

Электрические и электронные аппараты

Лекция № 1

*Общие сведения об электрических
аппаратах.*

*Коммутационные аппараты
электрических цепей.*

*Электродинамические усилия в
электрических аппаратах*

Список рекомендуемой литературы

Основная

1. А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанов. Электрические и электронные аппараты. Том 1: Электромеханические аппараты. : АСADEMIA (Академпресс), 2010. 352 с.
2. И. И. Алиев, М. Б. Абрамов. Электрические аппараты: справочник. М.: РадиоСофт, 2007. 256 с.
3. Г. Н. Ополева. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. 480 с.

Дополнительная

1. А. А. Чунихин. Электрические аппараты. Общий курс. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
2. Л. А. Родштейн. Электрические аппараты. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. 303 с.
3. Ю. К. Розанов. Электрические и электронные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1998. 752 с.
4. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. Минск, 1992.

Общие сведения об электрических аппаратах

Электрический аппарат (ЭА) – 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.

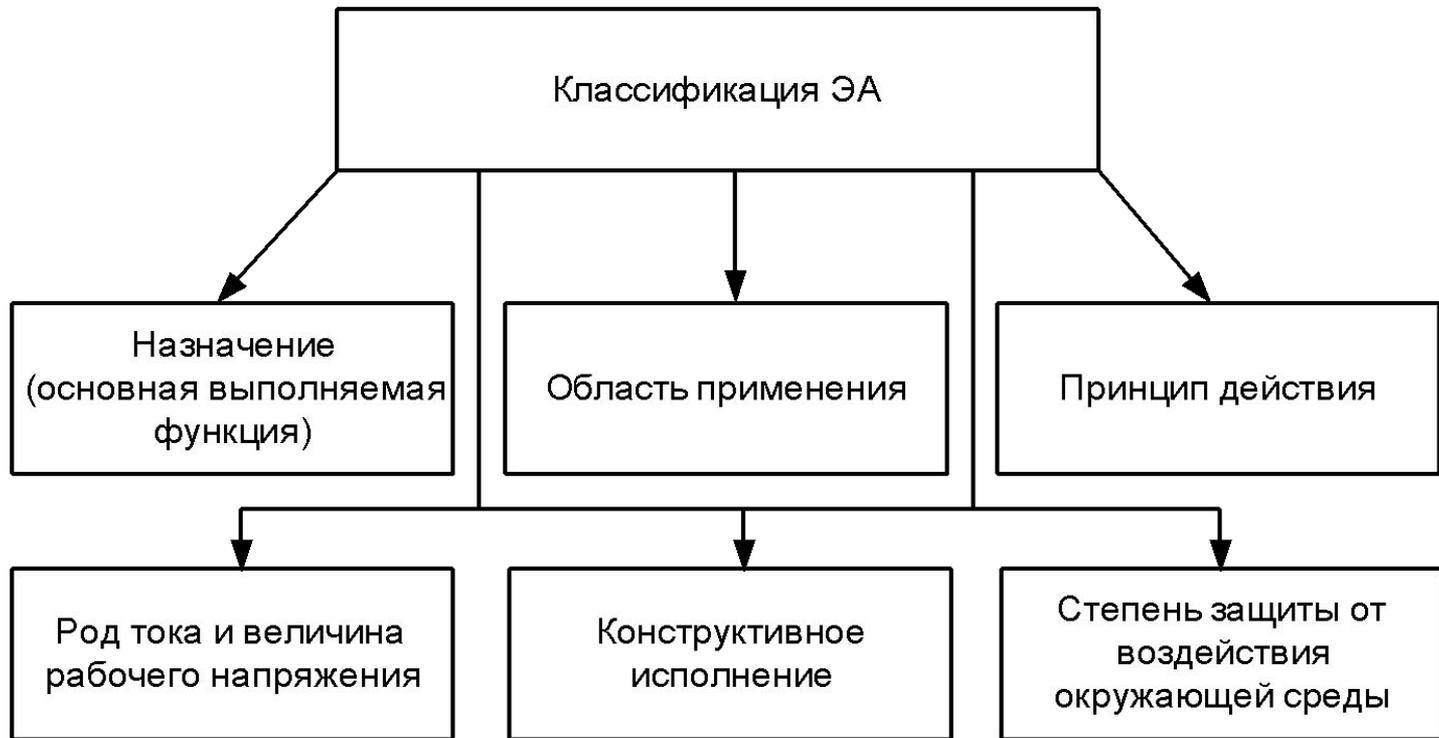


Рисунок 1.1 – Классификация ЭА

Общие сведения об электрических аппаратах

По области применения разделение ЭА условно. Наибольший интерес представляют аппараты, объединенные в группу аппаратов распределительных устройств низкого (до 1000 В) и высокого (свыше 1000 В) напряжения.

