon 1} \quad \text{т.к.} \quad \Delta F_2 < \Delta F_1$$

2) Применить электромагнит с более пологой тяговой характеристикой. По этой причине электромагниты переменного тока имеют более высокий K_{ϵ} . Соленоидные электромагниты также имеют более высокий K_{ϵ} чем электромагниты с прилегающим якорем.

3) Повысить K_{ϵ} можно путем увеличения конечного воздушного зазора (Рис.80).

Глава 8. КАТУШКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

8.1. Конструкция катушек.

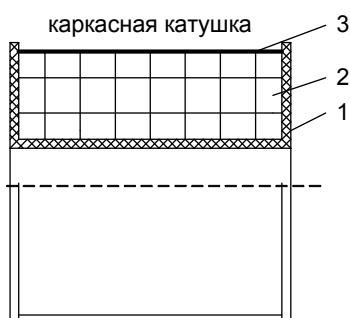
Катушка является одним из основных элементов электромагнита. Она служит для создания магнитного потока с необходимой намагничивающей силой.

В зависимости от способа подключения катушек они подразделяются на катушки параллельного и последовательного включения. Способ включения их в цепь влияет на параметры катушек.

Последовательные катушки, работающие при заданном токе, выполняются с малым числом витков проводом большого сечения. Они обтекаются током, величина которого определяется потребителями, включенными последовательно с обмоткой, и практически не зависит от параметров самой катушки.

Параллельные катушки, работающие при заданном напряжении, выполняются с большим числом витков проводом малого сечения. Ток в такой обмотке определяется целиком ее параметрами.

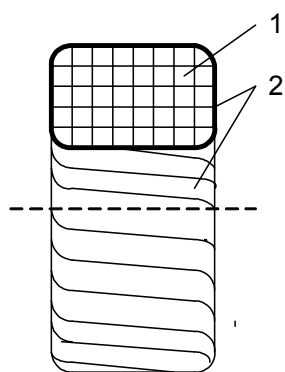
Катушки с малым сечением проводов наматываются из провода круглого сечения. Если сечение провода больше 3 мм^2 , то применяется провод прямоугольного сечения. При больших токах катушки наматываются из шины.



По роду тока катушки делятся на катушки постоянного и переменного тока. Основное их отличие друг от друга заключается в количестве витков. При одной и той же величине питающего напряжения катушки переменного тока имеют меньшее число витков из-за наличия в них кроме активного еще и индуктивного сопротивления.

В зависимости от конструктивного исполнения различают

Рис.81 катушки: каркасные, бескаркасные и катушки, наматываемые непосредственно на сердечник. Провод 2 каркасной катушки наматывается на изоляционный каркас 1, выполненный из пластмассы путем пресования. Наружная поверхность катушки покрывается



слоем изоляции, например, из лакоткани или стеклолакоткани. Каркасная катушка чаще всего не подвергается пропитке лаком. Достоинством каркасных катушек является жесткость конструкции, провод хорошо защищен от механических повреждений. Недостатком является то, что в таких катушках плохо отводится тепло от торцевых поверхностей.

Бескаркасная катушка (Рис.82) наматывается на съемный шаблон, затем изолируется ленточной изоляцией 2 и пропитывается лаком. После печной сушки катушка приобретает монолитность и достаточно высокую механическую прочность.

Достоинства - малый расход изоляционных материалов и хорошая теплоотдача с внутренней и боковых поверхностей.

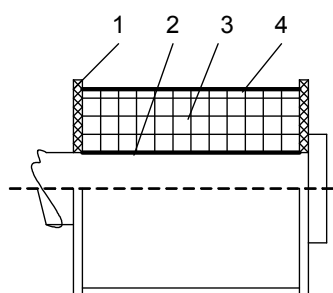


Рис.82 Катушка, наматываемая непосредственно на сердечник (сердечник круглый) (рис.83). На сердечник одеваются два изоляционных кольца 1, между ними укладывается слой изоляции 2, на который укладывается обмоточный провод 3. Внешняя поверхность

катушки изолируется слоем изоляции 4. Для придания катушке необходимой жесткости, а также для повышения электрической прочности ее пропитывают лаком и сушат.

Готовая катушка снабжается табличкой с обмоточными данными и номинальными величинами.

Бескаркасные катушки могут быть пропитаны компаундом - премиксом, что придает ей высокую механическую и электрическую

Рис.83 прочность.

8.2. Коэффициенты заполнения катушки и обмотки.

Очевидно, что в любой катушке площадь сечения меди из-за наличия воздушных прослоек и изоляции всегда меньше, чем общая площадь сечения катушки. Отношение этих площадей называется коэффициентом заполнения катушки

$$K_{зк} = \frac{S_M}{S_K} \quad (206)$$

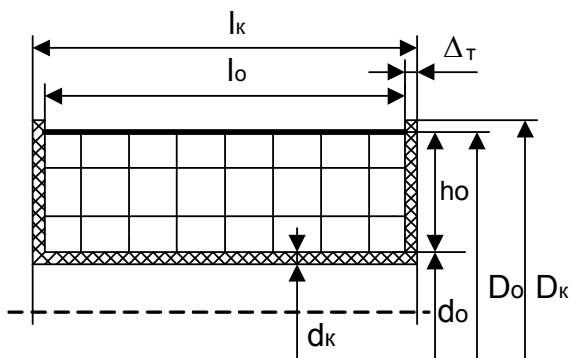


Рис.84.

где S_M и S_K - площади сечения меди и катушки.

Для катушки цилиндрической формы из круглого провода

$$S_M = \frac{\pi d^2 w}{4}, \quad S_K = \frac{D_K - d_K}{2} \cdot l_K \quad (207)$$

Подставляя в коэффициент заполнения катушки, получим

$$\boxed{\phantom{K_{зк} = \frac{\pi d^2 w}{4(D_K - d_K) l_K}}} \quad (208)$$

$$h_K = \frac{D_K - d_K}{2}$$

где d - диаметр голого провода, см;

w - число витков обмотки.

