

Г.И. ЦОПОВ, В.А. СЕРГЕЕВ, В.Н. ОВСЯННИКОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Г.И. ЦОПОВ, В.А. СЕРГЕЕВ, В.Н. ОВСЯННИКОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСТРОЙСТВА НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2013

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.318.562.062-57.001.2

Ц 80

Цопов Г.И.

Ц 80 Проектирование и расчет электромагнитного устройства низкого напряжения: учебно-методическое пособие / *Г.И. Цопов, В.А. Сергеев, В.Н. Овсянников.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 53 с.: ил.

Приведена методика проверочного расчёта магнитных цепей. Даны краткая характеристика тягового реле автомобильного стартера, устройство, принцип действия, основные параметры и рабочий процесс электромагнита.

Описан ход расчёта статической тяговой характеристики электромагнита, его обмотки, времени трогания и коэффициента возврата. Даны рекомендации для выбора конструкции и определения основных размеров при проектировании электромагнитов, приведен пример проверочного расчета.

Предназначено для выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория, конструкция и расчет электрооборудования автомобилей с классическим и гибридным приводом».

Рекомендуется для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также может быть использовано студентами других специальностей при выполнении типовых расчётов электромагнитов постоянного тока.

УДК 621.318.562.062-57.001.2

Ц 80

Рецензент канд. техн. наук *А.А. Воронин*

© Г.И. Цопов, В.А. Сергеев,
В.Н. Овсянников, 2013

© Самарский государственный
технический университет, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое пособие составлено в соответствии с программой курса специальной дисциплины «Электрооборудование автомобилей» и является дополнением к разделу «Системы пуска». Предназначено для студентов, обучающихся по профилю «Электрооборудование автомобилей и тракторов».

В работе достаточно подробно изложены теоретические, технические и методические материалы для выполнения курсовой работы по расчету тягового реле стартера автомобиля.

В первом разделе пособия приведены сведения о функциональном назначении, устройстве, принципе действия и конструктивных особенностях тягового реле. Также даны основы теории и практических расчетов, которые необходимы для оценки технических и электрических параметров реле для вариантов конструкций магнитопровода электромагнита в составе тягового реле стартера.

Во втором разделе сформулировано контрольное задание на курсовую работу и указан ее объем.

В третьем разделе показана последовательность расчета и методические указания к расчету. Также приведены контрольные вопросы по теоретическому материалу, пример расчета тягового реле стартера.

Даны варианты геометрических размеров магнитной цепи элементов тягового реле, варианты конструктивного выполнения полюсов и эмпирические формулы для расчета проводимостей рассеяния с учетом выпучивания магнитного потока, приведены справочные материалы.

Заключение содержит обобщающие положения, позволяющие оценить целостность курса, логику его построения, что позволяет повысить уровень усвоения материала.

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические устройства, к которым относится тяговое реле стартера, выполняются в широком изменении диапазона мощностей и имеют разнообразные области применения. Электромагнитное тяговое реле автомобильного стартера является одновременно элементом как приводного механизма, обеспечивая его перемещение по оси вала якоря стартерного электродвигателя, так и стартерной цепи, замыкая в конце хода якоря тягового электромагнита силовые контакты цепи электропитания стартера. Такое реле необходимо для ввода шестерни стартера в зацепление с венцом маховика двигателя автомобиля и включения цепи электроснабжения стартерного электродвигателя. Реле обычно крепится к корпусу электродвигателя с помощью кронштейна, а также к фланцу прилива крышки со стороны привода непосредственно или через основание реле. В состав тягового реле стартера входят: электромагнит с неподвижной частью, называемой сердечником, или стопом, и подвижной частью, называемой якорем; механические устройства, соединяющие подвижную часть электромагнита с шестерней посредством тяг и рычага; контакты цепи электроснабжения стартерного электродвигателя. В зависимости от мощности тягового реле возможны различные конструктивные варианты его исполнения и различные области применения в промышленности.

В основе принципа действия электромеханических устройств лежит взаимодействие электрических и механических систем в статических и динамических режимах в результате преобразования энергии электрической в энергию механическую и наоборот. При изучении используется теория электрических цепей и законы механики для математического описания физических явлений, сопровождающих процесс преобразования энергии. Аналитические выражения могут использоваться для анализа и расчетов устройств, осуществляющих электромеханическое преобразование, передачу энергии и информации и управление ими. Взаимозависимость электрических и механических величин делает анализ работы электромеханических

устройств более сложным и поэтому более интересным, чем анализ обычных электрических цепей или механических устройств.

1. УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВОГО РЕЛЕ АВТОМОБИЛЬНОГО СТАРТЕРА

Функциональное назначение тягового реле – обеспечить ввод шестерни автомобильного стартера в зацепление с венцом маховика двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля, подключить стартерный электродвигатель к источнику питания (аккумуляторной батарее) и после запуска ДВС отключить стартерный электродвигатель от источника питания.

Современные тяговые реле имеют множество конструктивных исполнений, отличающихся по способу крепления на стартере, количеству обмоток, форме сердечников магнитопровода электромагнита неподвижной части сердечника (стопа) и подвижной части сердечника (якоря) и т.д. [1].

Однако принцип действия всех тяговых реле одинаков. Тяговое реле представляет собой электромагнит постоянного тока с втягивающим якорем. Электромагнит состоит из катушки с расположенной на ней обмоткой (одной или двумя), неподвижной части магнитопровода (сердечника или стопа), выполненного из ферромагнитного материала, и подвижного якоря, выполненного из стали. Якорь частично располагается внутри катушки с обмотками, а частично – вне ее. При срабатывании электромагнита якорь притягивается к сердечнику и, перемещаясь поступательно, втягивается в катушку.

Между якорем и остальными частями магнитопровода имеются воздушные промежутки. Якорь воспринимает электромагнитное усилие и передает его соответствующим деталям механизма привода.

В начальный момент времени воздушный зазор между якорем и сердечником может быть сравнительно велик ($\sigma_8 \approx 14 \div 16$ мм), а в

конце хода якоря уменьшается почти до нуля ($\sigma_8 = 0,1 \div 0,3$ мм). Для преодоления этого зазора и обеспечения необходимого для срабатывания усилия требуется большая магнитодвижущая сила (МДС). Она обеспечивается втягивающей и удерживающей обмотками, которые имеют примерно одинаковое число витков и в этот момент времени включены согласно, поэтому их МДС складывается, сила магнитного притяжения возрастает и по величине превышает силу, необходимую для удержания якоря в рабочем состоянии. После срабатывания реле втягивающая обмотка замыкается и автоматически выключается из работы. МДС, созданная только удерживающей обмоткой, недостаточна для удержания якоря в рабочем состоянии, и якорь под действием возвратной пружины возвращается в исходное положение. В тяговых реле широко используется бронева магнитная система, в которой катушка окружена магнитопроводом. Якорь электромагнита движется поступательно. В электромагнитах постоянного тока внешний магнитопровод и якорь имеют форму цилиндра и выполняются из сплошной стали [2].

Рабочий процесс электромагнита в тяговом реле осуществляется в циклическом режиме (рис. 1.1).

Процесс срабатывания начинается с момента подачи питания на обмотку электромагнита и завершается, когда якорь перейдет из начального положения, соответствующего начальному зазору (δ_n), в конечное S_k , при котором зазор равен δ_k . Весь процесс срабатывания можно разделить на время трогания ($t_{тр}$) и время движения ($t_{дв1}$) при срабатывании.

В течение времени трогания ток в обмотке электромагнита нарастает до значения $i_{тр}$, при котором электромагнитная сила становится равной противодействующей силе. Время трогания зависит от схемы и условий питания обмоток, параметров электромагнита и вида нагрузки [3].

Характер движения при срабатывании зависит от соотношения движущихся электромагнитных и противодействующих сил. Сила тока в обмотке электромагнита изменится по кривой 2, обусловлен-

ной возникновением ЭДС при движении якоря. Линия 1 соответствует нарастанию тока в обмотке при неподвижном якоре.

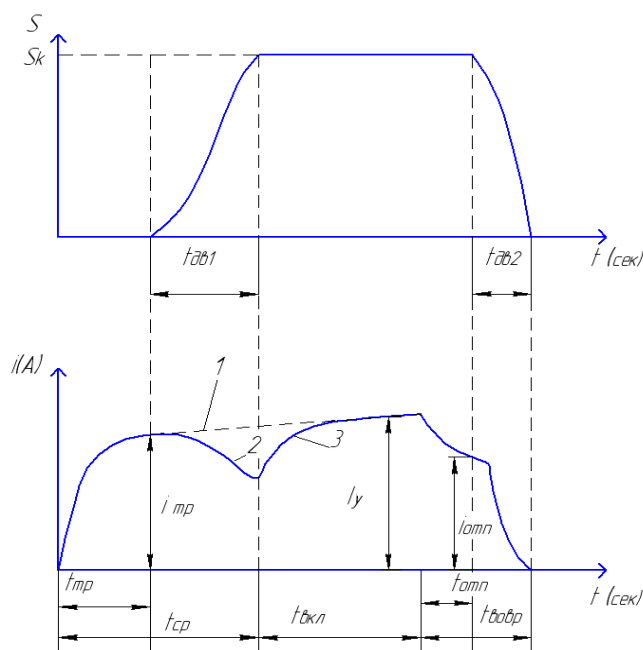


Рис. 1.1. Рабочий процесс электромагнита в тяговом реле:

S_n, S_k – соответственно начальное и конечное положение якоря;

$t_{тр}, t_{отп}, t_{ср}, t_{вкл}, t_{возв}$ – соответственно время трогания, отпущения, срабатывания, включения, возврата; $i_{тр}$ – ток трогания; I_y – установившийся ток;

1 – линия нарастания тока в обмотке при неподвижном якоре;

2 – изменение тока в обмотке якоря под воздействием ЭДС;

3 – изменение тока в обмотке электромагнита в начальной стадии;

$t_{дв1}$ – время движения при срабатывании; $t_{дв2}$ – время движения при возврате

Время трогания $t_{тр}$ и время движения $t_{дв1}$ составляют время срабатывания $t_{ср}$.

В период включенного состояния $t_{вкл}$ система находится в покое. В начальной стадии этого периода сила тока i в обмотке электромагнита нарастает по кривой 3 до установившегося значения I_y и далее при постоянстве напряжения питания и сопротивлении обмотки остается неизменной величиной, равной I_y .

Возврат якоря электромагнита в исходное состояние также происходит в два этапа. При отключении обмотки ток уменьшается до значения тока отпущения $i_{отп}$, которое зависит от нагрузки электромагнита. Перемещение якоря в исходное положение происходит за время $t_{дв2}$, зависящее от усилия возвратной пружины. Время отпуща-

ния $t_{отп}$ и время движения $t_{дв2}$ в процессе возврата составляют время возврата $t_{возвр}$. При размыкании цепи питания обмотки электромагнит переходит в состояние отключения $t_{выкл}$.

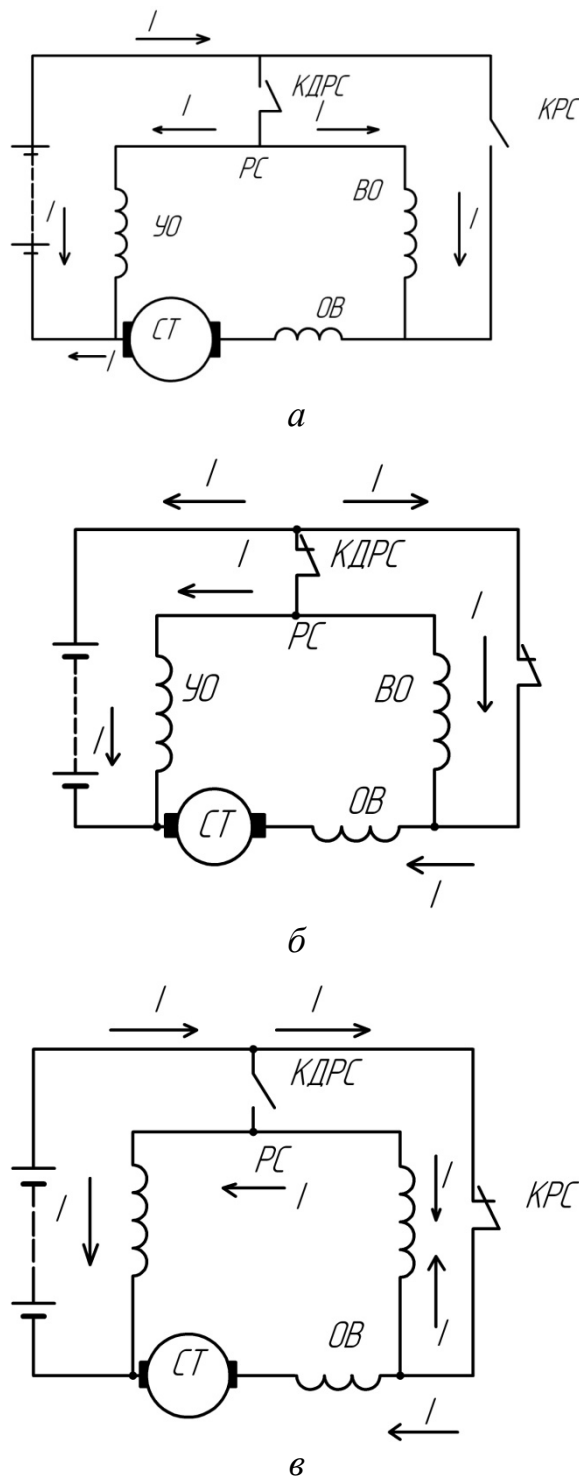


Рис. 1.2. Схема управления электростартером:

а – включение реле, *б* – замыкание силовых контактов, *в* – выключение реле,

УО – удерживающая обмотка тягового реле;

ВО – втягивающая обмотка тягового реле;

ОВ – обмотка возбуждения двигателя постоянного тока;

СТ – стартер; КРС – силовые контакты тягового реле;

Схема управления электростартером приводится на рис. 1.2. В соответствии с энергетическим балансом электромагнита величина электромагнитной силы, действующей на якорь, зависит от изменения запаса магнитной энергии в его рабочем воздушном зазоре [4].

$$P_3 = \frac{1}{2} F_\delta^2 * \frac{dG_\delta}{d\delta}, H, \quad (1.1)$$

где F_δ – МДС, обеспечивающая проведение необходимого магнитного потока через воздушный зазор, А; G_δ – магнитная проводимость рабочего воздушного зазора, Гн; δ – длина воздушного зазора, м. Значения F_δ, G_δ берутся для того положения якоря, для которого находят электромагнитную силу.

В случае если при движении якоря происходит перераспределение между потоком рассеяния и рабочим потоком электромагнита, а это характерно для электромагнитов с втягивающим якорем, когда происходит изменение пути потока рассеяния, то P_3 следует определять по формуле (1.2):

$$P_3 = \frac{1}{2} F_\delta^2 \left[\frac{dG_\delta}{d\delta} + g \left(\frac{l_y}{l_k} \right) \right], H, \quad (1.2)$$

где g_s – удельная проводимость потоков рассеяния; l_y – длина якоря, погруженного в катушку, м; l_k – длина катушки электромагнита, м.

Формулы (1.1) и (1.2) используются при расчете статических тяговых характеристик, позволяющих оценить пригодность данного электромагнита к определенным условиям его работы. Тяговая характеристика представляет зависимость электромагнитной силы, характеризующейся конструктивными особенностями электромагнита и силы тока, проходящей по его обмотке, от положения якоря, характеризующего величиной рабочего зазора δ для различных постоянных значений напряжения. Тяговые характеристики находятся в зависимости от конструктивных особенностей формы якоря и рабочих зазоров. Так, для якоря с плоским торцом (рис. 1.3, а) тяговая характеристика имеет вид гиперболы, а для якоря с конической выточкой в

сердечнике (рис. 1.3, в) – форму пологой кривой. На рис. 1.3, г показаны виды тяговых характеристик.

