

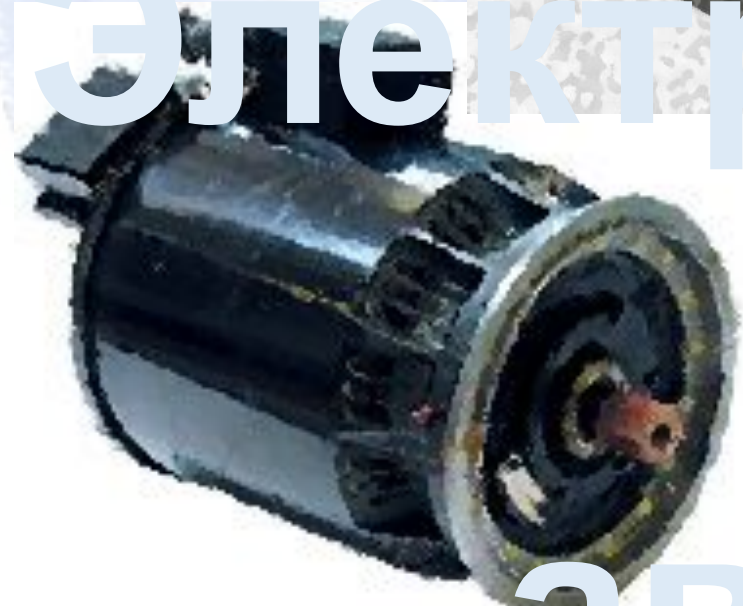
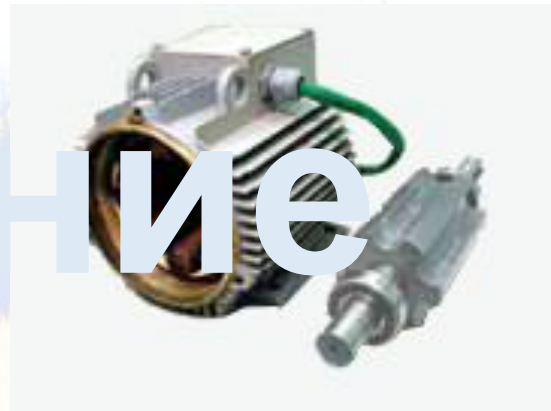
Проектирование

систем

электрооборудован

ия

автономных



- МЭИ 2012г.
2. Сугробов А.М. Проектирование электромашиных преобразователей для систем электрооборудования автономных объектов М.: Издательский дом МЭИ 2005г.
 3. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока М.: Издательство «высшая школа» 1982.
 4. С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М, Сугробов, П.А. Тыричев Магнитные материалы, обмоточные, монтажные и бортовые провода, для систем электрооборудования летательных аппаратов.
 5. И.П. Копылов Проектирование электрических машин М.: Энергия 1980г.
 6. В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец Электрические машины. М.: Академия 2006г.
 7. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс Фейнмановские лекции по физике М.: Издательство «МИР» 1965г.

Литература

объектов

1. Основные законы физики, используемые при проектировании электрооборудования;
2. Принцип и особенности работы различных ЭМП;
3. Общие требования к электрооборудованию автономных объектов. Пути их выполнения;
4. Магнитные системы ЭМП автономных объектов;
5. **Проектный расчёт;**
6. **Поверочный расчёт.**

Содержание курса

Проектный расчёт

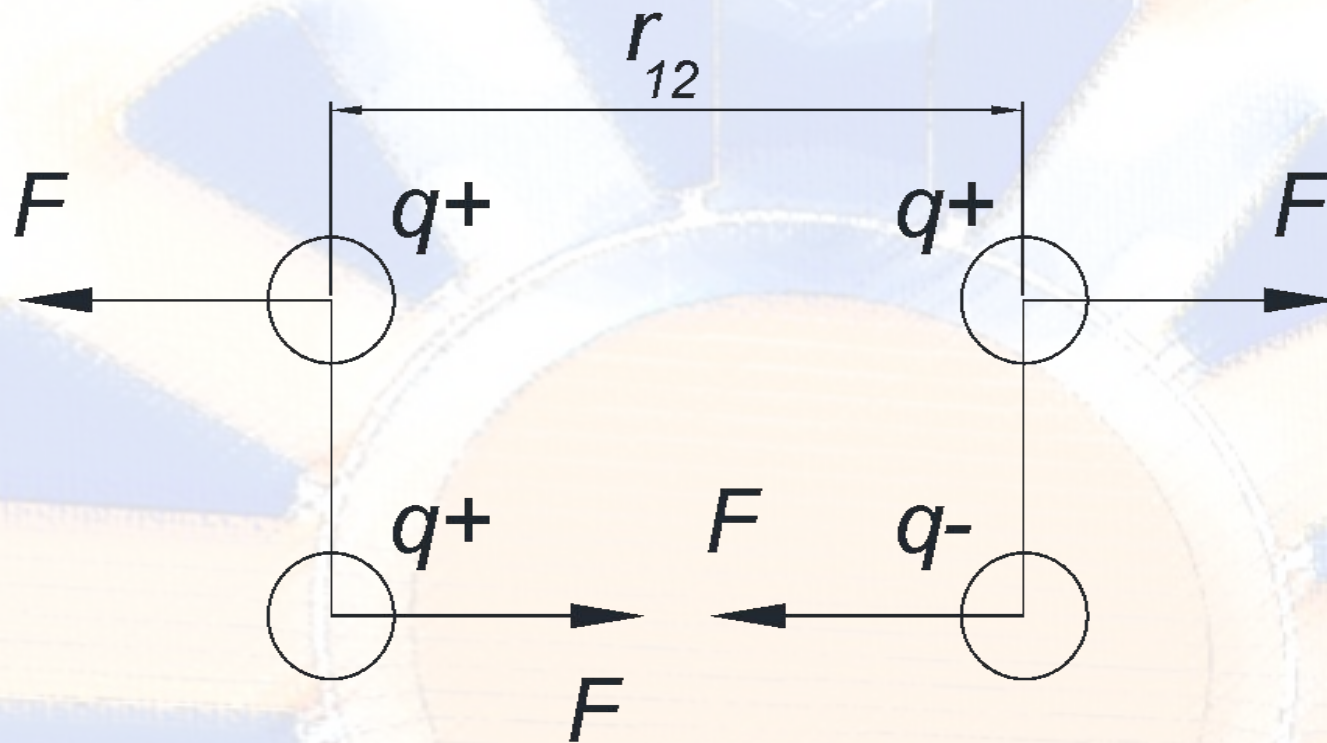
1. Геометрия электромашинных преобразователей энергии.
Магнитное поле в них.
2. Определение главных размеров электромашинных преобразователей.
3. Определение размеров магнитной цепи преобразователей.
4. Расчёт обмотки якоря.
5. Материалы для изготовления активных частей преобразователей.