Коэффициент заполнения катушки зависит от многих факторов - профиля сечения провода, толщины и вида изоляции провода и катушки, качества намотки, диаметра провода и т.д. Если при определении площади катушки не учитывать толщину внешней изоляции (каркас, бандаж), то получим коэффициент заполнения обмотки

$$K_{зо} = \frac{\pi d^2 w}{2 l_o (D_o - d_o)} = \frac{\pi d^2 w}{4 l_o h_o} \quad (209)$$

$$\text{где } h_o = h_K - (\Delta_{вн} + \Delta_{н}); \quad l_o = l_K - 2\Delta_m$$

$\Delta_n, \Delta_{вн}, \Delta_m$ - толщина изоляции наружной, внутренней и торцевой поверхностей катушки, см.

Связь между коэффициентами заполнения катушки и обмотки следующая

$$K_{зк} = K_{зо} \frac{l_o h_o}{l_K h_K} \quad (210)$$

Коэффициент заполнения обмотки всегда больше коэффициента заполнения катушки. Он зависит от качества укладки, диаметра провода и толщины межслойной изоляции. Если качество укладки учесть коэффициентом K_y , то можно выразить коэффициент заполнения обмотки так

а) для круглого провода без межслойной изоляции

$$K_{zo} = K_y \frac{\pi d^2}{4d_u^2} \quad (211)$$

d_u - диаметр провода с изоляцией, см.

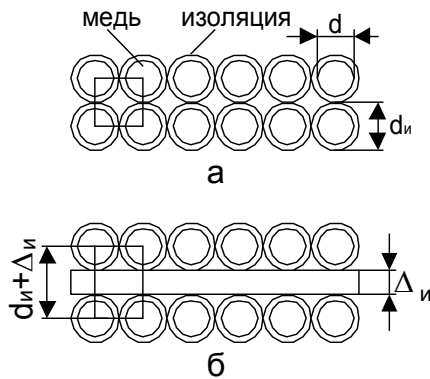


Рис.85

витков; для этого вида намотки

Таким образом, коэффициент заполнения обмотки есть отношение площади, занимаемой медью к площади квадрата на рис.85, а.

б) для круглого провода с межслойной изоляцией (рис.85,б)

$$K_{zo} = K_y \frac{\pi d^2}{4d_u(d_u + \Delta_u)} \quad (212)$$

где Δ_u - толщина межслойной изоляции.

Коэффициент укладки зависит от способа намотки обмотки. Различают три вида намотки:

1) неравномерная (дикая) намотка, которая производится без специальных приспособлений для укладки

$$K_y = 0,7 \div 0,9$$

2) рядовая намотка, при которой витки одного слоя укладываются плотно друг к другу, а витки двух смежных слоев располагаются один над другим; для такой намотки (Рис.85,а)

$$K_y = 0,9 \div 0,95$$

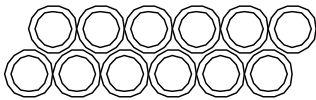


Рис.86

3) шахматная намотка, при которой витки верхнего слоя укладываются в промежутки между витками нижнего слоя (рис.86);

$$\text{для данной намотки} \quad K_y = 0,95 \div 1,05$$

Коэффициент заполнения обмотки зависит от соотношения толщины изоляции и толщины провода

$$K_{zo} = K_y \frac{\pi}{4(1 + \frac{\delta_{uz}}{d})^2} \quad \text{при} \quad \Delta = 0. \quad (213)$$

Здесь δ_{uz} - толщина витковой изоляции;

Отношение $\frac{\delta_{uz}}{d}$ уменьшается с увеличением d , поэтому K_{zo} с ростом диаметра провода увеличивается и зависит от марки провода, от качества намотки (через K_y) от натяжения провода, настройки намоточного станка, от наличия прокладок.

Значения коэффициента заполнения обмотки от различных факторов приводятся в справочной литературе.

8.3. Параметры катушки.

К параметрам катушки относятся активное и индуктивное сопротивление для катушек переменного тока и омическое сопротивление катушек постоянного тока.

Активное или омическое сопротивление

$$R = \rho \frac{L}{S_{np}}, \quad (214)$$

где ρ - удельное сопротивление материала провода;

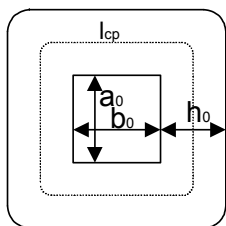
$L = l_{cp} w$ - общая длина провода катушки;

l_{cp} - средняя длина витка катушки;

w - число витков катушки;
 S_{np} - площадь сечения провода.

Средняя длина витка определяется в зависимости от конструкции катушки так:

1) для катушки цилиндрической формы (Рис.81)



$$l_{cp} = \pi D_{cp}; \quad D_{cp} = \frac{D_0 + d_0}{2}; \quad h_0 = \frac{D_0 - d_0}{2}; \quad (215)$$

2) для катушки прямоугольной формы (рис.87)

$$l_{cp} = 2(a_0 + b_0) + \pi \cdot h_0. \quad (216)$$

где a_0 , b_0 и h_0 - размеры обмотки (без каркаса).

Итак активное сопротивление катушки будет равно

Рис. 87

$$R = \rho \frac{l_{cp} w}{S_{np}} \quad (217)$$

Удельное сопротивление материала провода принимается равным значению, соответствующему рабочей температуре катушки, если сопротивление катушки определяется в нагретом состоянии.

Иногда сопротивление катушки выражают через размеры обмотки, например:

$$S_{np} = \frac{h_0 l_0 K_{30}}{w}; \quad R = \rho \frac{l_{cp}}{h_0 l_0 K_{30}} w^2 = C_R w^2, \quad (218)$$

где $C_R = \rho \frac{l_{cp}}{l_0 h_0 K_{30}}$ - активное сопротивление катушки, приведенное к одному витку.