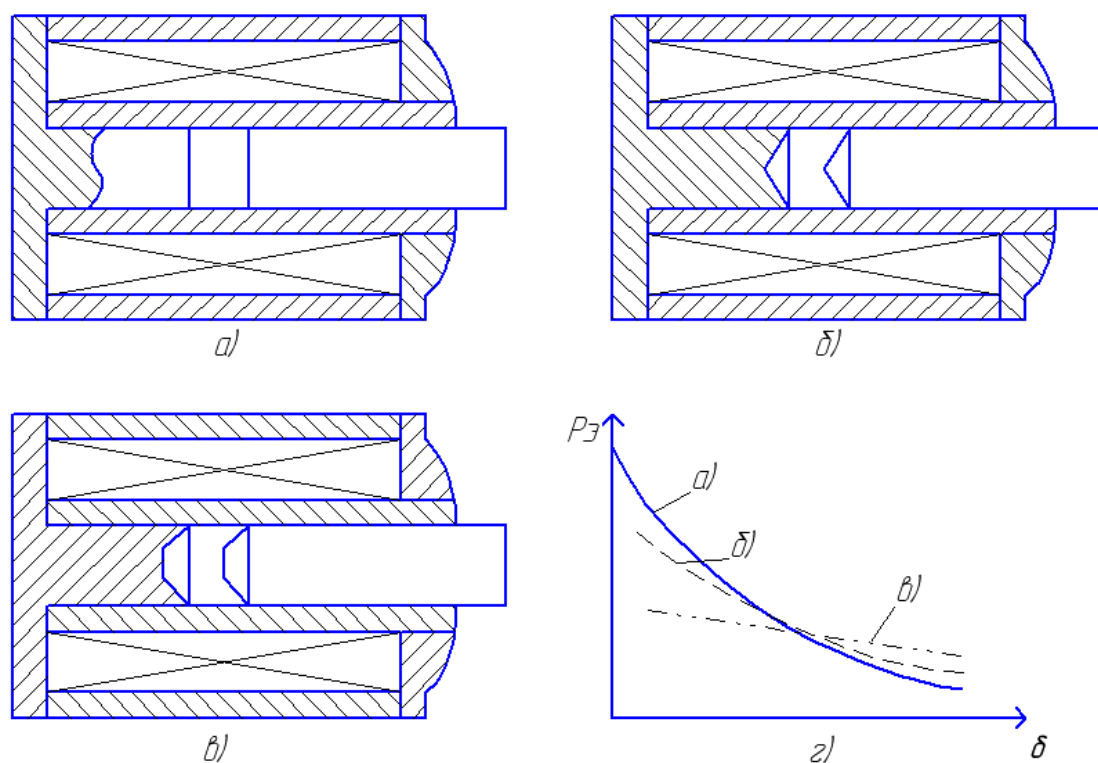


Рис. 1.3. Конструктивные разновидности тягового реле

При срабатывании электромагнит преодолевает сопротивление пружины (возвратной, буферной и др.). Зависимость сил сопротивления движению якоря $P_n = f(\delta)$, приведенных к точке приложения электромагнитной силы, от рабочего зазора δ называется характеристикой противодействующих сил (рис. 1.4).

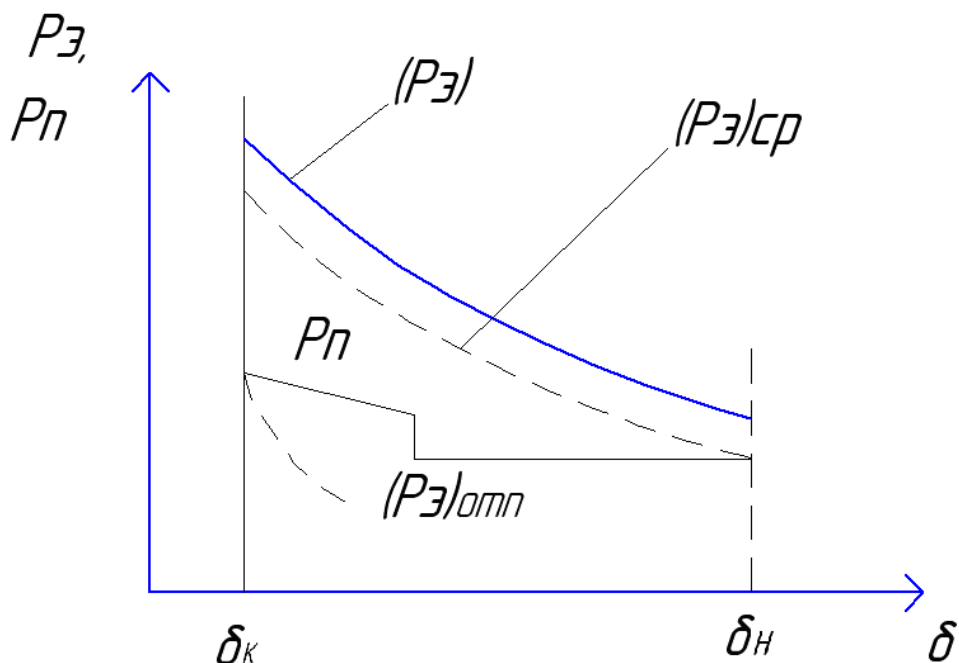


Рис. 1.4. Характеристики противодействующих сил

При работе электромагнита выполняется условная полезная работа $A_{\text{п}}$, которая определяется как произведение электромагнитной силы $P_{\text{п}}$, соответствующей начальному рабочему зазору $\delta_{\text{н}}$, и величины хода якоря при постоянстве силы тока (рис. 1.5) [5].

$$A_{\text{п}} = P_{\text{п}} (\delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}}), \quad (1.3)$$

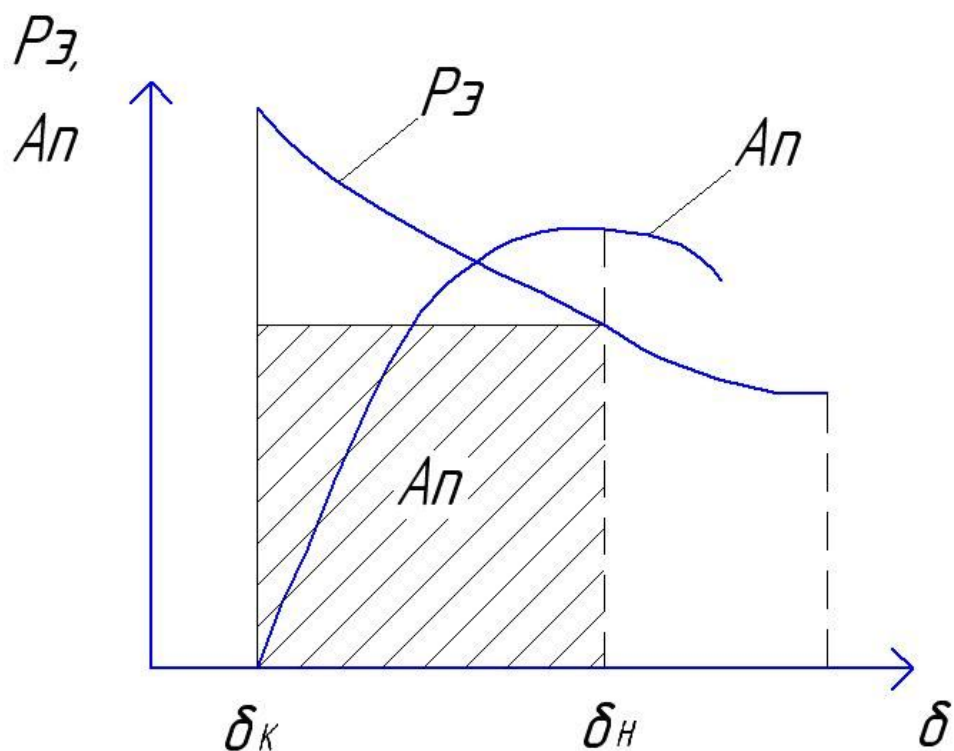


Рис. 1.5. Зависимость электромагнитной силы и полезной работы от величины воздушного зазора:

$A_{\text{п}}$ – полезная работа, выполняемая электромагнитом;

$P_{\text{э}}$ – электромагнитная сила

При выборе того или иного типа втяжного электромагнита и определённых соотношений его основных размеров обычно стремятся получить заданную работу при минимальной массе. При этом начальное положение якоря должно соответствовать точке максимума условной полезной работы.

Оценка спроектированного тягового реле может быть произведена по механической эффективности относительной величины условной полезной работы $A_{\text{п}}$ по сравнению с максимально возможной (соответствующей наибольшей заштрихованной площади на рис. 1.5).

Тепловые напряжения представляют собой зависимость температуры нагрева обмотки электромагнита от продолжительности включенного состояния [6].

Добротность электромагнита определяется как отношение его массы к величине условной полезной работы.

Экономичность спроектированного тягового реле определяется отношением потребляемой обмоткой электромагнита мощности к величине условной полезной работы. Однако при этом предельная мощность может ограничиваться величиной допустимого нагрева обмоток и условиями питания электромагнита. Выбор оптимальной конструкции по магнитным, механическим и тепловым характеристикам даст возможность при заданных условиях получить электромагнит с минимальными размерами, массой и стоимостью [7].

Важным параметром электромагнита является коэффициент запаса – отношение МДС ($F_{\text{м}}$), которая соответствует установившемуся значению тока $I_{\text{у}}$, к МДС срабатывания ($F_{\text{ср}}$) при токе срабатывания $I_{\text{ср}}$:

$$k_3 = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{ср}}} = \frac{I_{\text{у}}}{I_{\text{ср}}}. \quad (1.4)$$

Коэффициент запаса k_3 по условиям надежности всегда больше единицы.

Параметр срабатывания представляет собой минимальное значение МДС, тока или напряжения, при котором происходит срабатывание электромагнита.

Параметр отпускания представляет собой максимальное значение МДС, тока или напряжения, при котором якорь возвращается в исходное положение.

Процесс возврата электромагнита в исходное положение характеризует коэффициент возврата – отношение МДС отпускания ($F_{\text{отп}}$) к МДС срабатывания ($F_{\text{ср}}$):

$$k_{\text{с}} = \frac{F_{\text{отп}}}{F_{\text{ср}}}. \quad (1.5)$$

Коэффициент возврата $k_{\text{с}}$ достигает наибольшего значения при максимальном приближении характеристики противодействующих сил и тяговой характеристики электромагнита [8].

2. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ И ЕЕ СОДЕРЖАНИЕ

В контрольное задание входит расчет электромагнитного тягового реле при известном эскизе электромагнита (рис. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) и его геометрических размерах, приведенных в табл. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. Кроме этого известны:

- материал магнитопровода;
- величина магнитной индукции $B_{\text{дн}}$, Тл;
- начальная и конечная величина воздушного зазора ($\delta_{\text{н}}$, $\delta_{\text{к}}$);
- напряжение питания ($U_{\text{н}}$), В.

В пунктах 2.1, 2.2, 2.3 приведены аналитические формулы для определения магнитной проводимости рабочих воздушных зазоров, объемных фигур поля и удельной проводимости рассеяния для различных конструкций якоря и стопа (втяжных электромагнитов).

Требуется рассчитать:

– магнитные проводимости воздушных рабочего и паразитного зазоров (G_δ , G_ℓ) и проводимости рассеяния (G_s) для четырех положений якоря;

– величину МДС обмотки электромагнита (θ_n) при заданной магнитной индукции ($B_{\delta n}$);

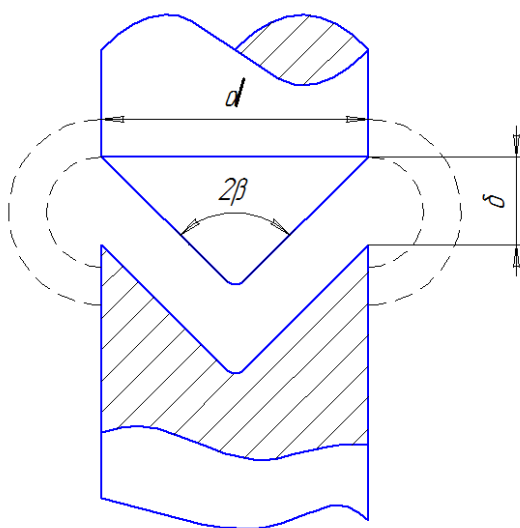
– магнитные потоки Φ_δ и Φ_s ;

– величину электромагнитной силы ($F_э$).

Также необходимо построить зависимость $F_э = f(\delta)$ и определить время трогания электромагнита ($t_{тр}$).

2.1. ПРОВОДИМОСТИ С УЧЕТОМ ВЫПУЧИВАНИЯ

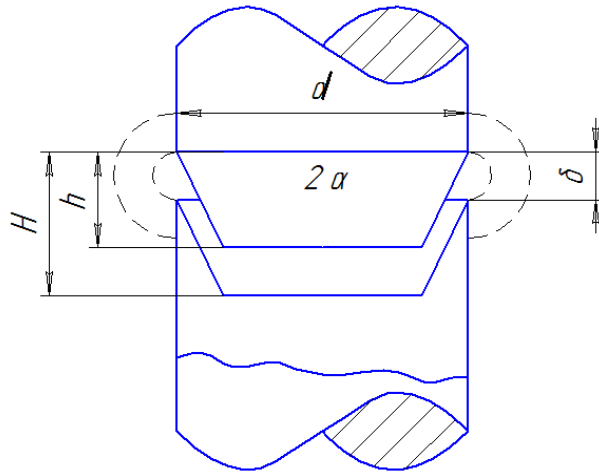
2.1.1. Цилиндрические полюса с коническими поверхностями



$$G_\delta = \mu_0 \left[\frac{\pi d^2}{4\delta \sin^2 \beta} - \left(\frac{0,157}{\sin^2 \beta} - 0,75 \right) \alpha \right];$$

$$G_{\delta x} = \mu_0 \frac{x \cdot d}{0,22\delta + 0,4x}.$$

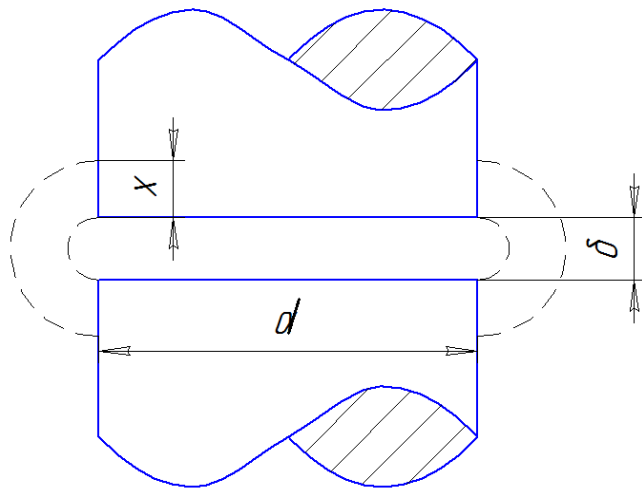
2.1.2. Цилиндрические полюса с усеченно-коническими поверхностями



$$G_{\delta} = \mu_0 \left\{ \frac{\pi d^2}{4\delta \sin^2 \alpha} + 0,75d - \frac{0,157d}{\sin^2 \alpha} - \frac{1,97d(1-\eta')}{\sin \alpha} \left[\frac{0,6-\eta'}{\ln(1+\frac{\delta}{d} \sin 2\alpha)} + \frac{1+\eta'}{\ln(1+5\frac{\delta}{d} \sin 2\alpha)} \right] \right\};$$