Содержание курса

Поверочный расчёт

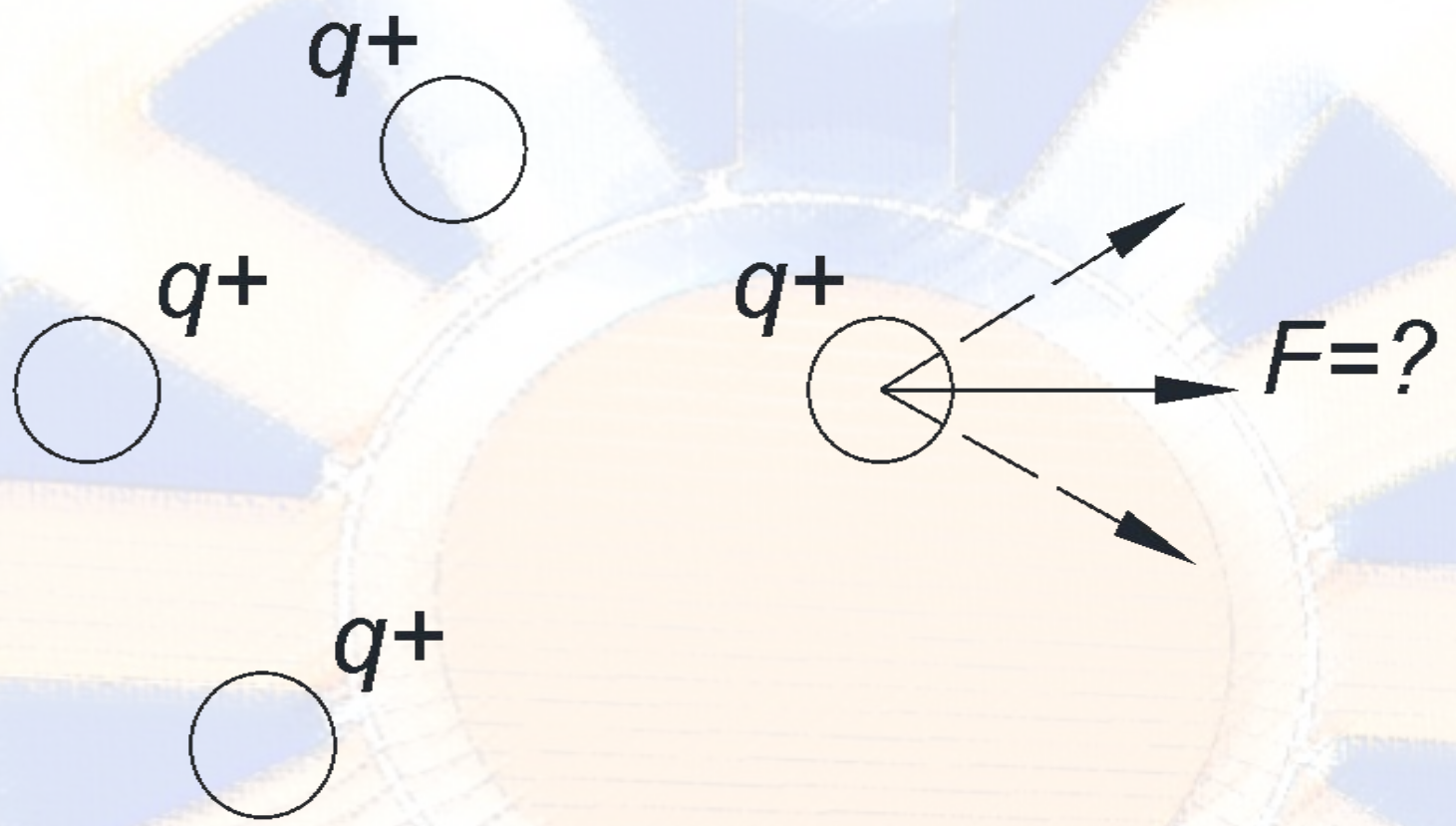
1. Схемы замещения магнитной цепи.
2. Построение характеристик спроектированного преобразователя.