По роду тока ЭА делятся на аппараты *постоянного* и *переменного* тока.

Степень защиты определяет защитные свойства оболочки ЭА. По ГОСТ 14254 – 80 защитные свойства обозначаются буквами IP и двумя цифрами (например IP20).

Первая цифра		Вторая цифра	
Уровень	Защита от посторонних предметов, имеющих диаметр	Уровень	Защита от
0	—	0	—
1	>50 мм	1	Вертикальные капли
2	>12,5 мм	2	Вертикальные капли под углом до 15°
3	>2,5 мм	3	Падающие брызги
4	>1 мм	4	Брызги
5	Пылезащищённое	5	Струи
6	Пыленепроницаемое	6	Морские волны
		7	Кратковременное погружение на глубину до 1м
		8	Длительное погружение на глубину более 1м

Общие сведения об электрических аппаратах

Классификация по *назначению* предусматривает разделение ЭА на несколько больших групп в соответствии с рисунком 1.2.

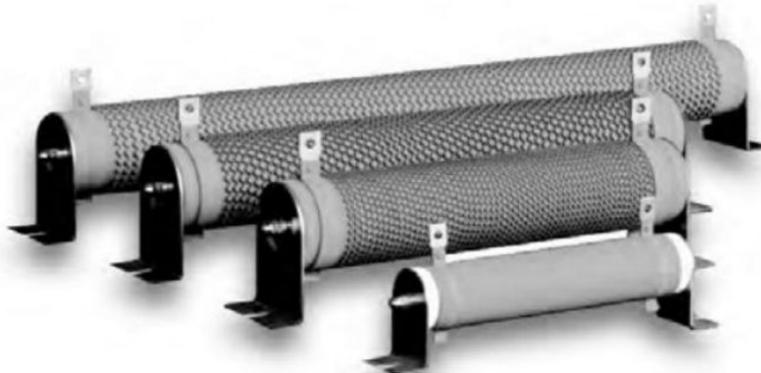


Рисунок 1.2 – Классификация ЭА по назначению

Общие сведения об электрических аппаратах

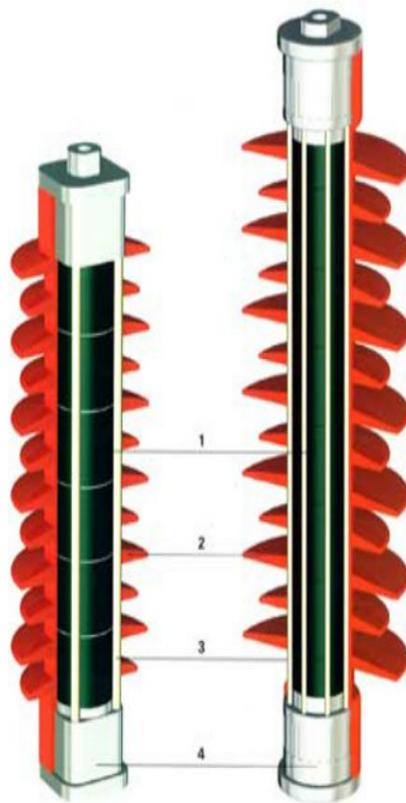
Пускорегулирующие аппараты – аппараты, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин и прочих потребителей электроэнергии (ЭЭ).

Для них характерны частые (до 3600 раз в час и более) включения и отключения. К ним относятся: контроллеры, командконтроллеры, контакторы, пускатели двигателей, резисторы, реостаты.



Общие сведения об электрических аппаратах

Ограничивающие аппараты предназначены для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники и ОПН).



<http://tsiklon-systems.ruprom.net/>

Общие сведения об электрических аппаратах

Аппараты контроля контролируют электрические и неэлектрические величины. К ним относятся датчики и реле.



Общие сведения об электрических аппаратах

Электрические регуляторы предназначены для регулирования заданного параметра (частоты, напряжения, тока, температуры и т.п.) по определенному закону.