$$G_{\delta x} = \mu_0 \frac{x \cdot d}{0,22\delta + 0,4x}.$$

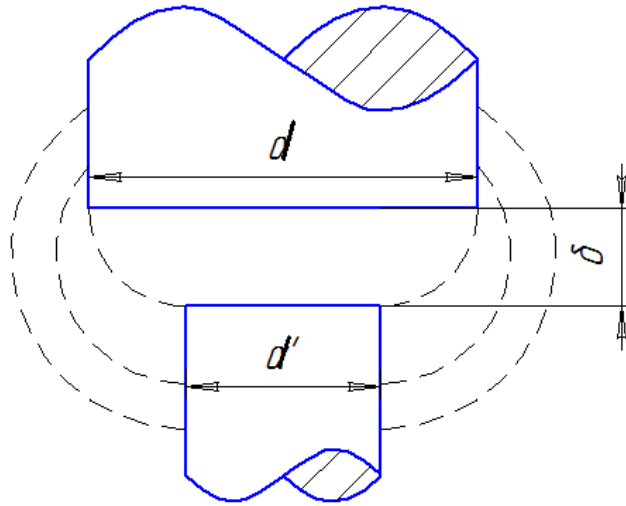
2.1.3. Плоские цилиндрические полюса



$$G_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d \right);$$

$$G_{\delta x} = \mu_0 \frac{xd}{0,22d + 0,4x}.$$

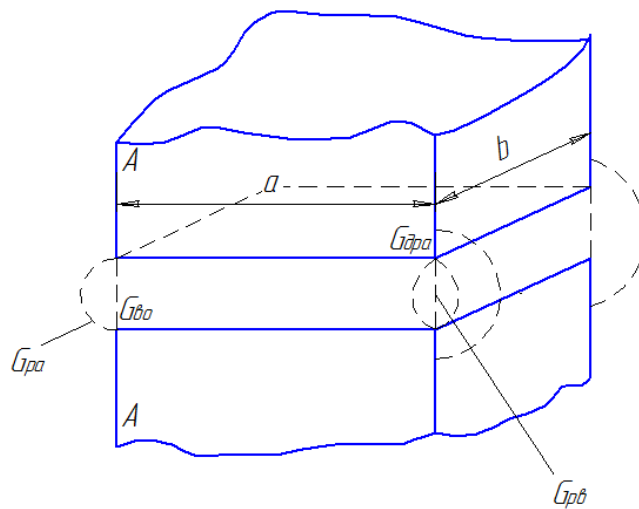
2.1.4. Плоские цилиндрические полюса



$$G_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4} + 0,58d \right);$$

$$G_{\delta x} = \mu_0 \frac{xd}{0,22d + 0,4x}.$$

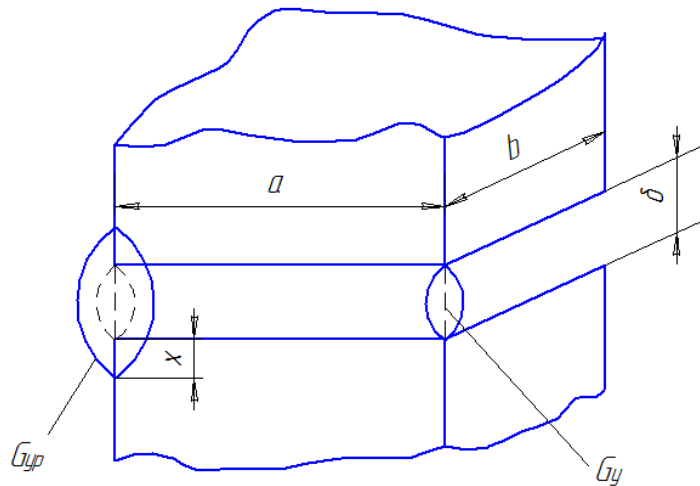
2.2. УРАВНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТЕЙ ОБЪЕМНЫХ ФИГУР ПОЛЯ



G_{δ} – полная проводимость воздушного зазора.

$$G_{\delta} = G_{\delta_0} + 2G_{pa} + 2G_{pb} + 2G_{\delta pa} + 2G_{\delta pb} + 4G_y + 4G_{yp};$$

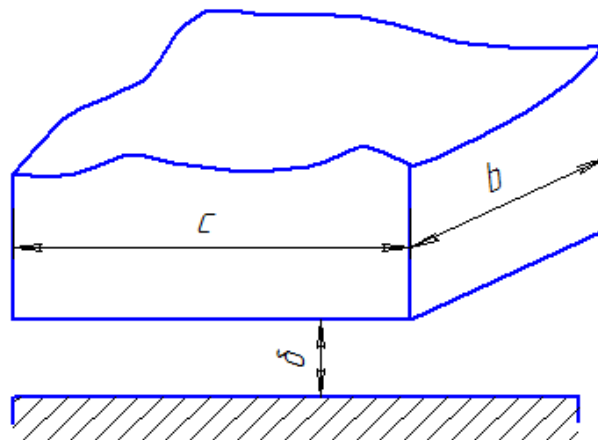
$$G_{\delta_0} = \mu \frac{S}{\delta}.$$



$G_{pa} = \mu_0 \cdot 0,26a$ – проводимость ребра a (половина цилиндра).

$G_{pb} = \mu_0 \cdot 0,25b$ – проводимость ребра b .

$G_{\acute{o}pa} = \mu_0 \frac{0,64a}{\frac{\delta}{x} + 1}$ – боковая проводимость ребра a (полукольцо).



A

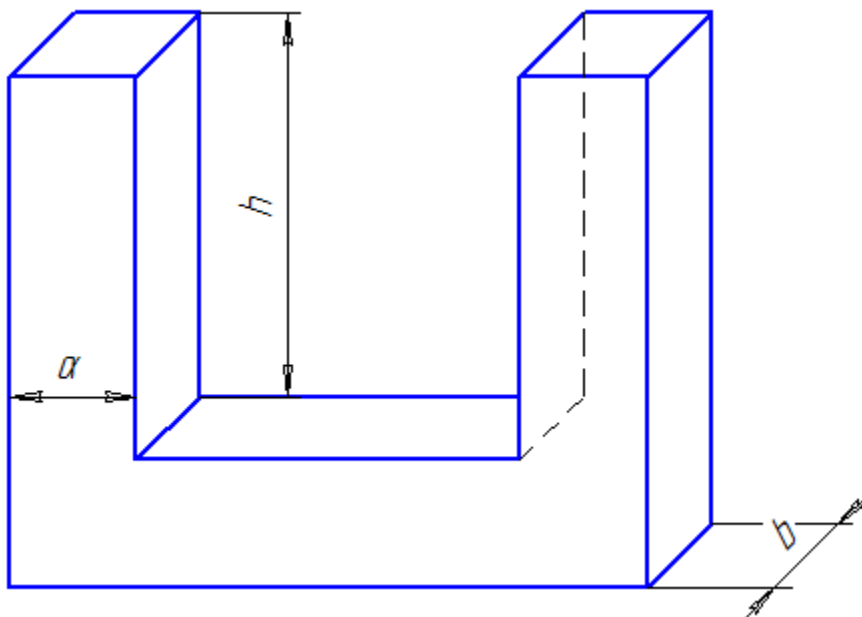
$G_{\acute{o}pb} = \mu_0 \frac{0,64b}{\frac{\delta}{x} + 1}$ – боковая проводимость ребра b .

$G_y = \mu_0 \cdot 0,077\delta$ – проводимость угла стыка ребер (сферический квадрант).

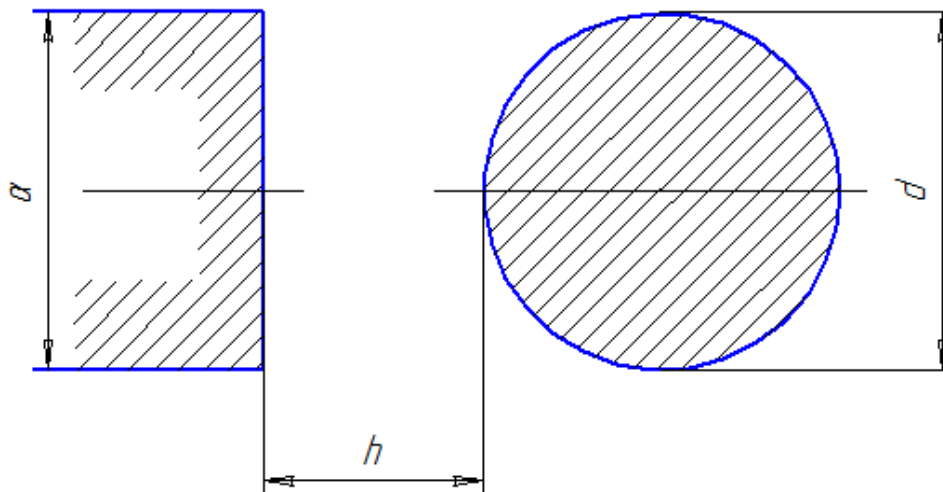
$G_{yp} = \mu_0 \cdot 0,25x$ – боковая проводимость линии стыка ребра (квадрант сферической оболочки).

В случае «полюс – плоскость» формулы G_p , G_{bp} , G_y , G_{yp} умножаются на 2.

2.3. УДЕЛЬНЫЕ ПРОВОДИМОСТИ РАССЕЯНИЯ



$$g_s = \mu_0 \left(\frac{b}{h} + \frac{1,28a}{h+a} + 0,52 \right).$$

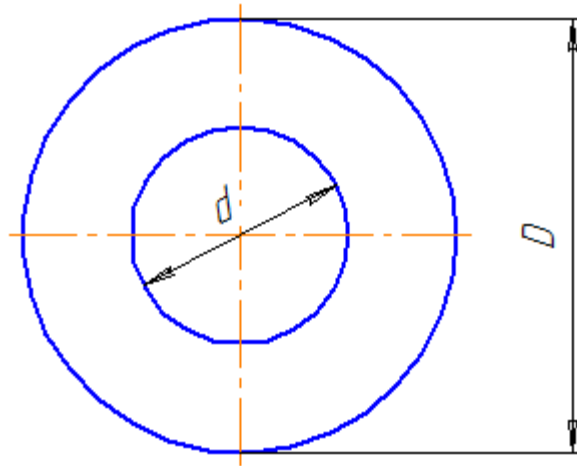


Если $a > 4h$,

$$g_s = \mu_0 \frac{\pi}{\ln \left[\frac{2h}{d} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d} \right)^2 - 1} \right]}.$$

При $a = (1,25 \dots 2,5)h$

$g_s' = k' \cdot g_s$, где $k' = 0,85 \div 0,92$.



Если $D \gg d$,

$$g_s = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln \frac{D}{d}}.$$

В случае $D-d=2l$ (несколько мм)

$$g_s' = \mu_0 \frac{\pi(d+l)}{l}.$$

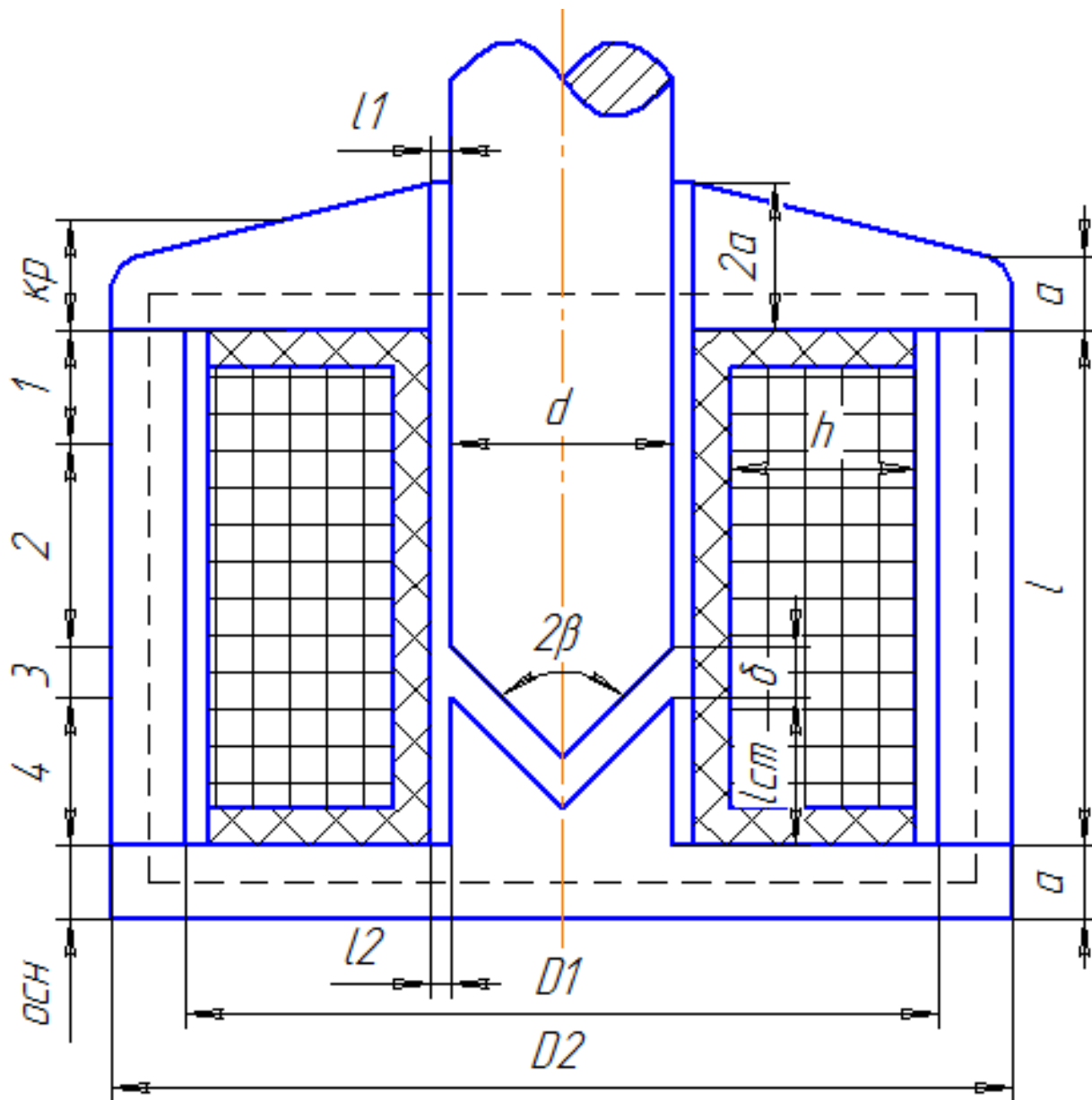


Рис. 2.1. Схема якоря с конической выточкой

Материал магнитопровода – сталь 10.

Магнитная индукция $B_{\text{он}} = 0,48$ Тл.

Напряжение питания $U_{\text{пит}} = 48$ В.