Содержание курса



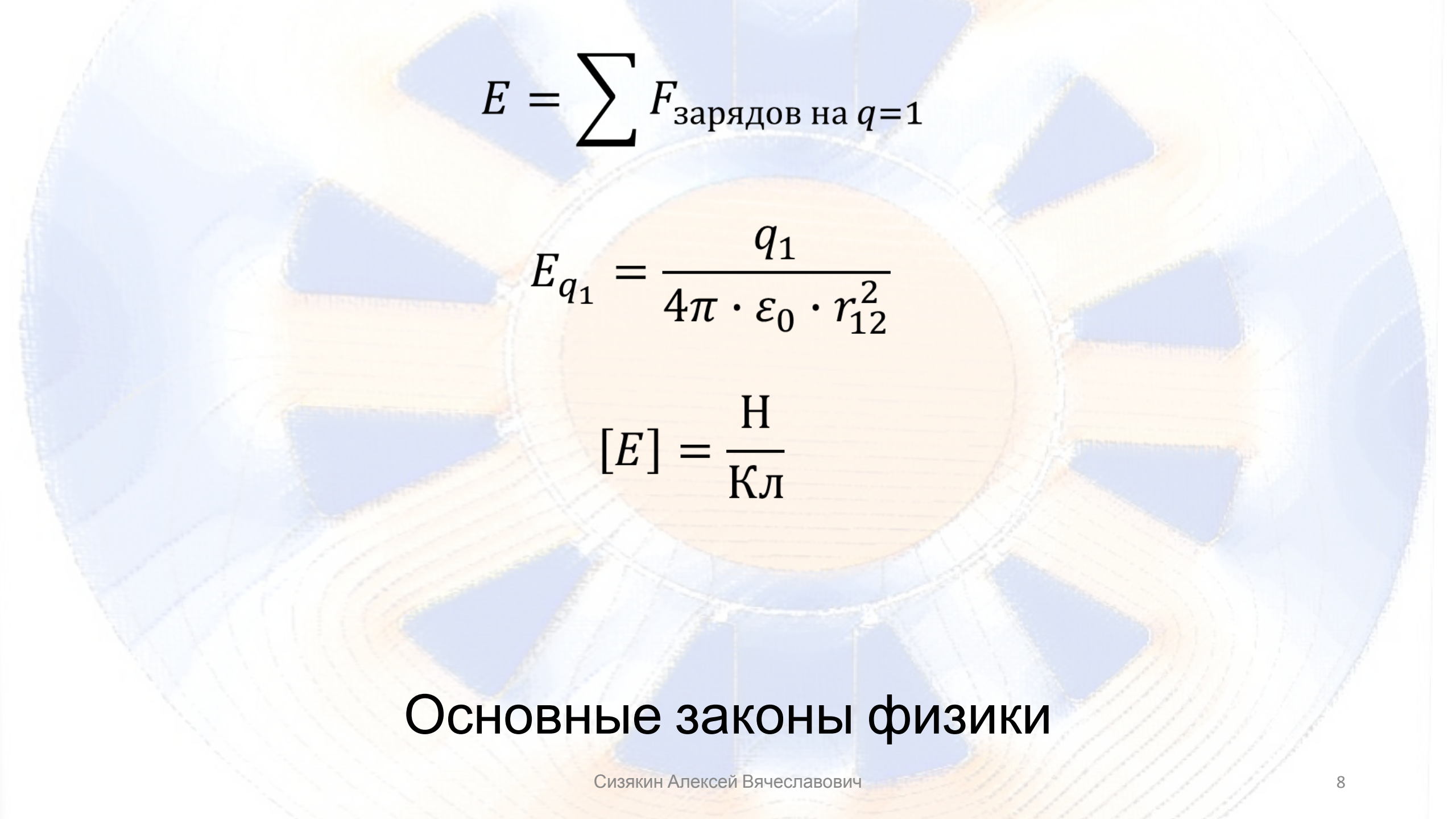
$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{12}^2}$$

Основные законы физики



$$F = \sum F_{\text{зарядов}}$$

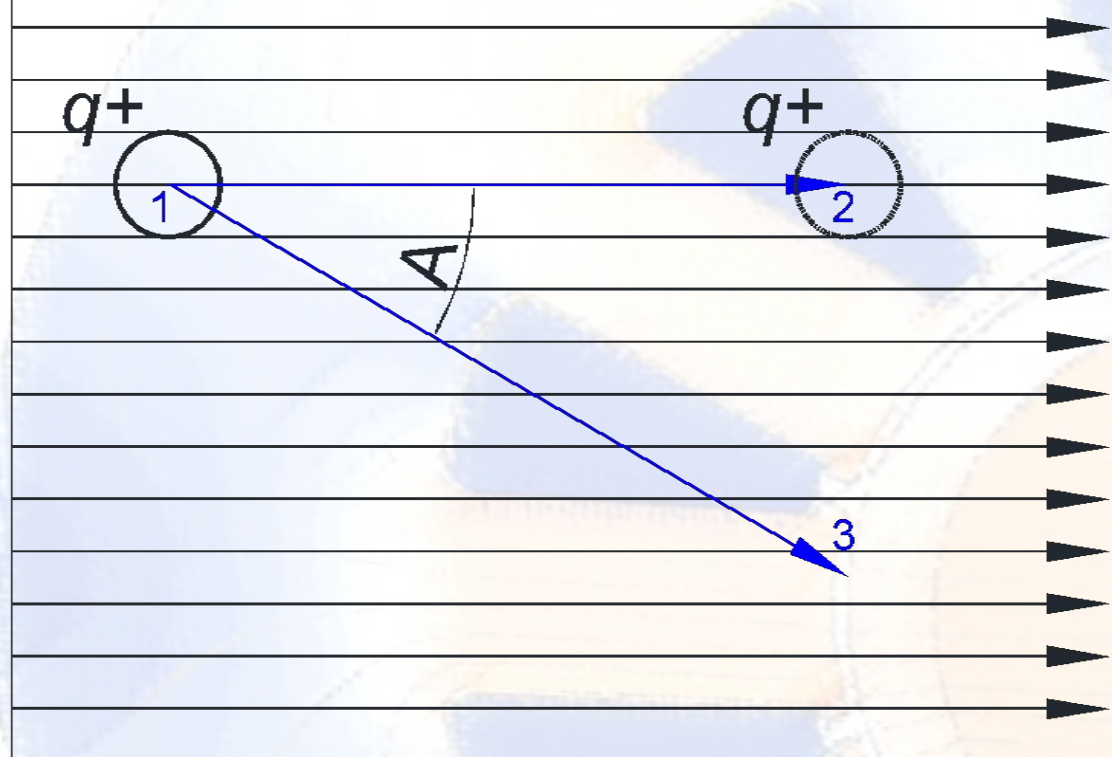
Основные законы физики


$$E = \sum F_{\text{зарядов на } q=1}$$

$$E_{q_1} = \frac{q_1}{4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_{12}^2}$$