Индуктивное сопротивление катушки

$$X = \omega L = \omega w^2 G_m \quad \text{или} \quad X = C_x w^2, \quad (219)$$

где $C_x = \omega G_m$ - индуктивное сопротивление, приведенное к одному витку;

G_m - магнитная проводимость магнитной цепи.

8.4. Расчет катушек постоянного тока.

В результате расчета магнитной цепи определяется магнитный поток, создаваемый катушкой или ее намагничивающей силой. Катушка должна быть рассчитана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить требуемую н.с., а с другой - чтобы максимальная температура обмотки не превышала допустимую температуру для данного класса нагревостойкости изоляции. Это условие обеспечивается соответствующим выбором размеров катушки.

А) Расчет параллельной катушки. Для расчета катушки должны быть заданы: размеры окна под катушку (из проектного расчета электромагнита), намагничивающая сила (из расчета магнитной цепи) и напряжение питания. Необходимо определить площадь сечения провода S_{np} , число витков катушки w , сопротивление R , ток I , мощность потерь P , перегрев θ .

$$(Iw) = \frac{U}{R} w = \frac{U S_{np}}{\rho \cdot l_{cp}} w, \quad (220)$$

отсюда
$$S_{np} = \frac{(Iw) \rho \cdot l_{cp}}{U}, \quad (221)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 S_{np}}{\pi}}. \quad (222)$$

После этого по таблице стандартных проводов выбирается ближайший больший диаметр провода и уточняется площадь сечения провода. Определяется коэффициент заполнения обмотки

по графикам, по таблицам или по формуле с учетом марки провода. Затем определяется число витков обмотки

$$w = \frac{h_0 l_0 K_{zo}}{S_{np}}, \text{ где } h_0 \text{ и } l_0 - \text{размеры обмотки по рис.84.}$$

Определяется сопротивление $R = \rho \frac{l_{cp} w}{S_{np}},$ (223)

ток $I = \frac{U}{R},$ намагничивающая сила $(Iw) = I \cdot w,$
 мощность . (224)

Перегрев обмотки над температурой окружающей среды

$$\theta = \frac{P}{K_{mo} S_{охл}},$$
 (225)

где K_{mo} - коэффициент теплоотдачи с поверхности катушки;
 $S_{охл}$ - поверхность охлаждения.

При изменении питающего напряжения и сохранении размера окна под обмотку должно иметь место равенство

$$U_1 S_{np1} = U_2 S_{np2}$$
 (226)

так как ρ и l_{cp} остаются неизменными. При этом намагничивающая сила останется также неизменной. Поскольку при переходе от одного напряжения на другое изменяется диаметр провода (а следовательно, толщина изоляции) коэффициент заполнения обмотки также меняется в следующем соотношении

$$P_1 \cdot K_{zo1} = P_2 \cdot K_{zo2}$$
 (227)

Если $U_1 < U_2,$ то при переходе от напряжения U_1 на напряжение U_2 диаметр провода уменьшается. При меньшем диаметре провода из-за возросшей относительной толщины изоляции коэффициент заполнения обмотки уменьшается. Следовательно, при переходе на более высокое напряжение мощность, потребляемая катушкой, увеличивается.

Б. Расчет последовательной катушки.

Для расчета последовательной катушки должно быть задано: намагничивающая сила $(Iw),$ размеры окна под обмотку h_0 и $l_0,$ ток $I.$ Рассчитать: площадь сечения провода, диаметр провода, число витков.

$$w = \frac{(Iw)}{I}; \quad S_{np} = \frac{l_0 h_0 K_{zo}}{w}; \quad d = \sqrt{\frac{4 S_{np}}{\pi}}.$$

Здесь коэффициентом заполнения обмотки предварительно задаются и уточняют его методом последовательных приближений.

Если размеры катушки неизвестны, то можно сечение провода найти через плотность тока, задавая ей в пределах $j = 2 \div 4 \text{ А/мм}^2$ для продолжительного режима работы, или $j = 10 \text{ А/мм}^2$ - для кратковременного.

Расчет мощности и превышения температуры производится так же, как и для параллельной катушки.

В. Расчет катушек электромагнитов переменного тока.

Исходными данными для расчета *параллельной* катушки является амплитуда намагничивающей силы, амплитуда потока и напряжения.

Уравнение равновесия напряжения на катушке можно записать так

$$U^2 = (IR)^2 + (4,44fw\Phi_m)^2 \quad (228)$$

Так как активное падение напряжения в параллельных катушках значительно меньше реактивного, то в начале расчета можно положить $IR=0$. Тогда число витков обмотки равно

$$\boxed{}, \quad (229)$$

где f - частота сети.

Так как при расчете числа витков пренебрегается активным падением напряжения, действительное число витков должно быть несколько меньше и определяется по уравнению

$$w = w' \frac{C_X}{\sqrt{C_X + C_R}}, \quad (230)$$

где $C_X = \omega G_m$, $C_R = \rho \frac{l_{cp}}{h_0 l_0 K_{zo}}$ (из §8.3).

Ток определяется из выражения $I = \frac{(Iw)_m}{\sqrt{2} \cdot w}$ (231)

Коэффициентом заполнения обмотки предварительно задаются.

Площадь сечения провода

$$S_{np} = \frac{h_0 l_0 K_{zo}}{w}, \text{ диаметр провода } d = \sqrt{\frac{4S_{np}}{\pi}}.$$

Выбрав стандартный диаметр провода и его марку (т.е., изоляцию), а также способ укладки K_y , толщину межслойной изоляции (если необходимо), уточняют коэффициент заполнения обмотки, сечение S_{np} и диаметр провода d_{np} .

$$K_{zo} = \frac{\pi d^2 K_y}{4d_u (d_u + \Delta_u)}.$$

Сопротивление обмотки:

активное $R = \rho \frac{l_{cp} w}{S_{np}}$, индуктивное $X = C_X w^2$, результирующее $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$. (232)

Если полное сопротивление обмотки электромагнита переменного тока Z при любом значении воздушного зазора меньше полного сопротивления цепи (последовательная катушка), то величина тока в обмотке не зависит от положения якоря. Расчет таких обмоток ведется так же как и для последовательных обмоток постоянного тока. Закон изменения потока в рабочем зазоре такого электромагнита аналогичен закону в электромагните постоянного тока, поскольку электромагнит работает при постоянной н.с. катушки.