Геометрические размеры к рис. 2.1

№ вар.	Геометрические размеры магнитной цепи (мм)												
	d	D_1	D_2	l	$l_{\text{я}}$	$l_{\text{ст}}$	a	l_1	l_2	$\delta_{\text{н}}$	$\delta_{\text{к}}$	h	2β
1	15	51	61	36	23	10	5	1,5	0,05	3	0,25	18	90°
2	16	52	62	38	24	11	5	1,6	0,07	4	0,2	19	90°
3	17	53	63	39	25	12	5	1,7	0,08	4	0,2	20	90°
4	18	54	64	40	26	13	5	1,8	0,09	5	0,2	21	90°
5	19	55	65	43	27	14	5	1,9	0,09	6	0,2	2	90°
6	14	50	60	35	22	9	4	1,4	0,04	3	0,25	17	90°
7	13	49	59	34	21	8	4	1,3	0,04	3	0,25	16	90°
8	12	48	58	33	20	8	4	1,3	0,04	3	0,2	16	90°
9	11	47	57	32	19	8	4	1,2	0,04	3	0,2	15	90°
10	10	46	56	31	18	7	4	1,2	0,04	3	0,2	14	90°
11	15	51	61	38	23	10	5	1,5	0,05	3	0,25	18	60°
12	16	52	62	39	24	11	5	1,6	0,07	4	0,2	19	60°
13	17	53	63	40	25	12	5	1,7	0,08	4	0,2	20	60°
14	18	54	64	41	26	13	5	1,8	0,09	5	0,2	21	60°
15	19	55	65	42	27	14	5	1,9	0,09	6	0,2	22	60°
16	14	50	60	36	22	9	4	1,4	0,04	3	0,25	17	60°
17	13	49	59	35	21	8	4	1,3	0,04	3	0,25	16	60°
18	12	48	58	34	20	8	4	1,2	0,04	3	0,2	16	60°
19	11	47	57	33	19	7	4	1,3	0,04	3	0,2	15	60°
20	10	46	56	32	18	7	4	1,2	0,05	3	0,2	14	60°
21	16	52	62	38	23	11	5	1,6	0,07	5	0,3	20,5	80°
22	15	51	61	37	22	10	5	1,5	0,06	4	0,2	20	80°
23	14	50	60	36	21	10	5	1,4	0,05	3	0,25	19	80°

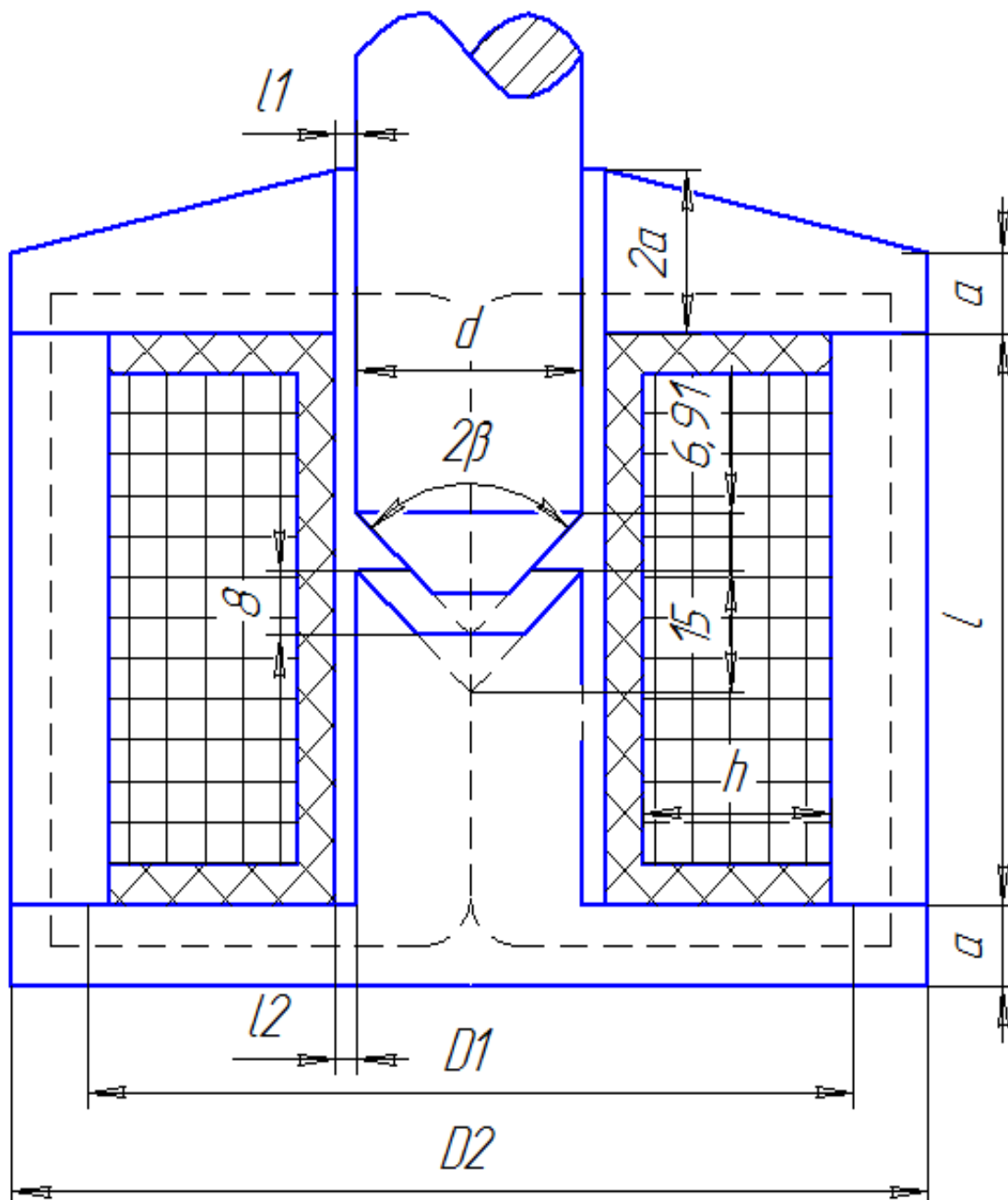


Рис. 2.2. Схема якоря с трапецеидальной выточкой

Материал магнитопровода – сталь 10.

Магнитная индукция $B_{\text{бн}} = 0,52$ Тл.

Напряжение питания $U_{\text{пит}} = 12$ В.

Геометрические размеры к рис. 2.2

№ вар.	Геометрические размеры магнитной цепи (мм)														
	D	D_1	D_2	l	$l_{я}$	$l_{ст}$	a	l_1	l_2	δ_H	δ_K	h'	H	h	2β
1	28	54	61	56	57	20,5	3,5	1,5	0,05	13	0,5	10,3	15,7	9,5	80°
2	29	55	62	57	58	21	3,5	1,6	0,05	14	0,6	10,4	15,9	10,5	80°
3	30	56	63	58	59	22	3,5	1,7	0,06	15	0,7	10,5	16	11,5	80°
4	31	57	64	59	60	23	3,5	1,7	0,06	16	0,75	10,5	16,1	12,5	80°
5	32	58	65	59	60	24	3,5	1,75	0,07	16	0,8	10,6	16,1	13	80°
6	27	53	60	55	56	20	3,5	1,4	0,05	12	0,4	10,2	15,6	9,4	60°
7	26	52	59	54	55	19,5	3,2	1,4	0,04	12	0,3	10,1	15,4	9,4	60°
8	25	51	58	53	54	19	3,2	1,3	0,04	11,5	0,3	10	15,3	9,3	60°
9	24	50	57	52	53	19	3,1	1,3	0,04	11	0,3	10	15,2	9,2	60°
10	24	49	56	51	54	19	3,1	1,3	0,04	11	0,3	9,8	15,1	9,2	60°
11	28	54	61	56	57	20,5	3,5	1,5	0,05	13	0,5	10,3	15,7	9,5	60°
12	29	55	62	57	58	21	3,5	1,6	0,05	14	0,6	10,4	15,9	10,5	60°
13	30	56	63	58	59	22	3,6	1,6	0,06	15	0,7	10,5	16	11	60°
14	31	57	64	59	60	23	3,6	1,6	0,06	15	0,7	10,5	16	11	60°
15	32	58	65	60	61	24	3,6	1,7	0,07	16	0,8	10,6	16,1	12	60°
16	28	55	62	57	58	21	3,6	1,7	0,07	16	0,5	10,4	16	10	45°
17	29	55	62	57	59	22	3,6	1,7	0,07	16	0,6	10,5	16,1	11,5	45°
18	30	56	63	58	59	22	3,6	1,7	0,07	16	0,7	11	16,2	12	45°
19	31	57	64	59	60	23	3,6	1,7	0,07	16	0,75	11	16,2	12,5	45°
20	32	58	65	59	60	24	3,6	1,75	0,07	16	0,8	11	16,2	13	45°
21	31	57	64	59	61	24	3,6	1,7	0,06	16	0,8	10,6	16,1	11,5	90°
22	30	56	63	58	60	23	3,6	1,6	0,06	15	0,7	10,5	16	11	90°
23	29	55	62	57	59	22	3,6	1,5	0,06	15	0,6	10,5	15,9	10,5	90°
24	28	54	61	56	58	21	3,4	1,4	0,05	14	0,5	10,4	15,8	10	90°

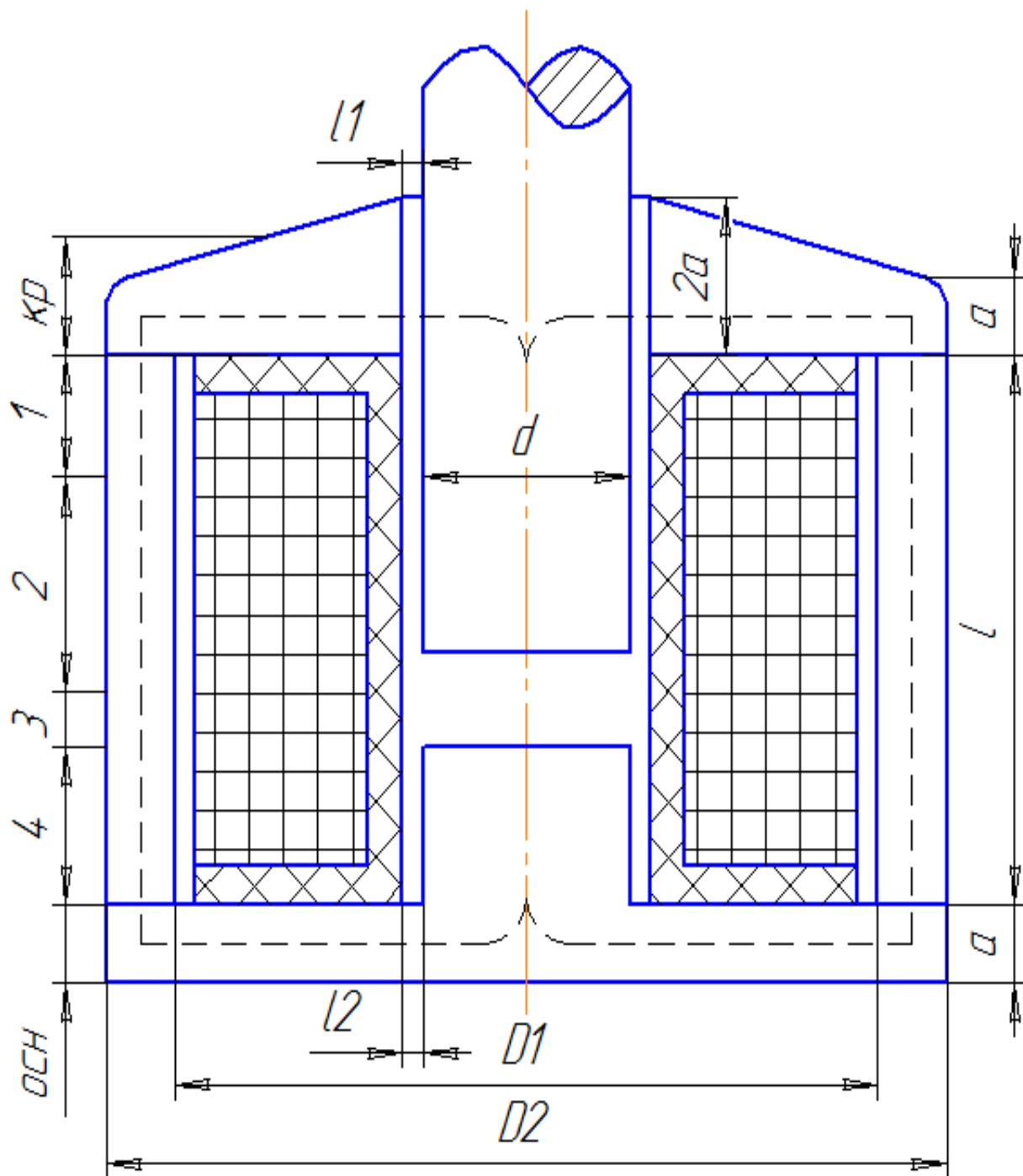


Рис. 2.3. Схема якоря с широким плоским концом

Материал магнитопровода – 08КП.

Магнитная индукция $B_{0H} = 0,82$ Тл.

Напряжение питания $U_{\text{пит}} = 24$ В.

Геометрические размеры к рис. 2.3

№ вар.	Геометрические размеры магнитной цепи (мм)											
	d	D_1	D_2	l	$l_{\text{я}}$	$l_{\text{ст}}$	a	l_1	l_2	$\delta_{\text{н}}$	$\delta_{\text{к}}$	h
1	28	54	61	56	58	21	3,2	1,5	0,05	14	0,5	10
2	29	55	62	57	59	22	3,2	1,6	0,05	14	0,6	11
3	30	56	63	58	60	23	3,2	1,7	0,06	16	0,7	12
4	31	57	64	59	61	24	3,3	1,8	0,07	16	0,8	13
5	32	58	65	60	62	25	3,4	1,8	0,08	16	0,8	14
6	27	53	60	55	57	20	3,1	1,4	0,05	14	0,5	10,5
7	26	52	59	54	56	19	3,1	1,3	0,05	13	0,5	10
8	25	51	58	53	55	18	3,0	1,3	0,04	12	0,4	9,5
9	24	50	57	52	54	17	3,0	1,2	0,04	11	0,4	9,0
10	23	49	56	51	53	16	2,9	1,1	0,04	10,5	0,3	9,0
11	33	60	67	63	65	28	3,5	1,9	0,09	18	0,9	9,7
12	34	61	68	64	66	29	3,5	1,9	0,1	18	0,9	9,8
13	35	62	69	65	67	30	3,5	1,9	0,1	17	0,8	9,9
14	36	63	70	66	68	31	3,5	1,9	0,09	16	0,7	9,7
15	36	64	70	67	69	32	3,0	1,8	0,08	15	0,6	10,4
16	31	65	71,4	62	64	26	3,2	1,6	0,06	14	0,5	12,8
17	32	66	72	63	65	27	3,0	1,7	0,06	15	0,6	13,6
18	33	67	73	64	66	28	3,0	1,8	0,07	16	0,7	13,8
19	34	68	74	65	67	29	3,0	1,9	0,08	17	0,7	14,0
20	35	68	72	67	69	30	2,0	1,8	0,08	16	0,6	12,9
21	22	48	55	50	52	15	2,8	1,0	0,03	9,5	0,2	8,0
22	21	47	54	49	51	14	2,7	0,9	0,03	9,5	0,2	8,0