$$[E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

Основные законы физики



$$A_{\text{поля}12} = F \cdot S = F \cdot r_{12}$$

$$A_{\text{поля}13} = F \cdot \cos A \cdot S = F \cdot \cos A \cdot r_{13}$$

$$r_{12} = r_{13} \cdot \cos A$$

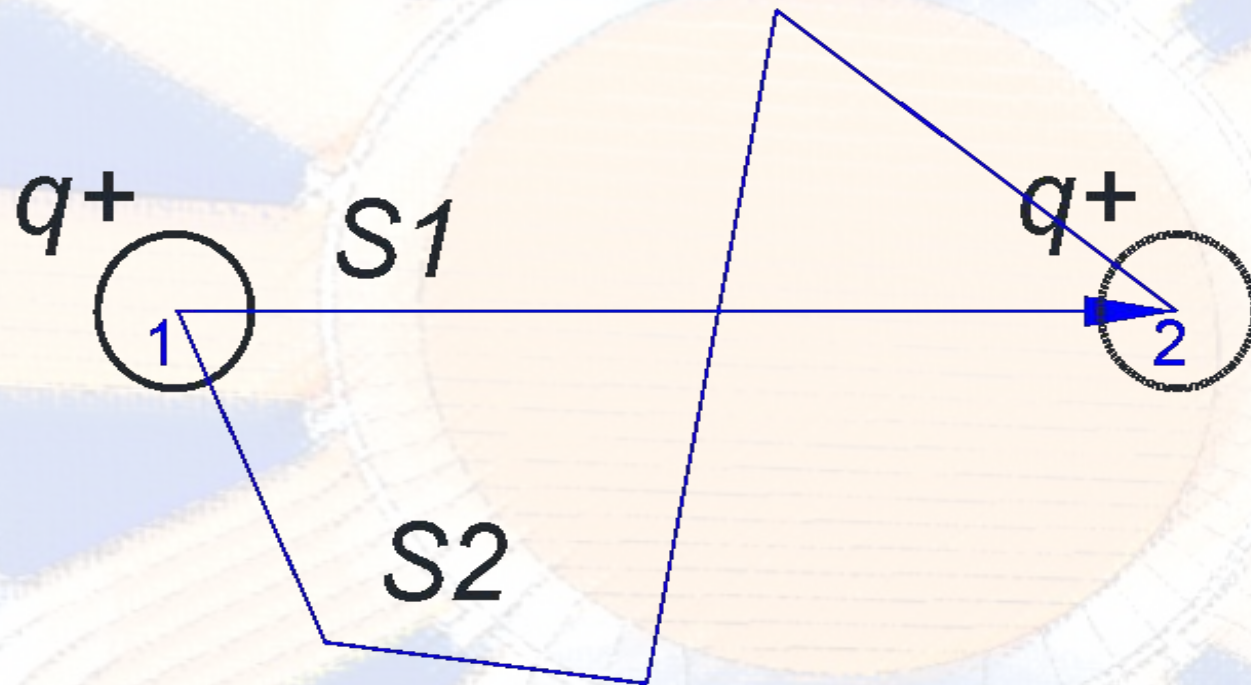
$$r_{13} = \frac{r_{12}}{\cos A}$$

$$A_{\text{поля}13} = F \cdot \cos A \cdot \frac{r_{12}}{\cos A} = F \cdot r_{12} = A_{\text{поля}12}$$

Работа по переносу единичного заряда в поле из одной точки в другую есть разность потенциалов между этими точками

Основные законы физики

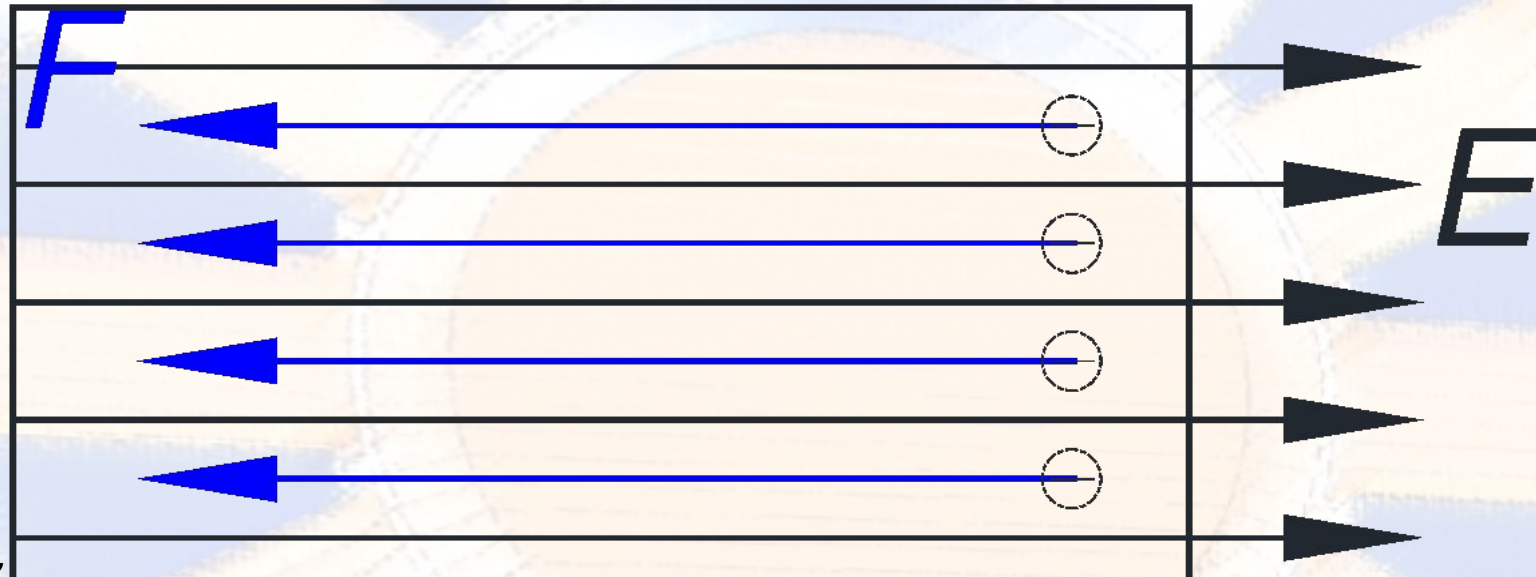
Разность потенциалов между точками не зависит от траектории, по которой между ними перемещается заряд.