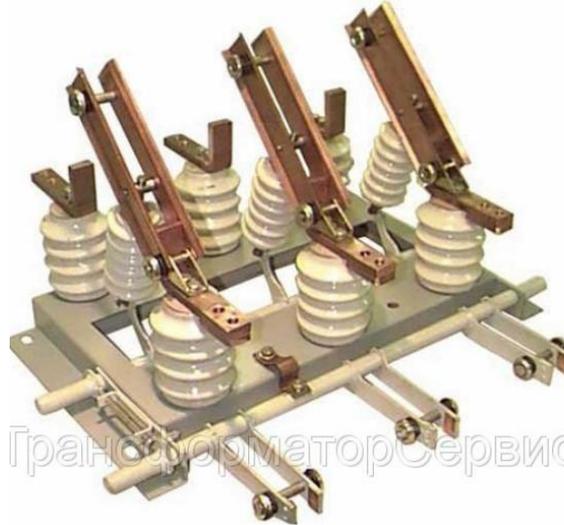
Аппараты измерения позволяют изолировать измерительные и защитные цепи от цепей первичной коммутации (или главного тока). К ним относятся трансформаторы тока, напряжения и емкостные делители напряжения.



Коммутационные аппараты электрических цепей

Коммутационные аппараты (КА) служат для включения и отключения электрических цепей. К ним можно отнести:

- рубильники;
- пакетные выключатели;
- предохранители;
- выключатели нагрузки;
- автоматические выключатели;
- высоковольтные выключатели;
- разъединители, отделители и короткозамкватели.



Коммутационные аппараты электрических цепей

Для аппаратов этой группы характерно относительно редкое их включение и отключение.

Условно все КА можно разделить на две основных группы:

- аппараты, предназначенные коммутировать обесточенные цепи, к которым относятся разъединители и отделители;
- аппараты, коммутирующие электрические цепи под нагрузкой. К ним относятся все остальные виды КА.

С точки зрения теории КА можно выделить два основных режима их работы:

- нормальный рабочий режим, в котором электроустановка может работать бесконечно длительное время при номинальных токах и напряжениях;
- аварийный режим – режим, в котором напряжения и токи существенно отличаются от номинальных и препятствуют нормальному и эффективному функционированию установки.