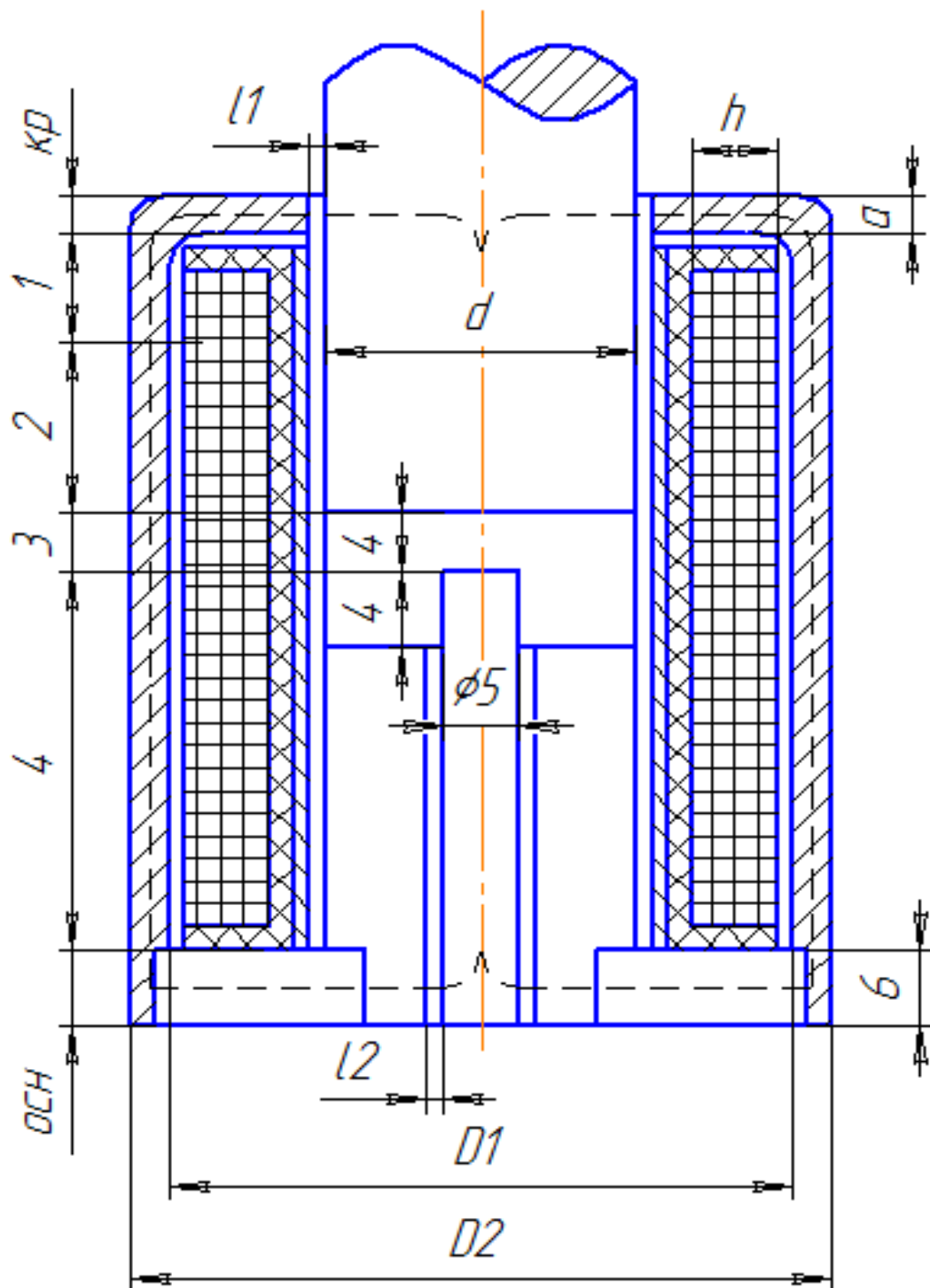


Рис. 2.4. Схема якоря с узким плоским концом

Материал магнитопровода – Э10.

Магнитная индукция $B_{\text{он}} = 0,86$ Тл.

Напряжение питания $U_{\text{пит}} = 12$ В.

Геометрические размеры к рис. 2.4

№ вар.	Геометрические размеры магнитной цепи (мм)											
	d	D_1	D_2	l	$l_{я}$	$l_{ст}$	a	l_1	l_2	δ_H	δ_K	h
1	21	36	43	56	46	20	1,5	1,8	0,06	12	0,8	6,0
2	22	37	44	57	47	21	1,5	1,9	0,06	12	0,8	7,0
3	23	38	45	58	48	22	1,6	1,9	0,07	13	0,9	8,0
4	24	39	46	59	49	23	1,7	2,0	0,08	14	0,9	9,0
5	25	40	47	60	50	24	1,8	2,1	0,09	14	1,0	10,0
6	26	41	48	61	51	25	1,9	2,2	0,1	15	1,0	11,0
7	27	42	49	62	52	26	1,9	2,2	0,1	15	1,0	12,0
8	28	43	50	63	53	27	1,9	2,2	0,1	15	1,1	13,0
9	29	44	51	64	54	28	2,0	2,25	0,15	16	1,1	14,0
10	30	45	52	65	55	28	2,0	2,25	0,15	16	1,1	15,0
11	20	35	42	57	45	19	1,5	1,8	0,06	12	0,8	6,0
12	19	34	41	56	44	18	1,5	1,7	0,06	12	0,7	6,0
13	18	33	40	55	45	17	1,4	1,7	0,05	11,5	0,7	5,5
14	17	32	39	54	44	16	1,4	1,6	0,05	11,5	0,6	5,5
15	16	31	38	55	43	15	1,4	1,6	0,05	11	0,6	5,0
16	21,5	36	44	58	47	21	2,0	1,6	0,08	11	0,7	7,5
17	22,5	37	45	59	48	22	2,0	1,7	0,08	11,5	0,7	8,0
18	23,5	38	46	60	49	22,5	2,1	1,7	0,09	12	0,75	8,0
19	24	38	47	60	50	23	2,2	1,8	0,1	12,5	0,75	8,5
20	25	39	47	61	50	23,5	2,2	1,8	0,15	12,5	0,75	8,5
21	25,5	40	48	61	51	23,5	2,2	1,9	0,15	13	0,8	9,0
22	26	41	49	62	51	24	2,2	1,9	0,15	13,5	0,8	9,0

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ

Для равномерного (однородного) поля магнитная проводимость воздушного зазора определяется по формуле [2]

$$G_{\delta 0} = \frac{S}{\delta} \mu_0, \quad (3.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;

S – сечение полюса магнитопровода, м²;

δ – длина воздушного зазора, м.

В приведенных конструкциях (см. рис. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) полюсов поле неравномерное, поэтому проводимость воздушного зазора (G_{δ}) определяется как сумма проводимости равномерного поля ($G_{\delta 0}$), проводимости выпучивания ($G_{\delta e}$) и проводимости через боковые грани ($G_{\delta x}$), то есть

$$G_{\delta} = G_{\delta 0} + G_{\delta e} + G_{\delta x}, \quad (3.2)$$

следовательно и поток Φ_{δ} представляет сумму:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta 0} + \Phi_{\delta e} + \Phi_{\delta x}. \quad (3.3)$$

Расчет проводимостей воздушных зазоров производится по формулам (п. 2.1), там же приведена формула для определения проводимостей с боковых граней ($G_{\delta x}$).

Согласно [5] при условии, что длина полуокружности линии магнитной индукции, идущей от боковой поверхности $\pi\left(\frac{\delta}{2} + x\right)$, меньше расстояния между магнитопроводом и полюсом $(D-d) = 2h$, x определяется следующим образом:

$$x = \frac{2h}{\pi} - \frac{\delta}{2}. \quad (3.4)$$

Один из способов расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров методом суммирования простых объемных фигур приведен ниже.

Удельные проводимости рассеяния g_s определяются по формулам пунктов 2.1, 2.2, 2.3.

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАССЕЯНИЯ

При расчете магнитной цепи необходимо иметь данные о распределении потоков по всему магнитопроводу. При инженерных расчетах принимают во внимание два потока: главный (Φ_δ), проходящий через воздушный зазор, и поток рассеяния (Φ_s). Для расчетного сечения (x) магнитный поток (Φ_x) будет равен сумме главного потока и потока рассеяния:

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_{sx}. \quad (3.5)$$

Отношение потоков Φ_x/Φ_δ называется коэффициентом рассеяния (G_x) сечения x :

$$\zeta_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_\delta}. \quad (3.6)$$

Для упрощения расчета примем допущения:

- поле рассеяния расположено вдоль оси сердечника;
- разность магнитных потенциалов изменяется линейно;
- обмотка по сердечнику распределена равномерно, тогда:

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \zeta_x \Phi_\delta. \quad (3.7)$$

Для предлагаемых конструкций электромагнитов с втяжным якорем поток рассеяния распадается на две части: поток на участке $\ell_{ст}$, идущий между неподвижным сердечником (стопом) и корпусом, и поток, идущий на участке от якоря к корпусу. Обозначим поток рассеяния, связанный с якорем, как $\Phi_{ся}$, а поток рассеяния, связанный со стопом, – как $\Phi_{ст}$.

Соответственно коэффициенты рассеяния обозначим через ζ_x и ζ_y .

Если принять изменение магнитного потенциала по длине магнитопровода равным нулю ($U_{ме} = 0$), то значение коэффициентов рассеяния можно записать в виде:

$$\zeta_x = 1 + \left(\ell_{я} - \frac{x}{2} \right) \cdot g_s \cdot \frac{x}{l} \cdot G_\delta; \quad (3.8)$$

$$\zeta_y = 1 + \left(\ell_{см} - \frac{y}{2} \right) \cdot g_s \cdot \frac{x}{l} \cdot G_\delta, \quad (3.9)$$

где $\ell_{я} = \ell - \ell_{ст} - \delta$.

Так, для $x_1 = 0$ $\zeta_{x1} = 1$.

Для участков якоря $x_2=0,5\ell_{\text{я}}$, $x_3=\ell_{\text{я}}$ и участков стопа $y_1=0$, $y_2=\ell_{\text{ст}}$ следует определить магнитные проводимости.

3.2. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ РАССЕЯНИЯ

Считаем, что величина магнитной индукции $B_{\delta\text{н}}$ для $\delta_{\text{н}}$ и геометрические размеры магнитопровода (см. рис. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) заданы.

Коэффициенты рассеяния определены в предыдущем разделе. Определим величины магнитных потоков для сечений x_1 , x_2 , x_3 , y_1 , y_2 и паразитных зазоров ℓ_1 и ℓ_2 : $\Phi_1=\Phi_{\delta\text{н}} \cdot \zeta_{x1}$, $\Phi_2=\Phi_{\delta\text{н}} \cdot \zeta_{x2}$ и т.д.

Зная величины магнитных потоков, определить значения магнитных индукций на участках якоря, стопа, в крышке, в основании кожуха.

$$B_{\text{я}} = \Phi_{\delta}/S_{\text{я}};$$

$$B_{\text{ст1}} = \Phi_{\delta}/S_1;$$

$$B'_{\text{ст1}} = \Phi_{\delta}/S'_1;$$

$$B_{\text{ст2}} = \Phi_{\delta}/S_2;$$

$$B'_{\text{ст2}} = \Phi_{\delta}/S'_2;$$

$$B_{\text{ст3}} = \Phi_{\delta}/S_3.$$

По известным значениям индукции рассчитываются напряженности магнитного поля на каждом участке с использованием кривой намагничивания (рис. П1).

Для каждого участка стали определяют падение магнитного потенциала ($U_{\text{м}}$) на нем, т.е. $U_{\text{мя}} = I \omega_{\text{я}} = H'_{\text{стя}} \cdot \ell_{\text{я}}$, $U'_{\text{мст1}} = H_{\text{ст1}} \cdot \ell_1$.

Намагничивающая сила катушки рассчитывается как сумма падений магнитного потенциала по замкнутому контуру рабочего потока Φ_{δ} . Замкнутый контур состоит из участков: рабочий зазор, паразитные зазоры, якорь, основание, стоп, кожух, крышка.

$$\theta_{\kappa} = (I\omega) + (I\omega)_{\text{е}} + (I\omega)_{\text{я}} + (I\omega)_{\text{cm1}} + (I\omega)'_{\text{cm}} + (I\omega)_{\text{cm2}} + (I\omega)'_{\text{cm2}} + (I\omega)_{\text{cm3}}. \quad (3.10)$$

Если сечения ярма и сердечника равны $S_1 = S'_1$, то $B_{\text{ст1}} = B'_{\text{ст1}}$, $B_{\text{ст2}} = B'_{\text{ст2}}$.

3.3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Напряжение питания дано в задании. Требуется рассчитать необходимый диаметр провода и число витков обмотки.

Геометрия магнитной цепи (см. рис. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4) дает максимальные размеры каркаса обмотки, а обмоточное окно катушки несколько меньше всей площади окна ($Q_k = h_k \cdot \ell_k$), т.е. принимается $Q_k = (0,8 \cdot 0,9) \cdot Q$.

Диаметр голого провода d (мм) можно определить из уравнения

$$Q_k = \omega \frac{U}{R}. \quad (3.11)$$

Здесь

$$R = \rho_U \cdot \omega \cdot \frac{l_{cp}}{q} = 4\rho_U \cdot \omega \cdot \frac{l_{cp}}{\pi d^2}, \quad (3.12)$$

где l_{cp} – длина среднего витка, ρ_U – удельное сопротивление материала обмотки (меди) при нагреве до температуры θ_n , Ом·мм²/м.

$$\rho_U = \rho(1 + \alpha U_n),$$

где $\alpha = 0,0041$ °C, $\rho = 0,0162 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, при 0 °C.

Из совместного решения уравнений (3.11) и (3.12) найдем:

$$d = 4\rho_U \cdot l_{cp} \cdot \theta_k / \pi U^{1/2}, \quad (3.13)$$

где $\ell_{cp} = \frac{2\pi(d+h)}{2} = \pi(d+h) \cdot 10^{-3}$, м.

Найденное значение диаметра голого провода (d) округляют в сторону увеличения с учетом изоляции и по ГОСТ определяют ближайший по размеру. Таким образом, известны диаметры голого (d) и изолированного (d_1) проводов.

Коэффициент заполнения обмотки по меди есть отношение площади поперечного сечения меди всех витков обмотки (Q_n) к площади обмоточного окна (Q_k), т.е.

$$K_{zn} = \frac{Q_n}{Q_k} = \pi d^2 \cdot \frac{\omega}{4h_k} \cdot \ell_k = \omega_0 \cdot \frac{d^2}{4}, \quad (3.14)$$

где ω_0 – удельное число витков.

$$\omega_0 = 18,3 \text{ в/мм}^2.$$

Число витков обмотки

$$\omega = \ell_{\kappa} \cdot h_{\kappa} \cdot 4 \cdot \frac{K_{3H}}{\pi d^2} = \omega_0 \cdot \ell_{\kappa} \cdot h_{\kappa}. \quad (3.15)$$

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЯ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ НАД ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

В практических случаях для упрощения расчетов при установившемся тепловом режиме используется формула Ньютона, согласно которой превышение установившейся температуры обмотки над окружающим воздухом ($\tau_y = u_y - u_0$) выражается формулой

$$\tau_y = \frac{P}{K_T \cdot S_{охл}}, \quad (3.16)$$

где $P = I^2 R$ – мощность обмотки, Вт;

K_T – коэффициент теплоотдачи ($9 \div 14$) Вт/м²·°С;

$S_{охл}$ – охлаждающая поверхность обмотки, состоящая из внутренней (S_B) и наружной (S_H) поверхностей [5]:

$$S_{охл} = S_H + \eta_T \cdot S_B, \quad (3.17)$$

где η_T – коэффициент, характеризующий эффективность внутренней охлаждающей поверхности, принимается:

- для бескаркасных катушек – 0,9;
- с пластмассовым каркасом – 0;
- для катушек, обмотка которых наматывается на сердечник, – 2,4.

Если превышение температуры над окружающим воздухом ниже допустимой $\tau_y < \tau_{доп}$ (для провода марки ПЭЛ $\tau_{доп} = 105$ °С), то тепловой расчет на этом заканчивается.

Если $\tau_y > \tau_{доп}$, а обмоточное окно не позволяет увеличить число витков, то необходимо определить время включения при кратковременном режиме.

Для этого режима превышения температуры:

$$\tau = [1 - \exp(-tp/T_{\text{наг}})] \cdot \frac{P}{K_T} \cdot S_{\text{охл}}. \quad (3.18)$$

Подставив в уравнение (3.18) значение $\tau_y = \tau_{\text{доп}}$, можно определить время включения электромагнита (работы) tp , если известна $T_{\text{наг}}$ – постоянная времени нагрева:

$$T_{\text{наг}} = \frac{cM}{K_T} \cdot S_{\text{охл}}, \quad (3.19)$$

где c – удельная теплоемкость обмотки, равная 390 кг·°С;

M – масса обмотки, кг.