$$A_{\text{поля}12} = A_{\text{поля}S1} = A_{\text{поля}S2}$$

Основные законы физики

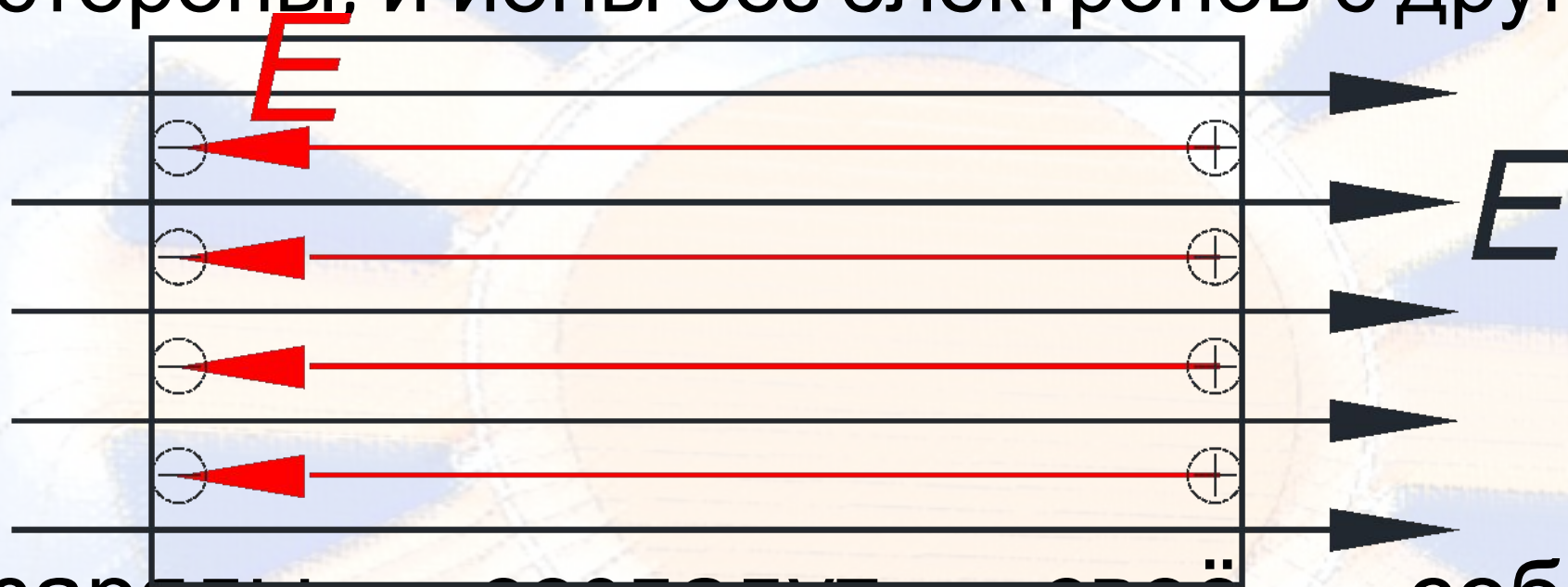
В металлах множество электронов на внешних орбитах атомов могут перемещаться по объёму металла.



Под воздействием внешнего поля электроны начнут перемещаться и будут двигаться до тех пор, пока их расположение не сформирует электрическое поле, полностью компенсирующее внешнее.

Основные законы физики

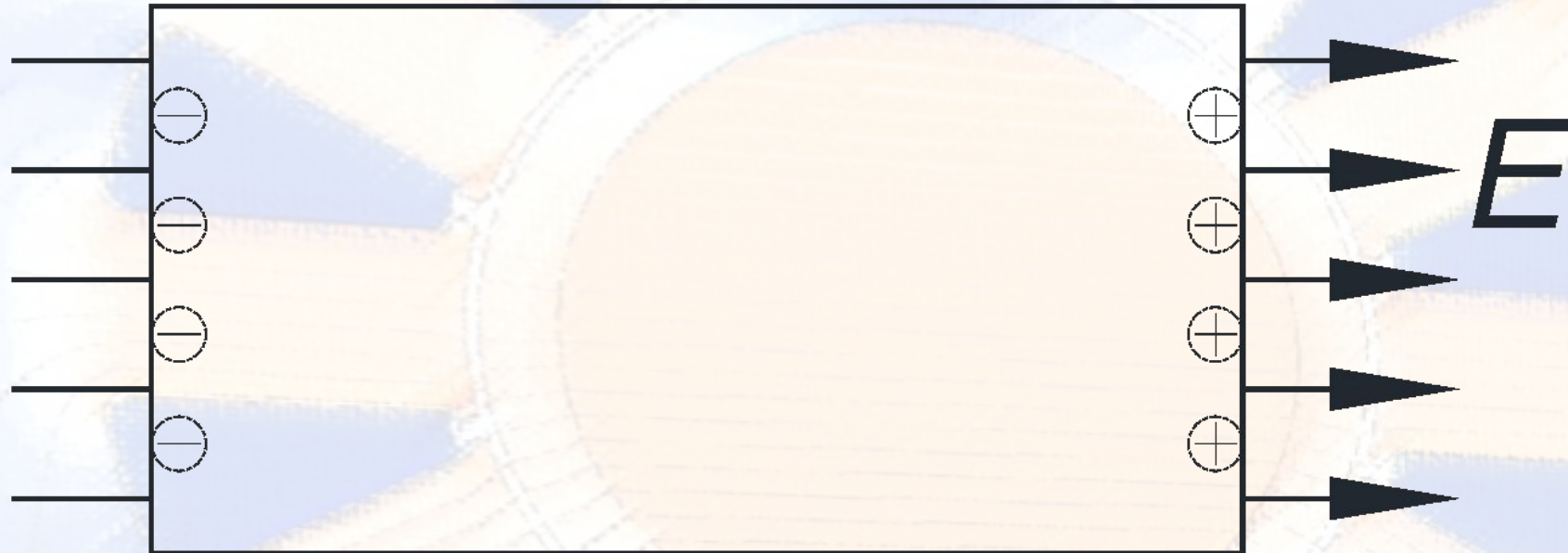
Тогда в металле образуются группы зарядов, электроны с одной стороны, и ионы без электронов с другой.



Эти заряды создадут своё собственное электрическое поле, которое будет направлено против внешнего поля.

Основные законы физики

Электроны будут перемещаться до тех пор, пока внутреннее поле полностью не скомпенсирует внешнее.



Ведь только в этом случае на электроны внутри проводника перестанет действовать сила и перемещение прекратится.

Основные законы физики

Если какая-то внешняя сила перенесёт электрон в другую часть проводника,



то на этот электрон вновь будет действовать сила, т. к. равенство внешнего и внутреннего полей нарушится.