Коммутационные аппараты электрических цепей



Рисунок 1.3 – Назначение коммутационных аппаратов

Коммутационные аппараты электрических цепей

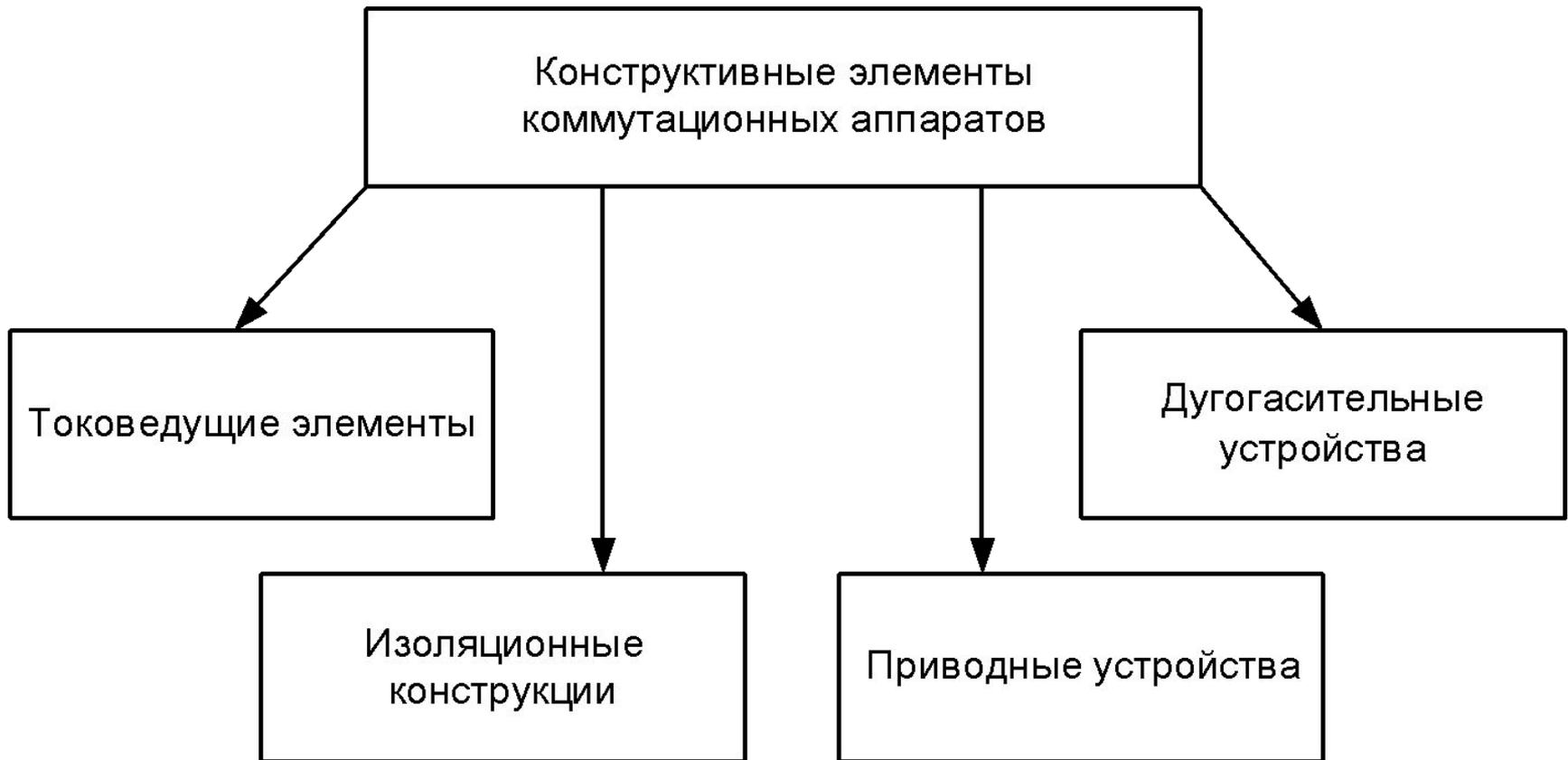


Рисунок 1.4 – Элементы коммутационных аппаратов

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

В аварийных режимах по элементам токоведущей системы коммутационного аппарата (ТВС КА) протекают большие токи, которые вызывают значительные механические усилия между элементами ТВС полюсов КА.

Эти усилия получили название *электродинамических* (ЭДУ).

Расчет электродинамических усилий в частях аппарата сводится к определению значений механических характеристик, которые оказывают наибольшее влияние на режим работы ТВС КА.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

К основным механическим характеристикам относятся:

- *усилие* F , возникающее в рассматриваемом элементе ТВС с током под действием смежных элементов. Это усилие называют *силой Ампера* и измеряют в *ньютонах* [Н];
- *момент* M [Н·м], который показывает момент внешних сил, прикладываемых к проводнику относительно какой-либо расчетной точки ТВС;
- *напряжение* σ в материале ТВС [Па] (или [Н/м²]), которое характеризует усилие, приходящееся на единицу площади сечения элемента;
- *момент сопротивления* W элемента ТВС [м³], показывающий отношение момента инерции J относительно оси к расстоянию от нее до наиболее удаленной точки сечения.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

При протекании электрического тока по проводнику вокруг последнего формируется магнитное поле, характеризующееся *магнитной индукцией* B [Гн], вектор которой направлен по касательной к *силовым линиям поля*.