3.5. РАСЧЕТ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Если поле в рабочем зазоре равномерное и полюса ненасыщенные, то силу, развиваемую электромагнитом (для одного зазора), можно рассчитать по формуле Максвелла:

$$F_{\text{э}} = \frac{1}{2\mu_o} B^2 S, \quad (3.20)$$

или

$$F_{\text{э}} = 5,1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_o S}, \text{ кГс}, \quad (3.21)$$

где Φ_{δ} – магнитный поток в рабочем воздушном зазоре;

S – площадь полюса, м²;

$\mu_o = 0,4 \cdot 10^{-6}$, Гн/м.

Выражение электромагнитной силы с учетом слагающей от потоков рассеяния, которое учитывается вторым числом, стоящим в квадратных скобках, согласно [4] составляет:

$$F_{\text{э}} = \frac{1}{2} (I\omega)_{\delta}^2 \left[\left| \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \right| + g \left(\frac{\ell_z}{\ell_r} \right) \right], \quad (3.22)$$

где δ – рабочий воздушный зазор, м;

$\ell_{\text{я}}$ – длина якоря, м;

$\ell_{\text{к}}$ – длина катушки, м;

g_s – удельная проводимость рассеяния.

Величина $\left| \frac{dG_\delta}{d\delta} \right|$ определяется графически по кривой $G_\delta = f(\delta)$ или аналитически для каждого значения зазора ($\delta_n, \delta_{п1}, \delta_{п2}, \delta_k$) по формуле

$$\left| \frac{dG_\delta}{d\delta} \right| = \mu_o \frac{\pi d^2}{4\delta^2 \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (3.23)$$

По полученным значениям F_δ строится зависимость $F_\delta = f(\delta)$, которая имеет следующий вид (рис. 3.1).

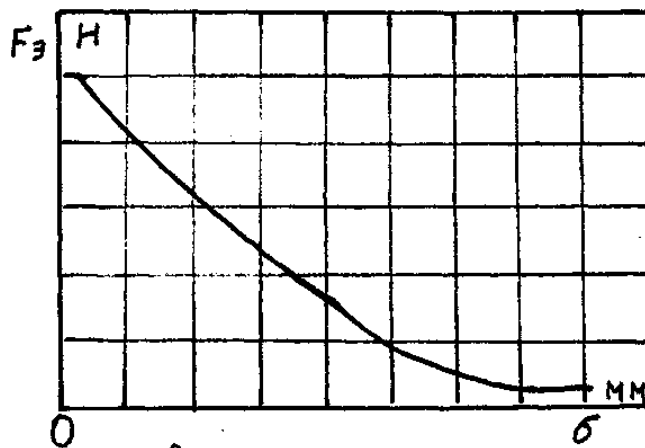


Рис. 3.1. График зависимости $F_\delta = f(\delta)$

3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ТРОГАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Полное время срабатывания состоит из времени трогания ($t_{тр}$) и времени движения ($t_{дв}$):

$$t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}. \quad (3.24)$$

Так как $t_{тр} > t_{дв}$, для приближенных расчетов временем движения $t_{дв}$ можно пренебречь и учитывать только $t_{тр}$.

При начальном зазоре (δ_n) магнитная цепь электромагнита не насыщена, поэтому:

$$U = iR + \frac{d\psi_H}{di} = iR + \frac{\lambda_H \cdot di}{dt}, \quad (3.25)$$

где

$$\psi_H = \lambda_H \cdot i = \omega^2 \cdot \zeta_{экв} \cdot i. \quad (3.26)$$

Согласно [2] для втяжных электромагнитов:

$$\zeta_{э\kappa\delta} = G_{\delta} + G_3 \frac{\ell_{\text{я}}^3 + \ell_{\text{см}}^3}{3\ell^2} = G_{\delta} + g_s \cdot h \frac{\ell_{\text{я}}^3 + \ell_{\text{см}}^3}{3\ell^2}. \quad (3.27)$$

Схема замещения магнитной цепи представлена на рис. 3.2.

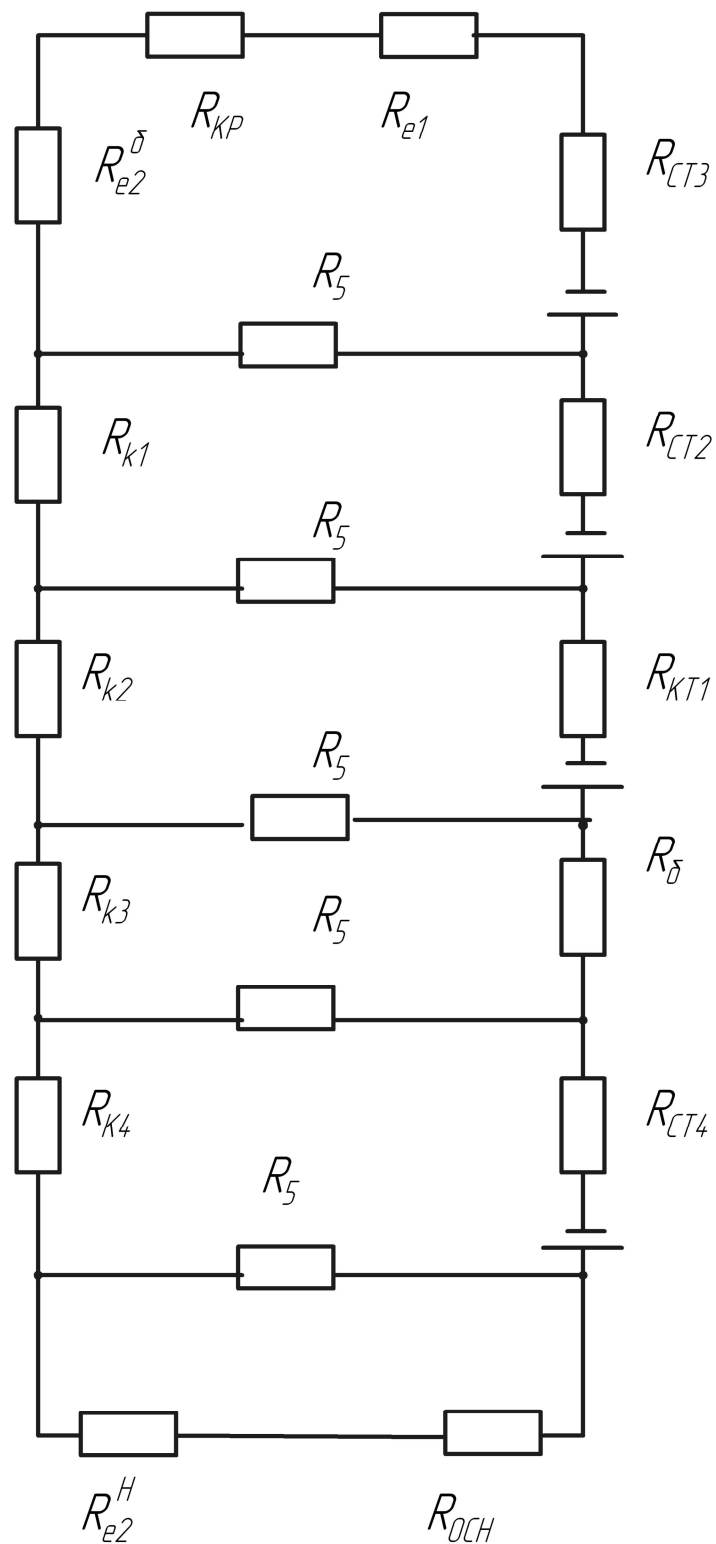


Рис. 3.2. Схема замещения магнитной цепи

Решаем уравнения (25) относительно тока:

$$i = [1 - \exp(-t/T_H)] \cdot U/R = [1 - \exp(-t/T_H)] \cdot I_y; \quad (3.28)$$

где

$$T_H = \frac{\lambda_n}{R} = \frac{\omega^2 G_{\text{экв}}}{R}. \quad (3.29)$$

Установившийся ток (I_y) определяется следующим образом:

$$I_y = \frac{U}{R}, \quad (3.30)$$

где U – напряжение питания обмотки, В;

R – сопротивление обмотки, Ом.

Движение якоря начинается в момент, когда $F_{\text{этр}} \geq \Sigma F_{\text{пн}}^1$ при соответствующем токе трогания ($I_{\text{тр}}$)

$$I_y = \frac{Q_{\Sigma}}{\omega}, \quad (3.31)$$

где Q_{Σ} – суммарная н.с.

ω – число витков обмотки.

Подставив значение тока в уравнение (3.28), получим искомое время трогания:

$$t_{\text{тр}} = \frac{T_H \cdot \ell_n I_y}{(I_y - I_{\text{тр}})} = \frac{T_H \cdot \ell_n K_3}{(K_3 - 1)}, \quad (3.32)$$

где коэффициент запаса $K_3 = \frac{I_y}{I_{\text{тр}}}$.

Таким образом, по представленным выше формулам могут быть найдены определенные заданием расчетные величины.

4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТЯГОВОГО РЕЛЕ СТАРТЕРА

Известны следующие данные:

- особенности конструктивного исполнения;
- геометрические размеры магнитной цепи (см. рис. 4.1);
- материал магнитопровода – сталь 10;
- величина магнитной индукции $B_{\text{дн}} = 0,48$ Тл;
- начальная величина зазора $\delta_n = 3,0$ мм;

- конечная величина зазора $\delta_n = 0,25$ мм;
- напряжение питания $U_{\text{пит}} = 48$ В.

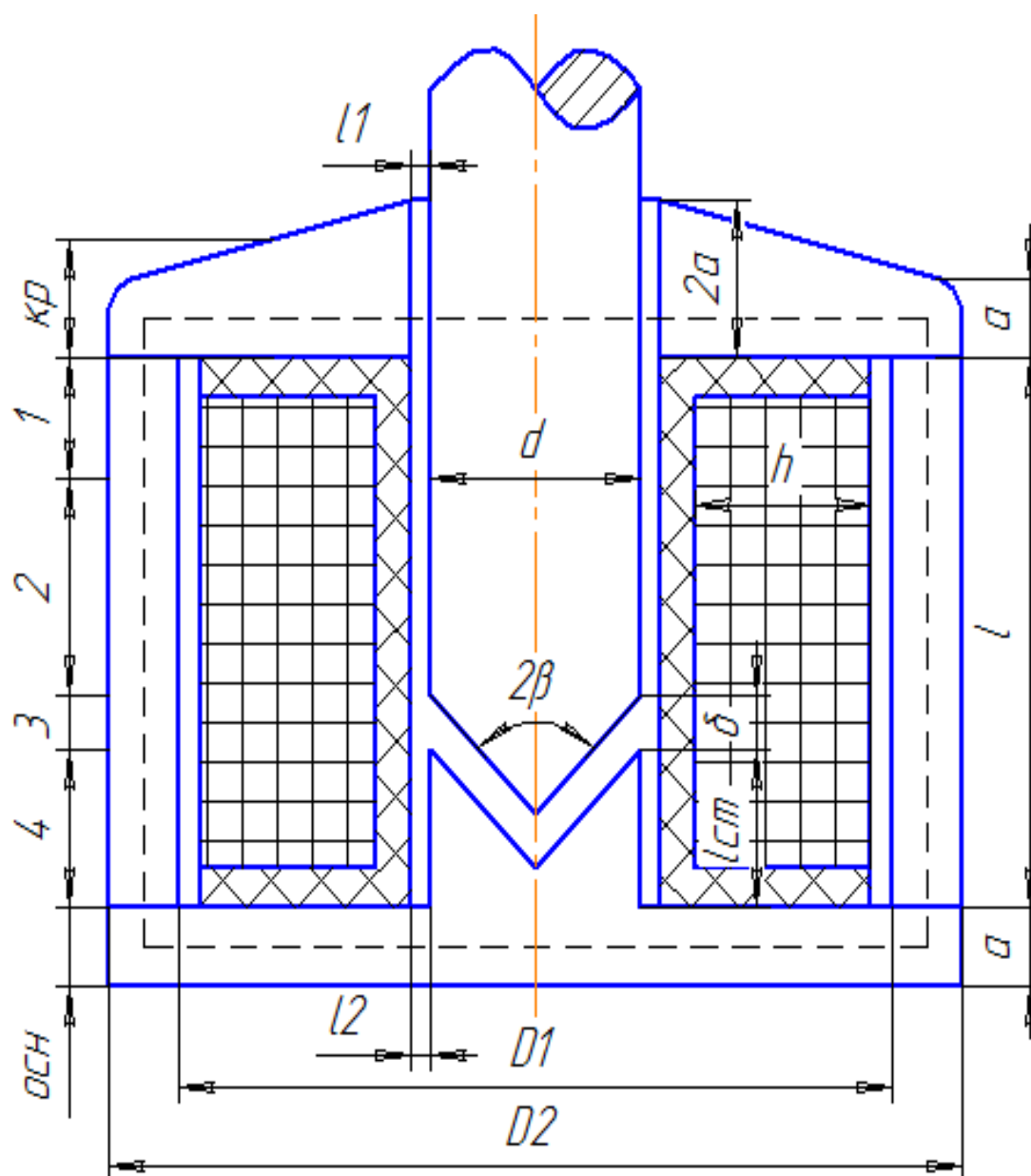


Рис. 4.1. Эскиз магнитной системы тягового реле (М2:1)

Требуется рассчитать:

- магнитные проводимости воздушных зазоров G_δ и G_e (рабочего и паразитного);
- проводимости рассеяния G_s для четырех положений якоря (начального δ_n , конечного δ_k и двух промежуточных $\delta_{п1}$, $\delta_{п2}$);
- величину намагничивающей силы обмотки электромагнита θ_n ;

- обмоточные параметры катушки электромагнита;
- магнитные потоки (рабочий Φ_δ и потоки рассеяния Φ_s);
- величину электромагнитной силы F_δ .