Основные законы физики

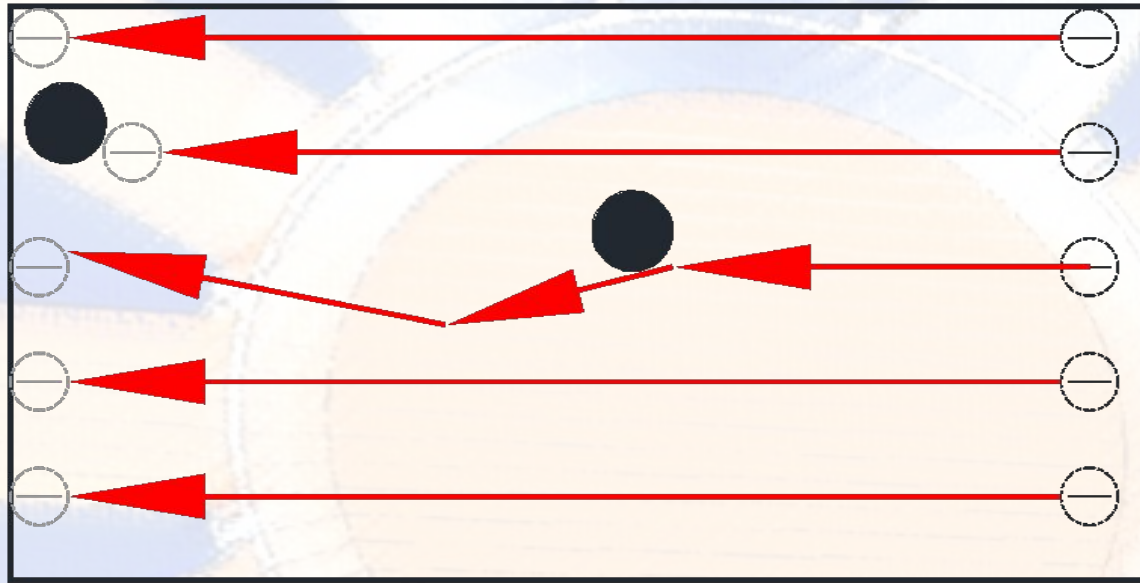
Если этот процесс повторять многократно, то в проводнике возникнет электрический ток.



Если проводник идеальный, то работа по переносу электрона равна нулю.

Основные законы физики

Но! Электроны на своём пути по проводнику встречают препятствия – атомы, инородные примеси, пустоты и т.д.



Не всем электронам удаётся дойти до противоположного края проводника, за то время, пока внешняя сила их перенесёт обратно. Это приводит к тому, что электрическое поле внутри проводника не равно нулю, если есть их движение.

Основные законы физики

А это означает, что работа внешней силы по переносу каждого конкретного единичного заряда также не равна нулю, а равна разности потенциалов между краями проводника.

Эта работа называется напряжением, а характеристика материала, отвечающая за количество препятствий для электронов называется сопротивлением.

Таким образом, чем меньше препятствий в проводнике, тем меньше работы надо совершать для того, чтобы обеспечить непрерывный поток электронов в этом проводнике. Т.е. меньше напряжение должно быть приложено к нему.

Основные законы физики

И чем больше работы мы совершим по переносу зарядов, при одном и том же сопротивлении, тем больше будет поток электронов по проводнику.

Мы получили закон Ома:

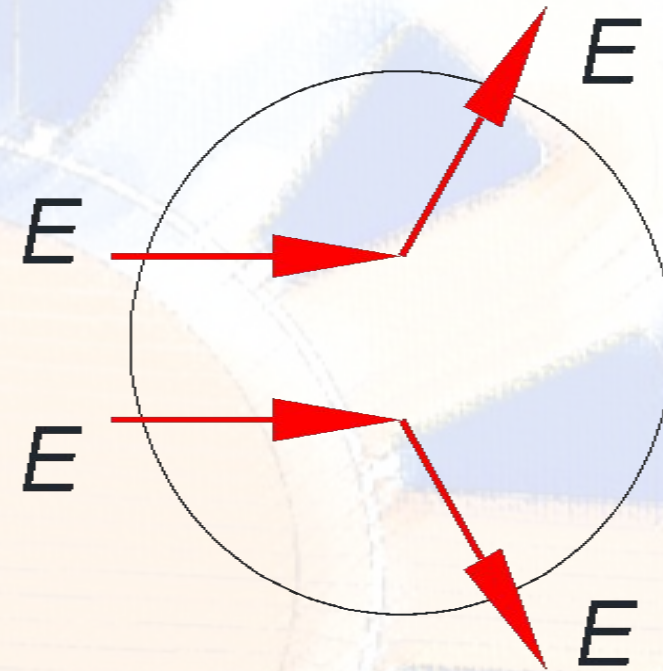
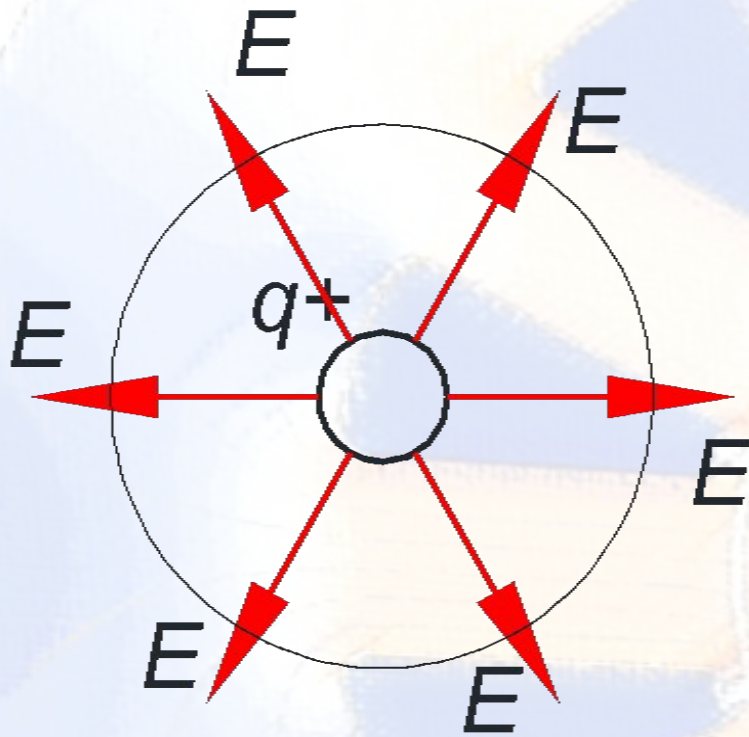
$$I = \frac{U}{R}$$

Основные законы физики

Электрический ток через какую-либо поверхность показывает какое количество заряда протекает через эту поверхность в единицу времени.