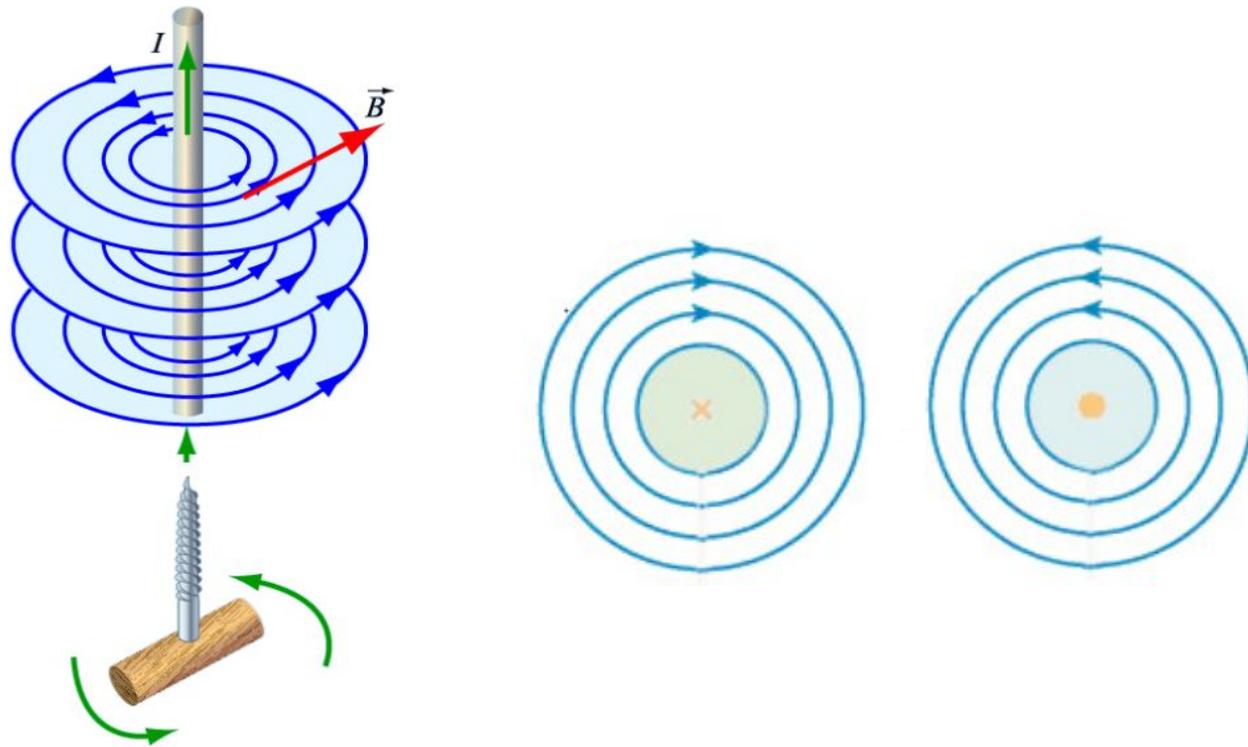


Рисунок 1.5 – Определение направления магнитной индукции по правилу буравчика

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Это поле, взаимодействуя с другим проводником с током, попадающим в него, вызывает в нём усилие механического рода, которое называется *силой Ампера* F .

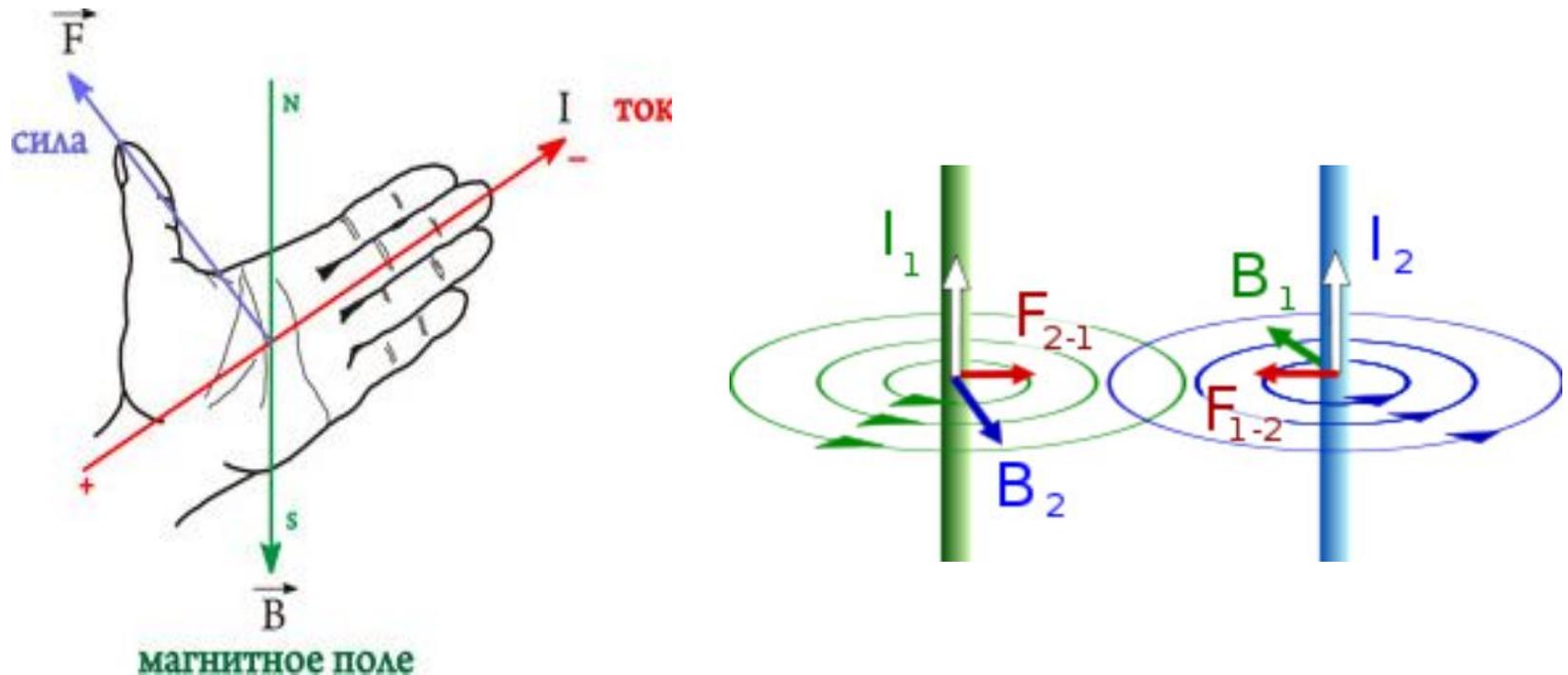


Рисунок 1.6 – Определение направления действия силы Ампера

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Значение силы взаимодействия между двумя параллельными проводниками, один из которых имеет конечную длину l [м], расположенными на расстоянии a [м] друг от друга определяется по выражению, Н:

$$F = 10^{-7} k_{\phi} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \quad (1.1)$$