Если электромагнит с параллельной катушкой питается от источника с другим напряжением и сила тяги должна остаться той же, то обмоточные данные должны быть соответственно изменены. Величина н.с. и угол сдвига между током и напряжением при этом также считаются неизменными. Должны быть соблюдены следующие соотношения

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad U_1 S_{np1} = U_2 S_{np2}, \quad S_{01} K_{zo1} = S_{02} K_{zo2}, \quad (233)$$

где S_{01} и S_{02} - площади окон под обмотку.

Полная мощность обмотки при переходе с одного напряжения на другое при соблюдении указанных условий не изменяется, так как $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Глава 9. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

9.1. Общие сведения.

До сих пор рассматривались тяговые характеристики электромагнитов при заданных значениях воздушных зазоров и неизменных значениях намагничивающей силы. Такие характеристики носят название статических характеристик. Однако законы изменения тока и потока в зависимости от зазора при неподвижном якоре и при его движении отличаются друг от друга.

Для электромагнита в любой момент времени справедливо уравнение равновесия напряжений следующего вида

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (234)$$

Если не учитывать насыщение стальных участков магнитной цепи, то при неподвижном якоре (до начала движения) магнитная проводимость зазора G_δ не изменяется, следовательно,

$L = const$ и $\frac{dL}{dt} = 0$. Тогда уравнение (234) имеет вид

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (235)$$

При движении якоря $G_\delta = f(\delta)$, следовательно, индуктивность L также будет изменяться и тогда $\frac{dL}{dt} \neq 0$.

На работу электромагнита оказывают влияние также вихревые токи и явления гистерезиса, которые возникают при изменении тока в катушке.

Характеристики электромагнитов, полученные с учетом всех этих факторов, называются динамическими характеристиками. Они определяют процессы, которые происходят в электромагнитах при неустановившихся режимах. Динамика занимается исследованием процессов срабатывания и возврата электромагнитов во времени. Это необходимо для расчета времени срабатывания и отпущения.

За время срабатывания электромагнитов принимают продолжительность действия от момента подачи импульса срабатывания до момента окончания перемещения якоря из одного крайнего положения в другое. Это время можно разделить на две составляющие: время трогания и время движения

$$t_{cp} = t_{mp} + t_{oe} \quad (236)$$

Временем трогания называется промежуток времени от момента подачи импульса срабатывания до момента начала движения якоря.

Временем движения называется промежуток времени от начала движения якоря до полной его остановки.

9.2. Процесс срабатывания электромагнита постоянного тока.

Для электромагнита с параллельно подключаемой к источнику питания катушкой справедливо уравнение (234), а именно

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt} = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}.$$

До начала движения якоря $\delta = const$ и $L = const$, $\frac{dL}{dt} = 0$, а зависимость $\frac{d\psi}{dt}$ имеет линейный характер. Следовательно, $\frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$ и уравнение (234) принимает вид

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (237)$$

решением этого уравнения будет

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad \text{или} \quad i = I_e(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (238)$$

где $I_e = \frac{U}{R}$ - установившееся значение тока в катушке;

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

Таким образом, при включении электромагнита на постоянное напряжение и при подвижном якоре ток в катушке возрастает по экспоненциальному закону. По мере нарастания тока возрастает тяговое усилие в воздушном зазоре, действующее на якорь.

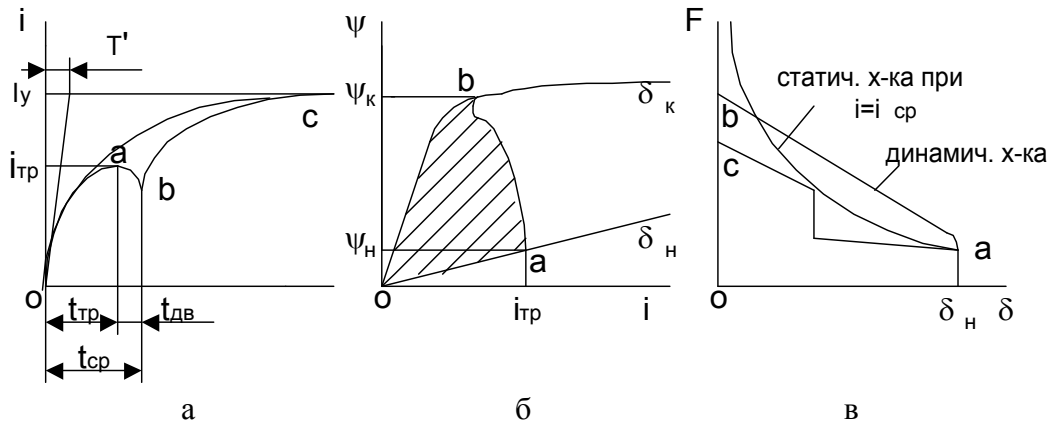


Рис.88.

Пока ток мал и сила электромагнита меньше механической, якорь будет оставаться неподвижным (участок «*oa*» характеристики на рис.88,*а*). Якорь начнет свое движение тогда, когда ток в катушке достигнет значения тока трогания $i_{гр}$,

$$i_{гр} = I_y(1 - e^{-\frac{t_{гр}}{T}}) \quad (239)$$

Отсюда найдем время трогания

$$t'_{гр} = T \ln \frac{I_y}{I_y - i_{гр}}. \quad (240)$$

Если $I_y = I_n$, то $i_{гр} = I_n K_3$, тогда

$$t'_{гр} = T \ln \frac{1}{1 - K_3} \quad (241)$$

здесь $T = \frac{L}{R}$ - постоянная времени срабатывания электромагнита.