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Основные законы физики



$$\operatorname{div} E = \frac{q_{\text{охв}}}{\epsilon_0}$$

Основные законы физики

Если заряд движется, то на него может действовать ещё одна сила - магнитная.

$$F_{\text{маг}} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Тогда полная сила запишется в виде:

$$F_{\text{рез}} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

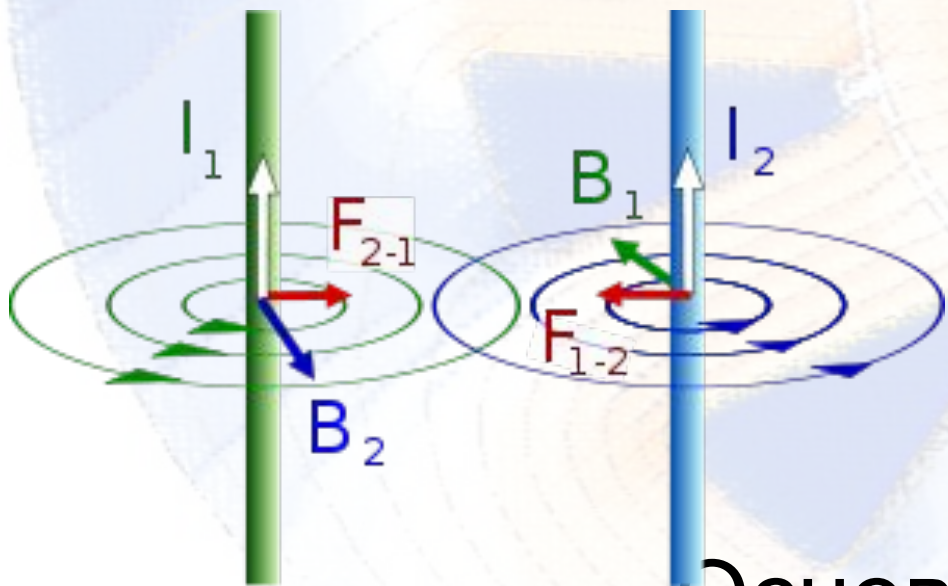
Это выражение для силы Лоренца

Основные законы физики

B- магнитное поле, характеризующее силу, действующую на движущуюся заряженную частицу.

Поле **B** создаётся движущимися зарядами.

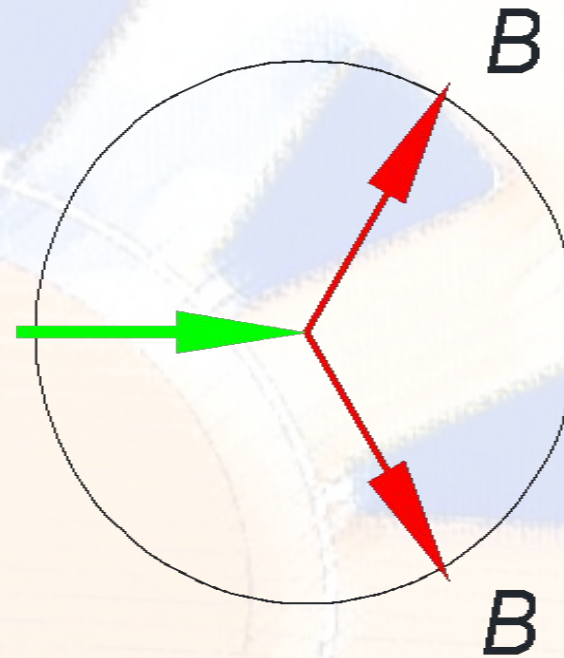
Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.



$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Основные законы физики

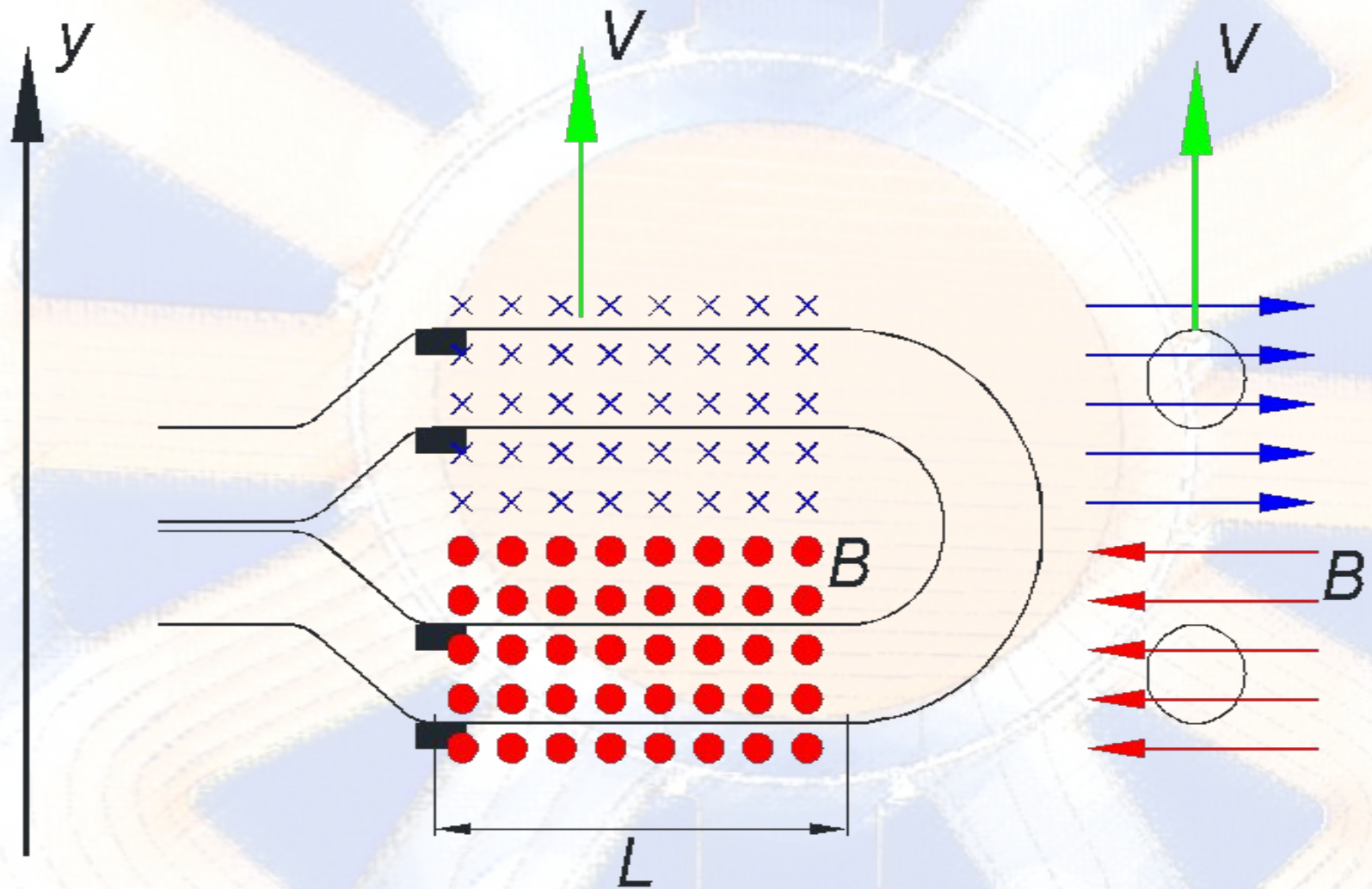
$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$