где i_1, i_2 – мгновенные значения токов в проводниках, А;

k_{ϕ} – коэффициент формы, определяемый формой сечения проводников.

Сечения элементов ТВС могут быть различной формы, поэтому при расчетах ЭДУ реальные конфигурации ТВС КА заменяются линейными, а влияние формы учитывают *коэффициентом формы* k_{ϕ} .

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

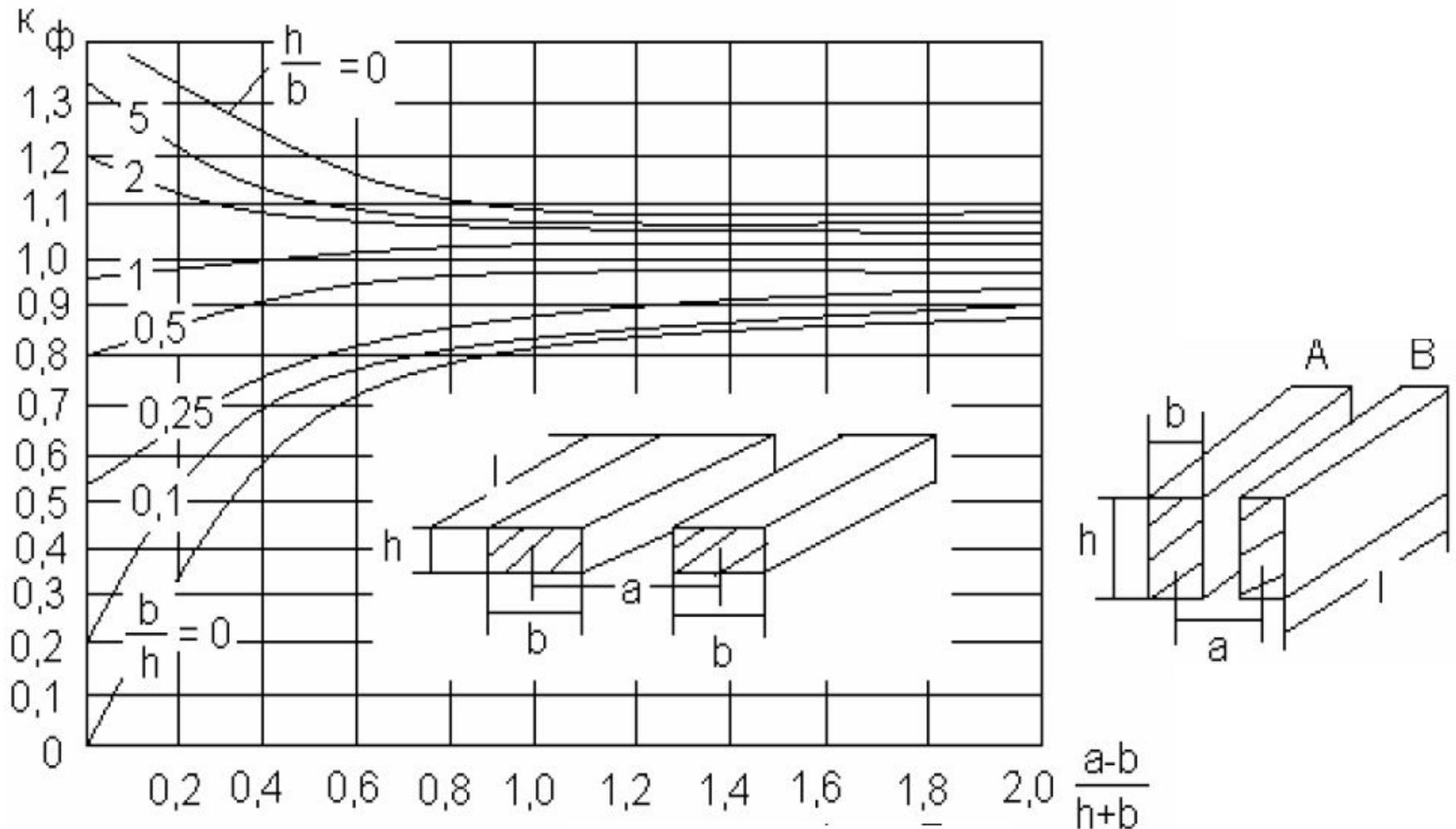


Рисунок 1.7 – Кривые Двайта для определения k_ϕ проводников прямоугольного сечения

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Как правило, части ТВС располагаются в пространстве произвольно, что требует сложного математического анализа ЭДУ.