Время трогания увеличивается с увеличением индуктивности катушки и с уменьшением ее активного сопротивления.

Точка «*a*» на рис.88,*б* соответствует моменту, когда тяговое усилие превышает механическое противодействующее усилие и якорь начнет движение. Оно заканчивается в точке «*b*» в момент соприкосновения с сердечником. При движении якоря потокосцепление будет изменяться не только за счет изменения тока, но и за счет уменьшения воздушного зазора. Снижение тока при движении якоря определяется противоэлектродвижущей силой, так называемой э.д.с. движения, которая возрастает с увеличением скорости движения якоря

$$e_d = i \frac{dL}{dt}. \quad (242)$$

$$\text{Так как } L = w^2 G_\delta = w^2 \mu_0 \frac{S}{\delta} \quad \text{и} \quad \frac{dL}{dt} = w^2 \mu_0 S \left(-\frac{1}{\delta^2}\right) \frac{d\delta}{dt}; \quad (243)$$

здесь $-\frac{d\delta}{dt} = v_{\text{я}}$ - скорость движения якоря.

$$\text{Следовательно} \quad -e_{\delta} \equiv v_{\text{я}} \frac{1}{\delta^2}. \quad (244)$$

К концу движения якоря противоэдс большая вследствие нарастания скорости и уменьшения зазора. При неподвижном якоре ток в катушке нарастал бы по пунктирной линии до установившегося значения I_{y} (Рис.88,а).

Индуктивность системы резко возросла за счет уменьшения зазора и увеличения проводимости G_{δ} . Вследствие этого потокосцепление также возросло резко до момента соприкосновения якоря с сердечником и в дальнейшем с ростом тока меняется незначительно.

Поскольку при движении якоря во всех точках его пути ток в обмотке меньше установившегося значения, то и сила развиваемая электромагнитом, в динамике значительно меньше чем в статике.

9.3. Работа электромагнита.

Полная работа электромагнита в процессе срабатывания равна площади, ограниченной динамической кривой в координатах $\psi = f(i)$ и $F = f(\delta)$ на рис.88.

$$A = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F \cdot d\delta = S_{oab} \quad (245)$$

$$\text{Здесь} \quad F = F_{\text{мех}} + m \frac{dv_{\text{я}}}{dt} \quad (246)$$

$F_{\text{мех}}$ - механическая противодействующая сила;

$m \frac{dv_{\text{я}}}{dt}$ - сила инерции подвижной системы электромагнита.

Полезная работа (статическая), совершаемая электромагнитом при движении якоря равна площади под механической характеристикой

$$A_{\text{ст}} = \int_{\delta_n}^{\delta_k} F_{\text{мех}} d\delta = S_{oac} \quad (247)$$

Динамическая работа равна площади, заключенной между динамической тяговой характеристикой и механической характеристикой электромагнита

$$A_{\text{дин}} = A - A_{\text{ст}} = \int_{\delta_n}^{\delta_k} (F - F_{\text{мех}}) \cdot d\delta = S_{abc} = W_{\text{кя}} \quad (248)$$

Эта работа равна кинетической энергии якоря $W_{\text{кя}}$ в конце движения якоря. Чем больше динамическая работа тем больше скорость якоря $v_{\text{я}}$ в конце хода, а следовательно и средняя скорость якоря $v_{\text{яср}}$ и, тем самым, меньше время движения.

Энергия, соответствующая статической работе $A_{\text{ст}}$ запасается в сжатых пружинах электромагнитного механизма. Энергия, соответствующая динамической работе $A_{\text{дин}}$ есть кинетическая энергия массы якоря.

В момент окончания движения происходит удар якоря о полюс и кинетическая энергия превращается в тепловую и рассеивается в окружающую среду.

При отпуске якоря электромагнита он движется к начальному положению за счет противодействующей силы. При этом статическая энергия переходит в кинетическую и в конце движения вследствие удара превращается в тепло и рассеивается.

9.4. Время движения при включении электромагнита.

Переходный процесс в электромагните при движении якоря описывается уравнением

$$U = iR + \frac{d\psi}{dt}$$

Уравнение движения якоря при срабатывании имеет вид

$$F \cdot dS = \frac{d(mv^2)}{2} + F_{\text{мех}} dS, \quad (249)$$

где S - путь, пройденный якорем;

m - приведенная масса подвижных частей;

v - скорость движения подвижных частей;

F - тяговая сила электромагнита.

Приведенные уравнения являются нелинейными и могут быть решены лишь приближенно. Из существующих методов наиболее общим, применимым для любой конструкции электромагнитов, имеющих насыщенную магнитную систему, является графоаналитический метод последовательных приближений.

Для решения этих уравнений их необходимо записать в конечных разностях

$$U = iR + \frac{\Delta\psi}{\Delta t} \quad (250)$$

$$F \cdot \Delta S = \Delta\left(\frac{mv^2}{2}\right) + F_{\text{мех}} \Delta S. \quad (251)$$

Для определения времени движения якоря необходимо иметь семейство кривых $\psi = f(i)$, полученных путем расчета магнитной цепи для различных положений якоря. Чем больше будет получено промежуточных кривых, тем точнее будут результаты расчета. На нижней кривой, соответствующей начальному зазору δ_n отмечают точку «а», которая соответствует току трогания $i_{\text{тр}}$. Из точки «а» проводят прямую до пересечения с соседней кривой $\psi = f(i)$ для зазора $\delta_1 = \delta_n - \Delta S_1$, таким образом, чтобы ψ при этом несколько увеличилось.