Также необходимо построить зависимость $F_\delta = f(\delta)$ и определить время трогания электромагнита $t_{\text{ТР}}$.

$$\begin{aligned} D &= 5 \text{ мм}; & \ell &= 36 \text{ мм}; \\ D &= 15 \text{ мм}; & \ell_{\text{СТ}} &= 10 \text{ мм}; \\ \ell_1 &= 1,5 \text{ мм}; & D &= 61 \text{ мм}; \\ \ell_2 &= 0,05 \text{ мм}; & \theta_{\text{Н}} &= 3,0 \text{ мм} \\ h &= 18 \text{ мм}; & \delta_{\text{К}} &= 0,25 \text{ мм}; \\ \alpha &= 45^\circ. \end{aligned}$$

4.1. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ

4.1.1. Проводимость рабочего воздушного зазора

$$G_\delta = G_{\delta o} + G_{\delta e} + G_{\delta k}.$$

Проводимость рабочего воздушного зазора с учетом выпучивания:

$$G_{\delta o} = G_{\delta o} - G_{\delta e} = \mu_o \left(\frac{\pi d^2}{4\delta \sin^2 \alpha} - \frac{0,175d}{\sin^2 \alpha} + 0,75d \right);$$

$$\delta_{\text{Н}} = 3 \text{ мм};$$

$$G_{\delta o \text{Н}} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi \cdot 225 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \sin^2 45^\circ} - \frac{0,175 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{\sin^2 45^\circ} + 0,75 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \right);$$

$$G_{\delta o \text{Н}} = 1,5626 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

$$\delta_{\text{Н1}} = 2 \text{ мм};$$

$$G_{\delta o \text{Н1}} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi \cdot 225 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \sin^2 45^\circ} - \frac{0,175 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{\sin^2 45^\circ} + 0,75 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \right);$$

$$G_{\delta o \text{Н1}} = 2,3028 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

$$\delta_{\text{Н2}} = 1 \text{ мм};$$

$$G_{\delta_{овн}} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi \cdot 225 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-3} \sin^2 45^0} - \frac{0,175 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{\sin^2 45^0} + 0,75 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \right);$$

$$G_{\delta_{овн}} = 4,5235 \cdot 10^{-7} \Gamma_H.$$

$$\delta_{н1} = 0,25 \text{ мм};$$

$$G_{\delta_{овн}} = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi \cdot 225 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \sin^2 45^0} - \frac{0,175 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{\sin^2 45^0} + 0,75 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \right);$$

$$G_{\delta_{овн}} = 17,8475 \cdot 10^{-7} \Gamma_H.$$

Проводимость боковых граней:

$$G_{\delta x} = \mu_o \frac{x \cdot d}{0,228\delta + 0,48};$$

$$x = \frac{2h}{\pi} - \frac{\delta}{2};$$

$$x_H = \frac{2 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{\pi} - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} = 9,9592 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$G_{\delta_{хн}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{9,9592 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,22 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 9,9592 \cdot 10^{-3}} = 4,0426 \cdot 10^{-8} \Gamma_H;$$

$$x_{H1} = \frac{2 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{\pi} - \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} = 10,4592 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$G_{\delta_{хн1}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10,4593 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,22 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 9,9592 \cdot 10^{-3}} = 4,2639 \cdot 10^{-8} \Gamma_H;$$

$$x_{H2} = \frac{2 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{\pi} - \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} = 10,9592 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$G_{\delta_{хн2}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10,9593 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,22 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 9,9592 \cdot 10^{-3}} = 4,4871931 \cdot 10^{-8} \Gamma_H;$$

$$x_K = \frac{2 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{\pi} - \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{2} = 11,3342 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$G_{\delta_{хк}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{11,3342 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{0,22 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 9,9592 \cdot 10^{-3}} = 4,6559 \cdot 10^{-8} \Gamma_H.$$

Полная проводимость рабочего воздушного зазора:

$$G_{\delta} = G_{\delta_{ов}} + G_{\delta x};$$

$$G_{\delta H} = 1,5626247 \cdot 10^{-7} + 4,0426209 \cdot 10^{-8} = 1,9668867 \cdot 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_{\delta H1} = 2,302845 \cdot 10^{-7} + 4,2639455 \cdot 10^{-8} = 2,7292395 \cdot 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_{\delta H2} = 4,523506 \cdot 10^{-7} + 4,4871931 \cdot 10^{-8} = 4,9722253 \cdot 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_{\delta K} = 17,847471 \cdot 10^{-7} + 4,6559059 \cdot 10^{-8} = 18,313061 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

Удельная проводимость рассеяния:

$$g_s = \mu_o \frac{2\pi}{\ln D/d} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2\pi}{\ln 61/75} = 5,628 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/м};$$

$$G_s = g_s \cdot \ell.$$

4.1.2. Проводимость паразитных воздушных зазоров

$$G_{\ell 1} = \mu_o \frac{(d + \ell_1)\pi \cdot 2a}{\ell_1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(15 - 1,5)\pi \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 5,6284 \cdot 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$G_{\ell 2} = \mu_o \frac{\pi(D^2 - (D - 2a)^2)\pi \cdot 2a}{4\ell_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi(51^2 - (61 - 2 \cdot 5)^2) \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,03 \cdot 10^{-3}} = 2,2108 \cdot 10^{-8}.$$

4.1.3. Коэффициенты рассеяния

а) На участке якоря:

$$1) x_1 = 0;$$

$$G_X = 1 + \frac{(\ell_{\text{я}} - x/2)g_{ix}}{\ell \cdot G_{\delta H}};$$

$$\ell_{\text{я}} = \ell \cdot \ell_{CT} \cdot \delta = (36 - 10 \cdot 3) \cdot 10^{-3} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$G_{X1} = 1,$$

$$2) x_2 = 0,5\ell_{\text{я}} = 11,5 \cdot 10^{-3};$$

$$G_{X2} = 1 + \frac{(23 - 11,5/2) \cdot 10^{-3} \cdot 5,6284 \cdot 10^{-6} \cdot 11,5 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9669 \cdot 10^{-7}} = 1,114463,$$

$$3) x_3 = \ell_{\text{я}} = 23 \cdot 10^{-3};$$

$$G_{X3} = 1 + \frac{(23 - 23/2) \cdot 10^{-3} \cdot 5,6284 \cdot 10^{-6} \cdot 23 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9669 \cdot 10^{-7}} = 1,191965,$$

б) на участке стопа:

$$1) y_1 = 0;$$

$$G_{y1} = 1 + \frac{(\ell_{CT} - y/2)g_s \cdot y}{\ell \cdot G_{\delta H}};$$

$$G_{y1} = 1;$$

$$2) y_2 = \ell_{cm} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ М};$$

$$G_{y1} = 1 + \frac{(10 - 10/2) \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9669 \cdot 10^{-7}};$$

$$G_{y2} = 1,0397.$$

4.2. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПО КОЭФФИЦИЕНТАМ РАССЕЯНИЯ

4.2.1. Расчет магнитных потоков

$$\Phi_1 = \Phi_{\delta H} \cdot G_{X1} = \Phi_{\delta H} = B_{\delta H} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0,48 \cdot \frac{\pi \cdot 15^2 \cdot 10}{4};$$

$$\Phi_1 = 8,4823 \cdot 10^{-5} \text{ ВТ};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{\delta H} \cdot G_{X2} = 8,4823 \cdot 10^5 \cdot B_{\delta} \cdot 1,114463 = 9,4532 \cdot 10^{-5} \text{ ВТ};$$

$$\Phi_3 = \Phi_{\delta H} \cdot G_{X3} = 8,4823 \cdot 10^5 \cdot B_{\delta} \cdot 1,191963 = 10,1106 \cdot 10^{-5} \text{ ВТ};$$

$$\Phi_{\ell 1} = \Phi_3 = \Phi_{\ell 2};$$

$$\Phi_4 = \Phi_{\delta H} \cdot G_{y1} = \Phi_{\delta H} = 8,4823 \cdot 10^{-5};$$

$$\Phi_5 = \Phi_{\delta H} \cdot G_{y2} = 8,4823 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0397 = 8,819 \cdot 10^{-5} \text{ ВТ};$$

$$\Phi_{\ell 2}^4 = \Phi_5.$$

4.2.2. Расчет индукции и напряженности

а) На участке якоря H находим по кривой намагничивания:

$$B_{CT1} = \frac{\Phi_1}{S_{\text{я}}} = B_{\delta H} = 0,48 \text{ ТЛ};$$

$$H_{CT1} = 220 \text{ А/м};$$

$$B_{CT2} = \frac{\Phi_2}{S_{\text{я}}} = \frac{9,4532 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{\pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}} = 0,53 \text{ ТЛ};$$

$$H_{CT2} = 250 \text{ А/м};$$

$$B_{CT3} = \frac{\Phi_3}{S_{\text{я}}} = \frac{10,1106 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{\pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}} = 0,57 \text{ Тл};$$

$$H_{CT2} = 260 \text{ А/м},$$

б) на участке стопа:

$$B_{CT4} = \frac{\Phi_H}{S_{\text{я}}} = B\delta_H = 0,48 \text{ Тл};$$

$$H_{CT4} = 220 \text{ А/м},$$

в) в крышке:

$$B_{KP} = \frac{\Phi_3}{S_K} = \frac{\Phi_3}{2\pi\left(\frac{d}{2} + \frac{h+d}{2}\right) \cdot 1,5a} = \frac{\Phi_3}{\pi(d+h+a) \cdot 1,5a} =$$

$$= \frac{10,1106 \cdot 10^{-5}}{\pi(15+18+5) \cdot 1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 0,1129 \text{ Тл};$$

$$H_{KP} = 115 \text{ А/м},$$

г) в основании:

$$B_{OCH} = \frac{\Phi_5}{S_K} = \frac{\Phi_5}{\pi \frac{D}{d} \cdot a} = \frac{8,819 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot \frac{\delta_1}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 0,1841 \text{ Тл};$$

$$H_{OCH} = 140 \text{ А/м},$$

д) в кожухе:

$$B_{K1} = \frac{\Phi_2}{S_K} = \frac{4 \cdot \Phi_2}{\pi(D^2 - (D-2a)^2)} = \frac{9,4532 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{\pi(61^2 - (61-2 \cdot 5)^2) \cdot 10^{-6}} = 0,1075 \text{ Тл};$$

$$H_{K1} = 115 \text{ А/м};$$

$$B_{K2} = B_{K3} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_K} = \frac{8,4823 \cdot 10^{-5} \cdot 4}{\pi(61^2 - (61-2 \cdot 5)^2) \cdot 10^{-6}} = 0,0964 \text{ Тл};$$

$$H_{K2} = 110 \text{ А/м};$$

$$H_{K2} = H_{K3} = H_{K4}.$$

4.2.3. Падение магнитного потенциала на участках магнитной цепи

а) В рабочем зазоре:

$$(\omega I)_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}} = \frac{8,4823 \cdot 10^{-5}}{1,9668867 \cdot 10^{-7}} = 431,2551 \text{ АВ},$$

б) в паразитном зазоре:

$$(\omega I)_{\ell 1} = \frac{\Phi_3}{G_{\ell 1}} = \frac{10,1106 \cdot 10^{-5}}{3,5531 \cdot 10^{-7}} = 284,5571 \text{ АВ};$$

$$(\omega I)_{\ell 2}^{\gamma} = \frac{\Phi_3}{G_{\ell 2}} = \frac{10,1106 \cdot 10^{-5}}{2,2108 \cdot 10^{-6}} = 4,5733 \text{ АВ};$$

$$(\omega I)_{\ell 2}^m = \frac{\Phi_5}{G_{\ell 2}} = \frac{8,819 \cdot 10^{-5}}{2,2108 \cdot 10^{-6}} = 3,9891 \text{ АВ},$$

в) в якоре:

$$(\omega I)_{\text{я}} = H_{CT1} \cdot \ell_{\text{я}1} = 220 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 2,75 \text{ АВ};$$

$$(\omega I)_{\text{я}} = H_{CT2} \cdot \ell_{\text{я}2} = 250 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 3,125 \text{ АВ};$$

$$(\omega I)_{\text{я}} = H_{CT3} \cdot \ell_{\text{я}3} = 260 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 3,25 \text{ АВ},$$

г) в основании:

$$(\omega I)_{OCH} = H_{OCH} \cdot D/2 = 140 \cdot \frac{61 \cdot 10^{-3}}{2} = 4,27 \text{ АВ},$$

д) в стопе:

$$(\omega I)_{CT} = H_{CT4} \cdot \ell_{CT} = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2,2 \text{ АВ},$$

е) в кожухе:

$$(\omega I)_{K1} = H_{K1} \cdot \ell_{K1} = 115 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 1,4375 \text{ АВ};$$

$$(\omega I)_{K2} = H_{K2} \cdot \ell_{K2} = 110 \cdot 23,5 \cdot 10^{-3} = 2,585 \text{ АВ},$$

ж) в крышке:

$$(\omega I)_{KP} = H_{KP} \cdot (D - \vartheta - 2\ell_1)/2 = 115 \cdot (61 - 15 - 2 \cdot 1,5) \cdot 10^{-3} / 2 = 2,4725 \text{ АВ};$$

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} = & (\omega I)_{\delta} + (\omega I)_{\ell 1} + (\omega I)_{\ell 2}^{\delta} + (\omega I)_{\ell 2}^m + (\omega I)_{\text{я}1} + (\omega I)_{\text{я}2} + (\omega I)_{\text{я}3} + (\omega I)_{OCH} + \\ & + (\omega I)_{CT} + (\omega I)_{K1} + (\omega I)_{K2} + (\omega I)_{KP} = 746,4646 \text{ Ав}. \end{aligned}$$

Удельное сопротивление обмотки при температуре $Q = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для медного провода.

$$S = S_o \cdot (1 + 2U_H) = 0,0162(1 + 0,004 \cdot 40) = 0,018792 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Диаметр провода

$$d = \left(4\rho_U \cdot \ell_{CP} \cdot \frac{Q_K}{\pi U^{1/2}} \right) = 0,0162(1 + 0,004 \cdot 40) = 0,018792 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$$d = 0,1736 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Выбираем провод марки ПЭВ-1 (табл. 4.1).

Диаметр голого провода $d = 0,17 \text{ мм}$.

Диаметр изолированного провода $d_1 = 0,2 \text{ мм}$.

Удельное число витков $\omega_0 = 18,3 \text{ в/мм}^2$.

Коэффициент заполнения обмотки по меди

$$K_{3M} = \frac{\omega_o \cdot \pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 18,3 \cdot 0,17^2}{4} = 0,4154.$$

Число витков обмотки

$$\omega = \omega_o \cdot h_K \cdot \ell_K = \omega_o Q_K = 18,3 \cdot 283,2 = 10672,5 \text{ в}.$$

Сопротивление обмотки

$$R = \frac{4\rho_U \cdot \omega \cdot \ell_{CP}}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,018792 \cdot 10672,56 \cdot 103,6725 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,17^2} = 581,3442 \text{ Ом}.$$

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЯ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАД ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Охлаждающая поверхность обмотки

$$S_{охл} = S_H + \eta_T S_B = \pi(d + 2h)\ell + 1,1\pi d\ell = \\ = \pi(15 + 2 \cdot 18) \cdot 35 \cdot 10^{-6} + 1,1\pi \cdot 15 \cdot 36 \cdot 10^{-6} = 7,2948 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Мощность обмотки

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = \frac{48^2}{681,3442} = 3,3815 \text{ Вт}.$$

Превышение установившейся температуры

$$\tau_y = \frac{P}{K_T \cdot S_{\text{охл}}} = \frac{3,3815}{12 \cdot 7,2948 \cdot 10^{-3}} = 38,62 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$\tau_{\text{доп}} = 105^\circ - 40^\circ = 65 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Превышение установившейся температуры над температурой окружающего воздуха для провода марки ПЭВ1 меньше допустимого значения.

$$\tau_y = 38,62 \text{ } ^\circ\text{C} < \tau_{\text{доп}} = 65 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$(\omega I) = \frac{\omega U}{R} = \frac{10672,56 \cdot 56 \cdot 48}{681,3442} = 751,8709 \text{ АВ};$$

$$(\omega I) = 752 > Q_\Sigma = 746 .$$

4.5. РАСЧЕТ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Сила тяги электромагнита:

$$F_{\text{э}} = 0,5(\omega I)_r^2 \left[\left| \frac{dG_{\delta}}{d_{\delta}} \right| + g \left(\frac{\ell_{\text{я}}}{\ell} \right)^2 \right];$$

$$\left| \frac{dG_{\delta}}{d_{\delta}} \right| = \mu_o \frac{\pi d^2}{4\delta^2 \cdot \sin^2 \alpha} .$$

$$\delta_H = 3 \text{ мм};$$

$$\left| \frac{dG_{\delta H}}{d_{\delta H}} \right| = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3^2 \cdot 10^{-6} \sin^2 45^\circ} = 49,348 \text{ ГН/м};$$

$$F_{\text{эH}} = 0,5 \cdot 431,2551^2 \left(49,348 \cdot 10^{-6} + 5,6284 \cdot 10^{-6} \left(\frac{23}{36} \right)^2 \right) = 4,8025 \text{ Н}.$$

$$\delta_{\text{II}} = 2 \text{ мм};$$

$$\left| \frac{dG_{\delta_{\text{II}}}}{d_{\delta_{\text{II}}}} \right| = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 2^2 \cdot 10^{-6} \sin^2 45^\circ} = 111,033 \text{ ГН/м};$$

$$F_{\text{эII}} = 0,5 \cdot 431,2551^2 \left(111,033 \cdot 10^{-6} + 5,6284 \cdot 10^{-6} \left(\frac{23}{36} \right)^2 \right) = 10,5386 \text{ Н}.$$

$$\delta_{\text{II2}} = 1 \text{ мм};$$

$$\left| \frac{dG_{\delta n2}}{d_{\delta n2}} \right| = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-6} \sin^2 45^0} = 444,1322 \text{ Гн/м};$$

$$F_{\text{ЭП2}} = 0,5 \cdot 431,2551^2 \left(444,1322 \cdot 10^{-6} + 5,6284 \cdot 10^{-6} \left(\frac{23}{36} \right)^2 \right) = 41,5137 \text{ Н.}$$

$$\delta_K = 0,25 \text{ мм};$$

$$\left| \frac{dG_{\delta K}}{d_{\delta K}} \right| = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \cdot 15^2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,75^2 \cdot 10^{-6} \sin^2 45^0} = 1776,5287 \text{ Гн/м};$$

$$F_{\text{ЭК}} = 0,5 \cdot 431,2551^2 \left(1776,5287 \cdot 10^{-6} + 5,6284 \cdot 10^{-6} \left(\frac{23}{36} \right)^2 \right) = 165,4 \text{ Н.}$$