Для учета взаимного пространственного расположения элементов ТВС, а также их геометрических размеров, при типовых ситуациях в выражение (1.1) вводится *коэффициент контура* k_{12} .

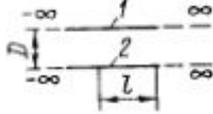
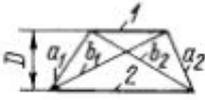
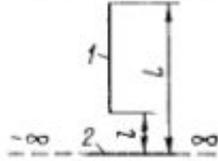
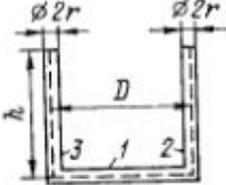
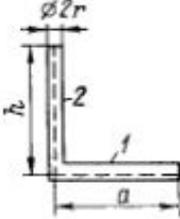
В общем случае для определения ЭДУ в элементах ТВС КА можно воспользоваться следующим выражением:

$$F = 10^{-7} k_{12} k_{\phi} i_1 i_2 \quad (1.2)$$

Коэффициент контура можно определить по известным выражениям, приведенным в таблице 1.1.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Таблица 1.1 – Выражения для определения k

Расположение проводников	Расчетная формула коэффициента контура
	$k_{1-2} = 2l/D$
	$k_{1-2} = \frac{(b_1 + b_2) - (a_1 + a_2)}{D}$
	$k_{1-2} = 2 \ln \frac{L}{h}$
	$k_1 = k_{1-2} + k_{1-3} = 2 \left(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$ <p>где $b = \frac{D}{r}$; $c = \frac{D}{h}$</p>
	$k_{1-2} = \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + a^2}} + 0,25,$ <p>где $b = \frac{a}{r}$; $c = \frac{a}{h}$</p>

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

При изготовлении ТВС КА приходится соединять между собой элементы с различным сечением. В этом случае линии тока искривляются, искривляя при этом и форму магнитного поля (см. рисунок 1.8)

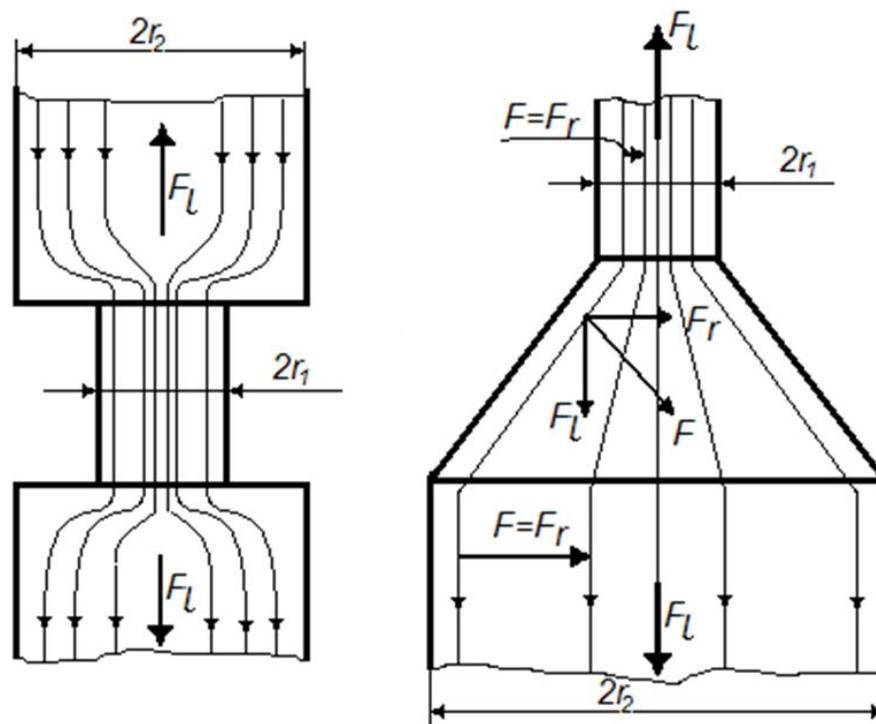


Рисунок 1.8 – ЭДУ в месте изменения сечения

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

В результирующем ЭДУ появляются продольные составляющие, стремящиеся разорвать место перехода вдоль оси проводника и всегда направленные в сторону большего сечения. Эти продольные ЭДУ можно определить по формуле:

$$F = I^2 \ln \frac{S_2}{S_1} \cdot 10^{-7} \quad (1.3)$$

где S_1, S_2 – соответственно площадь меньшего и большего сечения;
 I – ток, проходящий через сечение, А.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