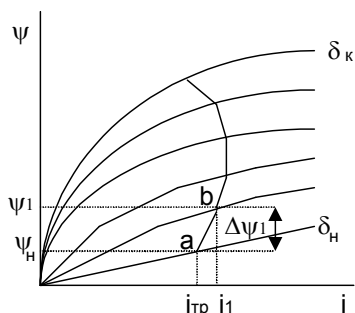


Рис.89

Затем определяют площадь фигуры «*oab*» равной $F_1 \cdot \Delta S$, где F_1 - средняя тяговая сила на участке хода якоря от δ_n до δ_1 . Произведение $F_{\text{мех}} \Delta S$ определяется по заданному закону изменения противодействующих сил, т.е. по механической характеристике. Из уравнения движения определяют скорость якоря v_1 в конце первого участка. Приняв ускорение постоянным, находят время движения якоря на первом участке

$$\Delta t = \frac{\Delta S_1}{v_{\text{ср1}}}, \quad (252)$$

где $v_{\text{ср1}} = \frac{v_0 + v_1}{2} \approx \frac{v_1}{2}$.

Для выбранного направления отрезка «*ab*» определяют

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 - \psi_n \quad \text{и} \quad \Delta i = i_1 - i_{\text{тр}}. \quad (253)$$

Принимают величину тока на рассматриваемом интервале постоянной и равной

$$i_{\text{ср}} = i_{\text{тр}} + \frac{\Delta i}{2} \quad (254)$$

Подставляя в уравнение (250) значения Δt_1 , $\Delta\psi_1$ и $i_{\text{ср}}$ и, убедившись в соблюдении равенства, можно считать выбор отрезка «*ab*» правильным. При несоблюдении равенства

выбирают новое направление отрезка «*ab*» и расчет повторяют до тех пор, пока не будет достигнуто равенство. Таким же путем находят время движения якоря на втором, третьем и последующих участках. Полное время движения якоря определяют как сумму времени движения на отдельных участках

$$t_{\text{ос}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n. \quad (255)$$

Иногда для приближенного определения времени движения пользуются упрощенным методом с использованием статической тяговой и механической характеристик. Считая, что избыточная сила $\Delta F_1 = F_3 - F_{\text{мех}}$, действующая на якорь при срабатывании электромагнита, постоянна ($\Delta F = \text{const}$) и не зависит от перемещения якоря, получают уравнение

$$F_3 - F_{\text{мех}} = M \frac{d^2 S}{dt^2}, \quad (256)$$

где M - масса подвижной системы.

Отсюда

$$t_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{2MS}{F_3 - F_{\text{нр}}}}. \quad (257)$$

При применении этой формулы получается значительная ошибка, так как в ней не учитывается динамика процесса при движении якоря электромагнита.

9.5. Время срабатывания при отключении электромагнита.

9.5.1. *Время трогания при отключении электромагнита.* Отключение электромагнита может производиться двумя способами: разрывом цепи обмотки электромагнита или разрывом цепи с последующим закорачиванием обмотки электромагнита.

Если не учитывать влияние вихревых токов в массивных частях электромагнита и пренебречь влиянием дуги или искры на контактах выключающего устройства, время трогания якоря при разрыве цепи обмотки должно было бы равняться нулю.

Практически этого не бывает, так как при отключении в массивных частях магнитопровода появляются вихревые токи, замедляющие спадание магнитного потока. Поэтому время трогания при отключении имеет конечное значение.

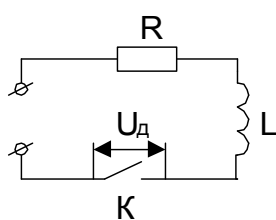


Рис.90.

Отключение электромагнита путем закорачивания цепи обмотки приводит к дополнительному увеличению времени трогания. Вследствие этого такой способ отключения применяется в основном в электромагнитах замедленного действия.

При отключении электромагнита от источника питания (рис.90), вследствие наличия искры, будет иметь место процесс, определяемый уравнением

$$U = i\rho + iR + L_{\kappa} \frac{di}{dt}. \quad (258)$$

Здесь L_{κ} - индуктивность катушки при конечном зазоре;

ρ - сопротивление искры;

R - активное сопротивление обмотки.

Сопротивление искры зависит от многих факторов аналитического выражения для него пока нет. Однако для того, чтобы проанализировать характер зависимости изменения тока и времени трогания при отключении, для выяснения качественных результатов можно допустить $\rho = \rho_{\text{сп}} = \text{const}$. Тогда решение уравнения будет иметь вид

$$i = \frac{U}{\rho + R} + C \cdot e^{-\frac{t}{T''}} \quad (259)$$

Где C - постоянная интегрирования;

$T'' = \frac{L_k}{\rho + R}$ - постоянная времени при отключении.

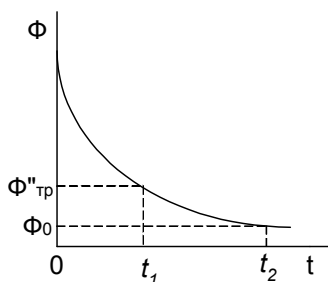
Так как при $t=0$, $i = \frac{U}{R}$ получим $\frac{U}{R} = \frac{U}{\rho + R} + C$, откуда $C = \frac{U}{R} - \frac{U}{\rho + R}$.

Тогда

$$i = \left(\frac{U}{R} - \frac{U}{\rho + R} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''}} + \frac{U}{\rho + R}. \quad (260)$$

Вследствие того, что $\rho \gg R$, последнее уравнение видоизменяется так

$$i \approx \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T''}}. \quad (261)$$



Движение якоря начинается с того момента, когда поток спадает до величины, при которой противодействующая сила станет равной тяговой силе. Тогда время трогания при отпуске $t_{\text{тр}}''$, т.е. время спадания потока до $\Phi_{\text{тр}}''$ и тока до $i_{\text{тр}}''$, при которых якорь начнет обратное движение, будет

$$t_{\text{тр}}'' = \frac{L_k}{\rho + R} \ln \frac{U}{i_{\text{тр}}'' R}. \quad (262)$$

Рис.91. Φ_0 - остаточный магнитный поток.

9.5.2. Время движения якоря при отключении электромагнита. Якорь начнет отходить от сердечника, когда тяговая сила станет меньше механической силы. Закон изменения тяговой силы при отпуске якоря весьма сложен и еще недостаточно изучен, поэтому точное определение времени движения при отпуске затруднительно.