4.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ТРОГАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Эквивалентная проводимость электромагнита при δ_H :

$$G_{\text{экв}} = G_{\delta} + G_3 \frac{\ell_{\text{Я}}^3 + \ell_{\text{СТ}}^3}{2\ell^2} = G_{\delta} + g_3 h \frac{\ell_{\text{Я}}^3 + \ell_{\text{СТ}}^3}{2\ell^2};$$

$$G_{\text{экв}} = 1,9669 \cdot 10^{-6} + 5,6284 \cdot \frac{23^3 + 10^3}{236^2} \cdot 10^3;$$

$$G_{\text{экв}} = 197,2046 \cdot 10^{-9};$$

$$T_M = \frac{\omega^2 \cdot \epsilon_{\text{экв}}}{R} = \frac{10672,56^2 \cdot 197,2045 \cdot 10^{-9}}{681,3442} = 0,03297 \text{ с.}$$

Установившийся ток

$$I_Y = \frac{U}{R} = \frac{48}{681,3442} = 70,449 \text{ мА.}$$

Ток трогания

$$I_{TP} = \frac{Q_{\delta}}{\omega} = \frac{746,4646}{10672,56} = 69,9424 \text{ мА.}$$

Время трогания

$$t_{TP} = T_H \cdot \ln \left(\frac{I_Y}{I_Y - I_{TP}} \right) = 0,032297 \ln \left(\frac{70,449}{70,449 - 69,9424} \right) = 0,08123.$$

Коэффициент запаса

$$K_3 = \frac{I_Y}{I_{TP}} = \frac{70,449}{69,9424} = 1,007.$$

По расчетам строим тяговую характеристику электромагнита (рис. 4.2).

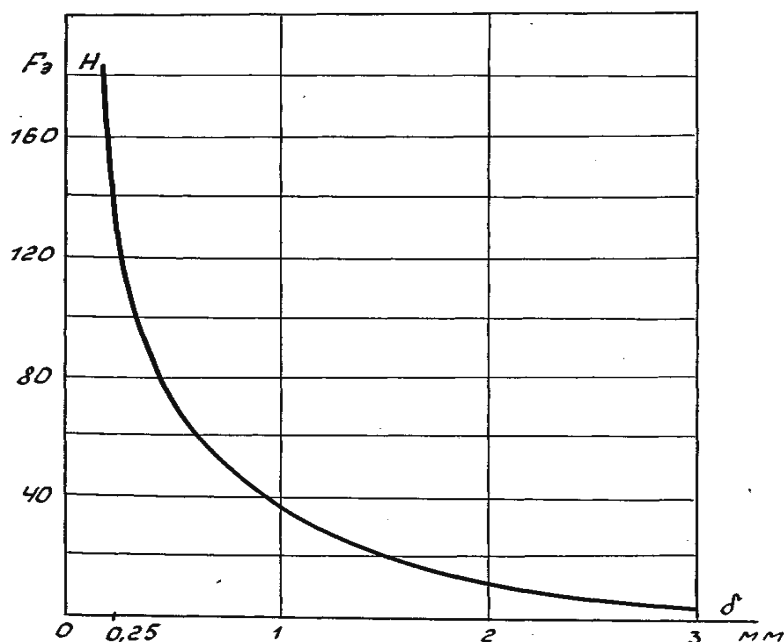


Рис. 4.2. Тяговая характеристика $F_\delta = f(\delta)$

Таблица 4.1

Данные по диаметру и сечению обмоточных проводов ПЭВ-1 и ПЭВ-2

$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	ПЭВ-1		ПЭВ-2	
	$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	K_{3M}	$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	K_{3M}
0,050	0,070	0,28	0,080	0,25
0,063	0,085	0,33	0,090	0,290
0,071	0,095	0,38	0,100	0,340
0,080	0,105	0,43	0,110	0,380
0,090	0,115	0,46	0,120	0,410
0,100	0,125	0,49	0,130	0,440
0,112	0,135	0,51	0,190	0,460
0,125	0,150	0,52	0,155	0,480
0,140	0,165	0,535	0,170	0,495
0,160	0,190	0,55	0,200	0,510
0,180	0,210	0,568	0,220	0,527
0,200	0,230	0,58	0,240	0,538
0,224	0,260	0,594	0,270	0,550

$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	ПЭВ-1		ПЭВ-2	
	$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	K_{3M}	$d_{1n} \cdot 10^{-3}$	K_{3M}
0,25	0,290	0,605	0,300	0,560
0,28	0,320	0,616	0,330	0,572
0,315	0,355	0,627	0,365	0,580
0,355	0,395	0,637	0,415	0,589
0,400	0,440	0,847	0,460	0,597
0,45	0,490	0,656	0,510	0,605
0,500	0,550	0,663	0,570	0,612
0,560	0,610	0,668	0,630	0,618
0,630	0,680	0,674	0,700	0,625
0,71	0,760	0,679	0,790	0,631
0,75	0,910	0,68	0,840	0,634
0,800	0,860	0,682	0,890	0,637
0,850	0,910	0,684	0,940	0,640
0,900	0,960	0,685	0,990	0,693
0,950	1,010	0,686	1,040	0,646
1,000	1,070	0,687	1,100	0,648
1,060	1,130	0,688	1,160	0,650
1,120	1,190	0,689	1,220	0,651
1,180	1,260	0,690	1,280	0,652
1,250	1,330	0,690	1,350	0,652

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение электромагнитов? Какие известны типы электромагнитов?
2. Каково функциональное назначение тягового реле электростартеров?
3. Какие обмотки имеются в составе тягового реле и какова их роль в работе?
4. Объяснить протекание рабочего цикла электромагнита.
5. От каких параметров тягового реле зависит тяговая электромагнитная сила?
6. Какие факторы влияют на тяговые характеристики магнита?
7. Какие характеристики и параметры используются для оценки тяговых реле?
8. Чем определяется форма характеристики противодействующих сил тягового реле электростартера?
9. Как определяется коэффициент возврата?

10. Как оценить соответствие тягового электромагнитного реле условиям работы в приводном механизме электростартера?
11. На каком физическом явлении основан принцип действия электромагнита?
12. Какие материалы применяются при изготовлении тягового реле стартера?
13. Как называют основные элементы конструкции тягового реле стартера?
14. Каковы особенности условий эксплуатации тягового реле стартера?
15. Для чего в тяговом реле стартера применяют две обмотки?
16. В чем различие между втягивающей и удерживающей обмотками тягового реле стартера?
17. Какие условные обозначения применены в пособии? Укажите единицы измерения параметров тягового реле.
18. Каким образом регулируется зазор между контактами тягового реле?
19. Написать и объяснить уравнение энергетического баланса электромагнита.
20. Понятие установившегося теплового режима.
21. Время срабатывания и его составляющие.
22. Муфта свободного хода и ее функциональное назначение.
23. Каково назначение втягивающей и удерживающей обмоток тягового реле и как они включаются в цепь питания электростартера?
24. Понятие начального и конечного воздушного зазора (δ_n и δ_k).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В содержании любого учебного пособия должно просматриваться стремление подчеркнуть обобщения и рекомендации по дальнейшему овладению учебной дисциплиной, которые ориентируют обучающихся на перспективные направления развития рассмотренных проблем, на логику развития дисциплины, на способность понимать и использовать в практической деятельности методологию подходов в выявлении главного.

По мнению авторов, в представленном учебном пособии показана последовательность выполнения задания на курсовую работу от изучения конкретного изделия, его функционального назначения, устройства, принципа действия до анализа результатов расчетов и определения возможности их применения на практике.

По результатам расчетов обучающиеся должны сделать выводы о соответствии полученных параметров для тягового реле стартера реальным параметрам по техническим условиям.

Контрольные вопросы, приведенные в пособии, позволяют конкретизировать объем самостоятельной работы обучающихся и способствуют лучшему овладению учебной дисциплиной.

Для решения предлагаемых в пособии задач, помимо приведенных в нем материалов и технической информации, можно использовать дополнительную литературу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты / Л.А. Родштейн. – М.: Энергоатомиздат, СД-РОМ, 2005.
3. Розанов Ю.К. Электрические и электронные аппараты / Ю.К. Розанов и др. – М.: Информэлектро, 2001.
4. Буль Б.К. и др. Основы теории электрических аппаратов: учеб. пособие для электротехнических специальностей вузов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. школа, 1970. – 600 с.
5. Гольдберг О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах, вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг и др. – М.: Высш. школа, 2001.
6. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов / П.В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971.
7. Чеботков Э.Г., Зубков Ю.В. Электрические и электронные аппараты (Ч. I: Основы теории): конспект лекций. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010.
8. Овсянников В.Н., Чеботков Э.Г. Электрические машины и аппараты: сборник задач. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009.

ПРИЛОЖЕНИЕ

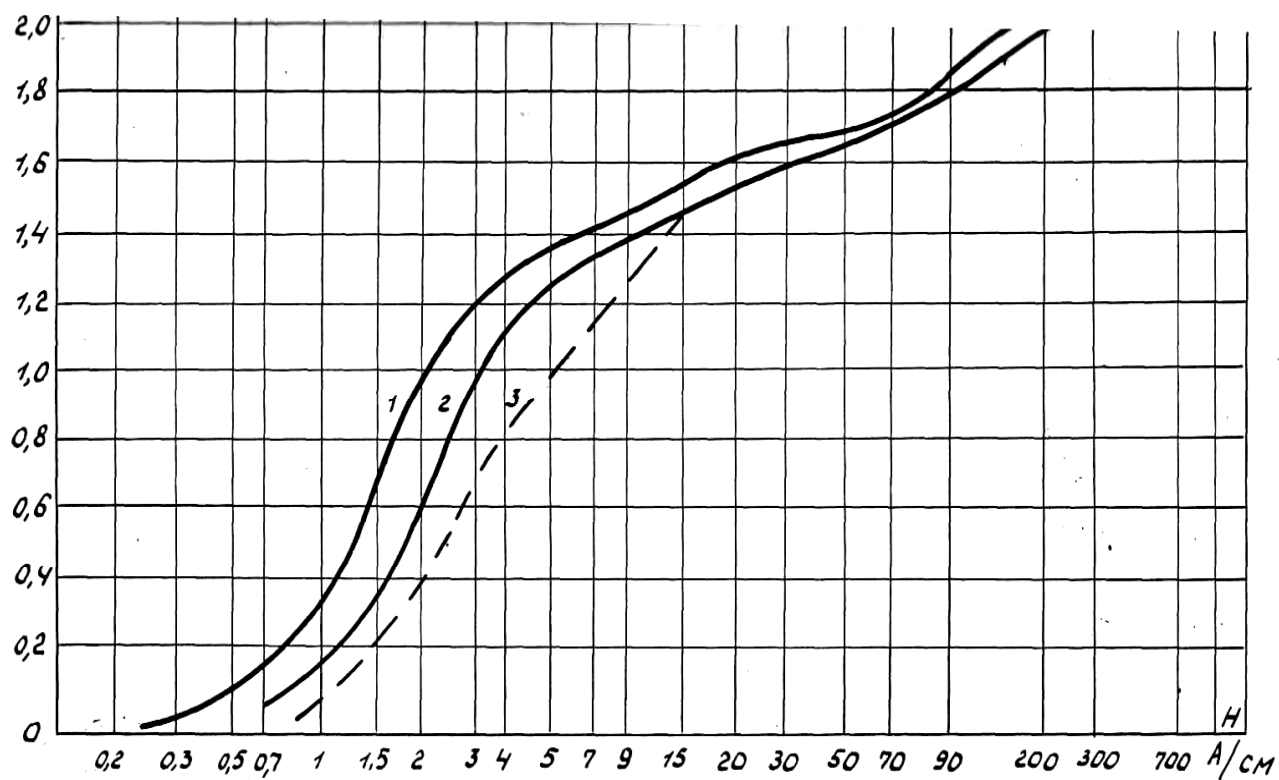


Рис. III. Кривые намагничивания материалов:

- 1 – электротехническая сортовая нелегированная горячекатаная сталь марки 20880 (Э10);
- 2 – сталь качественная конструкционная марки 08 КП отожженная

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
1. Устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики тягового реле автомобильного стартера	5
2. Задание на курсовую работу и ее содержание.....	13
2.1. Проводимости с учетом выпучивания	14
2.1.1. Цилиндрические полюса с коническими поверхностями	14
2.1.2. Цилиндрические полюса с усеченно-коническими поверхностями..	14
2.1.3. Плоские цилиндрические полюса.....	15
2.1.4. Плоские цилиндрические полюса.....	15
2.2. Уравнение проводимостей объемных фигур поля	16
2.3. Удельные проводимости рассеяния	18
3. Последовательность расчета и методические указания к расчету	29
3.1. Определение коэффициентов рассеяния.....	30
3.2. Расчет магнитной цепи по коэффициентам рассеяния.....	31
3.3. Расчет обмотки электромагнита	32
3.4. Определение превышения установившейся температуры обмотки над температурой окружающего воздуха	33
3.5. Расчет тяговой характеристики электромагнита	34
3.6. Определение времени трогания электромагнита.....	35
4. Пример расчета тягового реле стартера.....	37
4.1. Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров	39
4.1.1. Проводимость рабочего воздушного зазора	39
4.1.2. Проводимость паразитных воздушных зазоров.....	41
4.1.3. Коэффициенты рассеяния	41
4.2. Расчет магнитной цепи по коэффициентам рассеяния.....	42
4.2.1. Расчет магнитных потоков.....	42
4.2.2. Расчет индукции и напряженности	42
4.2.3. Падение магнитного потенциала на участках магнитной цепи	44
4.4. Определение превышения установившейся температуры над температурой окружающего воздуха	45
4.5. Расчет тяговой характеристики электромагнита	46
4.6. Определение времени трогания электромагнита.....	47
Контрольные вопросы.....	49
Заключение	50
Список литературы	51
Приложение	52

Учебное издание

*ЦОПОВ Геннадий Иосифович
СЕРГЕЕВ Владимир Александрович
ОВСЯННИКОВ Владимир Николаевич*

**Проектирование и расчет электромагнитного устройства
низкого напряжения**

Редактор *Ю.А. Петропольская*
Верстка *И.О. Миняева*
Выпускающий редактор *Е.В. Абрамова*

Подп. в печать 03.04.13.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п.л. 3,14. Уч.-изд. л. 3,11.
Тираж 50 экз. Рег. № 15/13

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8