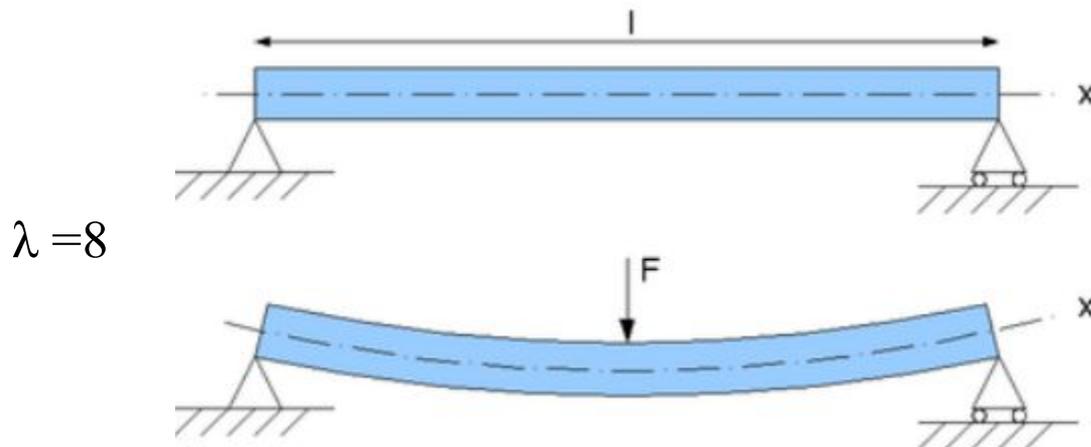
После расчета ЭДУ определяется изгибающий момент M , действующий на рассматриваемый элемент ТВС, в соответствии с выражением, Н·м:

$$M = \frac{F_{\text{рез}} l}{\lambda} \quad (1.4)$$

где $F_{\text{рез}}$ – результирующая сила, приложенная к данному элементу, Н;

l – плечо силы, м;

λ – коэффициент, учитывающий степень свободы элемента ТВС.



Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Момент вызывает в элементах ТВС механическое напряжение, определяемое выражением, Па (или Н/м²):

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W} \quad (1.5)$$

где W – момент сопротивления, Н/м³, зависящий от формы сечения проводника и определяемый в соответствии с таблицей 1.2.

В соответствии с (1.5), при конструировании КА необходимо располагать сечения ТВС таким образом, чтобы W было наибольшим.

Наиболее оптимальными являются элементы ТВС с коробчатой формой сечения, т. к. имеют более высокую электродинамическую стойкость (ЭДС) по сравнению с сечениями прямоугольной и круглой формами.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Таблица 1.2 – Выражения для определения момента сопротивления сечения

Сечения шин	Расчетные формулы	
	$J, \text{ м}^4$	$W, \text{ м}^3$
1	2	3
	$J_y = \frac{bh^3}{12}$	$W_y = \frac{bh^2}{6}$
	$J_y = \frac{hb^3}{12}$	$W_y = \frac{hb^2}{6}$
	$J_y = \frac{bh^3}{6}$	$W_y = \frac{bh^2}{3}$
	$J_y = \frac{hb^3}{6}$	$W_y = \frac{hb^2}{3}$
	$\frac{H^4 - h^4}{12}$	$\frac{H^3 - h^3}{6H}$

1	2	3
	$\frac{\pi D^4}{64}$	$\frac{\pi D^3}{32}$
	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$
	$\frac{H^4}{12}$	$\frac{H^3}{6}$
	<p style="text-align: center;">Для одного элемента</p> $W_y = \frac{6h^3 - [(b - \Delta)(h - 2\Delta)]^2}{bh}$ $W_x = \frac{he^3 - (h - 2\Delta)(e - \Delta)^3 + 2\Delta(b - e)^3}{3(b - e)}$	

* Если прокладки приварены к обеим полосам пакета, момент инерции и момент сопротивления принимают форму:

$$J_y = \frac{hb}{6}(3a_n^2 + b^2) \quad W_y = \frac{hb(3a_n + b)}{3(a_n + b)}$$

После определения σ его сравнивают с допустимым.