Если допустить, что разность между тяговой и механической силами остается постоянной при любом значении зазора δ , то $t_{\text{ов}}''$ будет равно

$$t_{\text{ов}}'' = \sqrt{\frac{2M\delta}{F_{\text{мех}} - F}}. \quad (261)$$

Это уравнение можно рассматривать лишь как приближенное, так как оно не учитывает процесс динамики при перемещении якоря электромагнита.

9.6. Методы ускорения и замедления срабатывания электромагнитов.

Для электромагнитов, время срабатывания которых должно отличаться от нормального (0,05 - 0,15 с.) в ту или иную сторону, необходимы специальные меры для обеспечения временных параметров. Эти меры могут быть направлены либо на изменение конструкции и параметров электромагнита, либо на применение схемных способов изменения времени срабатывания. В связи с этим эти методы и получили название - конструктивные или схемные методы.

9.6.1. Конструктивные методы уменьшения времени срабатывания.

Время трогания. Для уменьшения времени трогания конструктивным способом уменьшают вихревые токи в магнитопроводе, которые увеличивают время трогания, так как они демпфируют магнитный поток при его изменении. Для этого магнитопровод выполняют из магнитных материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением. В массивных частях магнитопровода выполняют специальные прорезы, пересекающие пути вихревых токов. Магнитопровод выполняют шихтованным из листов электротехнической стали.

Время движения. Для уменьшения времени движения стремятся уменьшить ход якоря, уменьшить массу якоря и связанных с ним подвижных частей. Уменьшают трение в осях или

между подвижными и неподвижными деталями конструкции. Применяют вращение якоря на призме, а не в осях.

9.6.2. *Схемные методы уменьшения времени срабатывания.* В тех случаях, когда конструктивные методы малоэффективны или не применимы, используют схемные методы изменения временных параметров электромагнитов. Схемные методы воздействуют только на время трогания электромагнита через его параметры.

Время трогания при срабатывании можно уменьшить, если одновременно с увеличением напряжения питания электромагнита ввести в цепь катушки добавочное сопротивление R_0 такой величины, чтобы установившееся значение тока в обмотке электромагнита при этом не изменилось (рис.92), т.е.

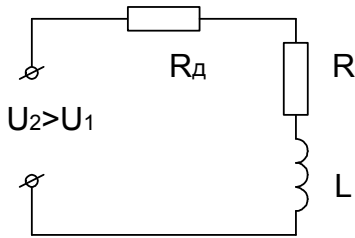


Рис.92

$$I_y = \frac{U_1}{R} = \frac{U_2}{R + R_0} \quad (262)$$

Уменьшение времени трогания здесь получается за счет снижения постоянной времени так как

$$T_1 = \frac{L}{R} > T_2 = \frac{L}{R + R_0} \quad \text{и} \quad t_{mp2} < t_{mp1},$$

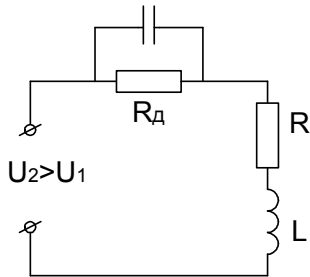


Рис.93

где
$$t_{mp} = T \cdot \ln \frac{I_y}{I_y - i_{mp}} \quad (263)$$

Недостатком этой схемы является то, что эффект достигается за счет пропорционального увеличения мощности, теряемой в добавочном сопротивлении.

В схеме на рис.93 последовательно с обмоткой электромагнита включен добавочный резистор, шунтированный конденсатором.

Напряжение питания в этой схеме также увеличивается. Однако добавочный резистор подбирается также как и в схеме рис.92. Форсировка процесса срабатывания здесь получается за счет того, что в первый момент после подачи напряжения незаряженная емкость C создает дополнительный путь для тока. Поэтому за счет тока зарядки конденсатора в обмотке электромагнита ток растет быстрее. Переходный процесс, до момента трогания якоря, в этом случае описывается следующими уравнениями

$$U = iR + i_1 R_0 + L \frac{di}{dt}$$

$$i_1 R_0 = \frac{1}{C} \int i_2 dt \quad (264)$$

$$i = i_1 + i_2$$

Чтобы этот процесс имел аperiodический, а не колебательный характер, необходимо соблюдение условия, вытекающего из решения этих уравнений

$$(L + RR_0 C)^2 > 4LR_0 C(R + R_0) \quad (265)$$

Для рассматриваемой схемы существует значение оптимальной емкости, при которой время срабатывания получается минимальным

$$C_{opt} = \frac{L \cdot 10^6}{RR_0} \quad (266)$$

Недостатком этой схемы является наличие конденсатора, емкость которого обычно значительна.

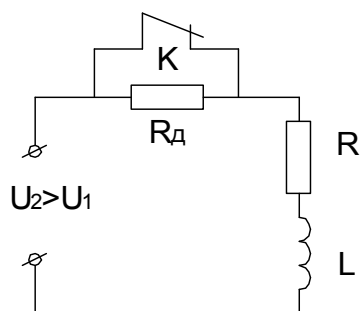


Рис.94.

На рис.94 показана схема форсировки срабатывания, в которую последовательно с обмоткой электромагнита включено добавочное сопротивление, шунтированное размыкающим контактом. Этот контакт связан с якорем. При обесточенной обмотке он замкнут, размыкание происходит лишь в конце хода якоря. В период срабатывания через обмотку протекает переходный ток, установившееся значение которого было бы равно U/R . Но благодаря тому, что якорь притягивается, происходит размыкание контакта К, шунтирующего R_d , и ток нарастает до

меньшего установившегося значения, равного $\frac{U}{R + R_0}$, который должен быть достаточным для

удержания якоря электромагнита в притяннутом положении. Эта схема может применяться также для уменьшения размеров электромагнита в тех установках, где особенно важно получить их минимальный вес.

Недостатком схемы является наличие размыкающего контакта.

9.6.3. *Мтоды увеличения времени срабатывания.* Для увеличения времени срабатывания электромагнитов используют все общие факторы, приводящие к увеличению, как времени трогания, так и времени движения. Среди этих методов могут быть как конструктивные, так и схемные методы.

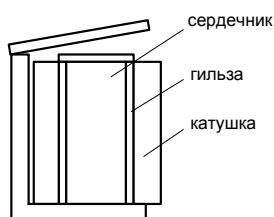
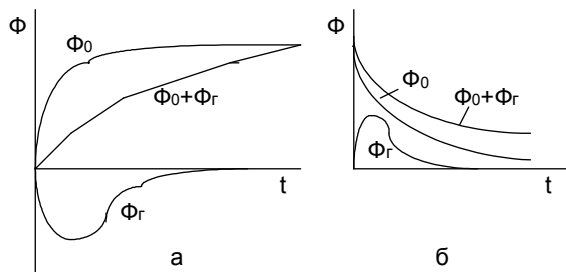


Рис.95

Из конструктивных методов, приводящих к увеличению времени движения используются такие факторы как увеличение хода якоря, увеличение веса подвижных частей, механические и электромагнитные демпферы. Последние нашли применение в реле, создающих большие выдержки времени, например, реле времени.

В случае электромагнитного демпфирования применяют короткозамкнутые обмотки в виде медных (алюминиевых) гильз,

насаженных на сердечник магнитопровода (рис.95). Вихревые токи, появляющиеся в этих гильзах в момент замыкания или размыкания основной обмотки электромагнита, задерживают изменение магнитного потока и создают замедление срабатывания, как при притяжении, так и при отпуске якоря. В последнем случае достигается больший замедляющий эффект, так как при отключении обмотки переходный процесс происходит при притяннутом якоря, когда индуктивность системы большая. Поэтому выдержка времени при отпуске якоря в электромагнитах с короткозамкнутыми гильзами может быть получена больше, чем при его притяжении.

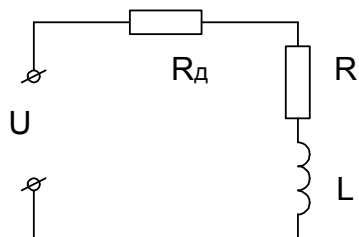


Характер изменения магнитных потоков в магнитопроводе электромагнита реле с электромагнитным демпфером при включении а и отключении б приведены на рис.96. При включении электромагнита уравнения, описывающие переходный процесс, имеют

Рис.96

где
$$\Phi = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{R_m}$$

Решением этой системы уравнений будет



$$t_{mp} = \frac{w_2}{R_2} \int_{\Phi_y}^{\Phi_{mp}} \frac{d\Phi}{i_2 w_2} \quad (268)$$

Если связь между потоком и намагничивающей силой обмотки задана в графической форме в виде кривой намагничивания электромагнита, то время трогания может быть найдено методом графического интегрирования.

Электромагниты с электромагнитным демпфером могут обеспечивать выдержку времени при отпускании до 8-10 с.

Рис.97

Для изменения времени срабатывания электромагнитов схемными методами наиболее распространенными схемами являются следующие.

В тех случаях, когда напряжение питания фиксировано, время трогания при включении может быть увеличено включением добавочного сопротивления R_0 последовательно с обмоткой электромагнита (рис.97). Увеличение времени трогания здесь получается вследствие уменьшения установившегося значения тока в цепи. Вместо резистора можно включить также индуктивность, что увеличивает постоянную времени цепи, не изменяя установившегося тока.

Для увеличения времени трогания при отключении применяются схемы, приведенные на рис.98.

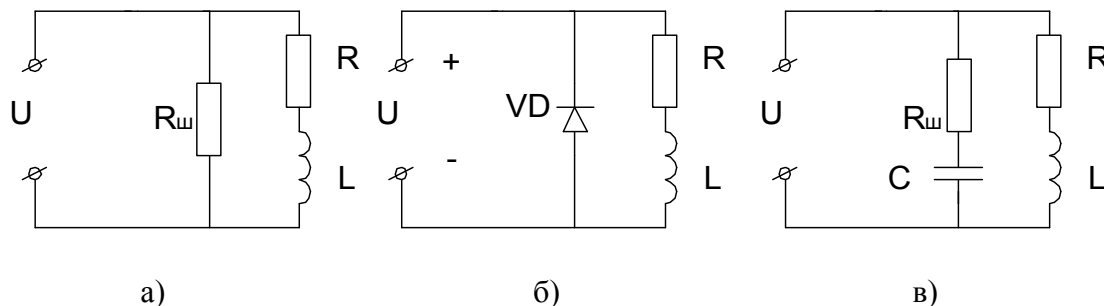


Рис.98.

Увеличение времени трогания в этих схемах получается за счет того, что после размыкания цепи в контурах $(R, L - R_{ш})$, $(R, L - VD)$ (рис.98а,б) возникающая в катушке э.д.с. самоиндукции создает ток, который тормозит спадание магнитного потока в электромагните. Задержка времени трогания определяется временем затухания тока в контурах, которое зависит от параметров этих контуров.

В схеме рис.98,в задержка времени трогания при отпускании происходит за счет того, что после размыкания цепи заряженная емкость C разряжается в контуре $(C, R_{ш} - R, L)$ и ток разряда задерживает спадание потока в электромагните.

Литература

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. –М.: Энергоатомиздат, 1988. -720 с.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. –Л.: Энергоиздат, 1981. -304 с.

Дополнительная

3. Таев И.С. Электрические аппараты управления. –М.: Высш. шк., 1984. -247 с.
4. Буль Б.К., Буль О.Б. и др. Электромеханические аппараты автоматики. –М.: Высш. шк., 1988. -304 с.
5. Шопен Л.Б. бесконтактные электрические аппараты автоматики. –М.: Энергия, 1986. -568 с.