Магнитных зарядов не существует.

Основные законы физики

Рассмотрим проводник, движущийся в магнитном поле:

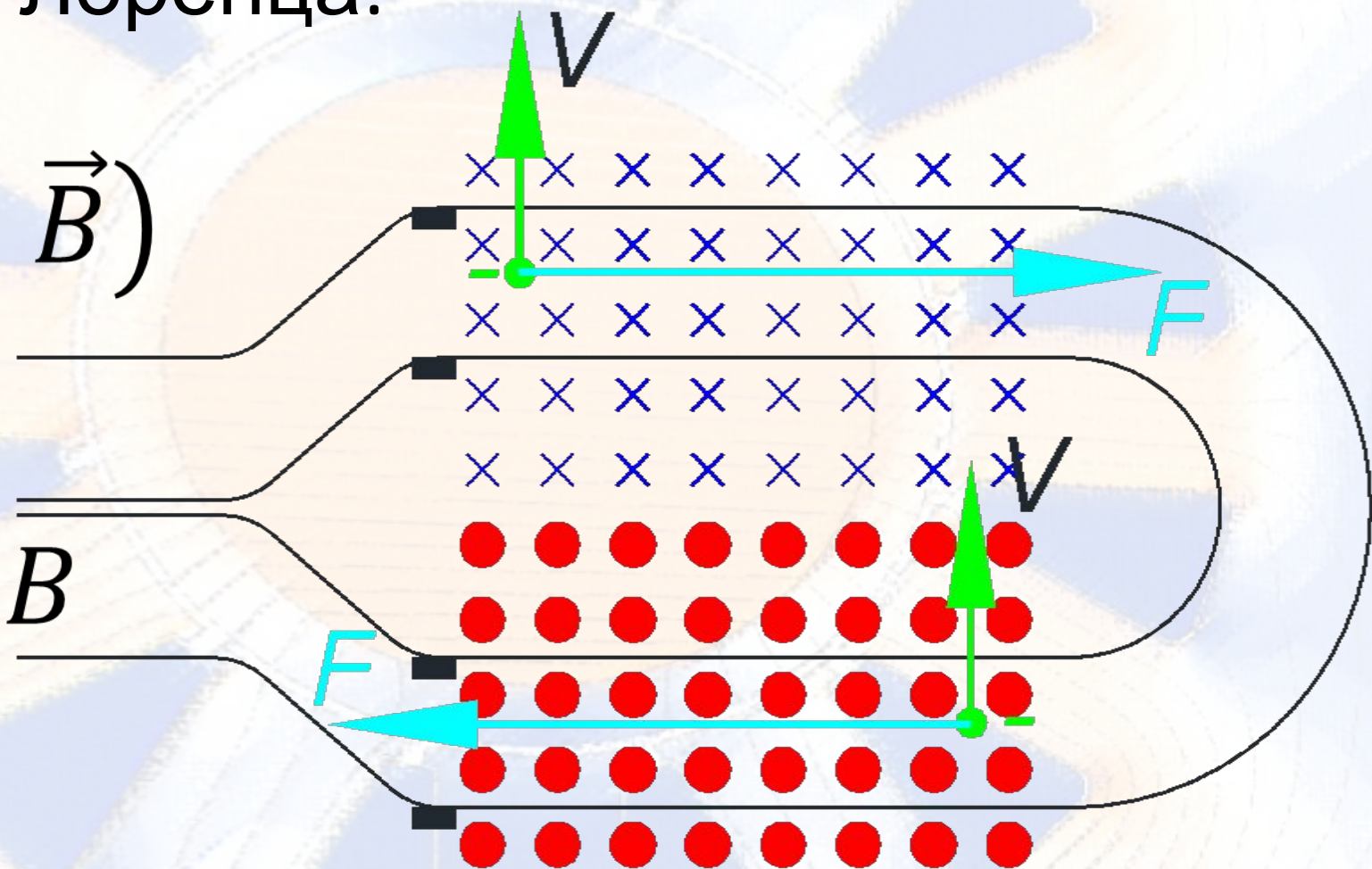


Основные законы физики

На электроны, движущиеся вместе с проводником будет действовать сила Лоренца:

$$F = q_{\text{эл}} \cdot (\vec{V} \times \vec{B})$$

$$|F| = q_{\text{эл}} \cdot V \cdot B$$



Основные законы физики

Для перемещения электрона от одного края поля до другого сила совершит работу:

$$A = q_{\text{эл}} \cdot V \cdot B \cdot L$$

А для перемещения единичного заряда:

$$A = 1 \text{ Кл} \cdot V \cdot B \cdot L$$

Работа поля это ЭДС

$$e_{\text{пр}} = V \cdot B \cdot L$$

Тогда ЭДС, наводимая в витке:

$$e_{\text{витка}} = 2 \cdot e_{\text{пр}} = 2 \cdot V \cdot B \cdot L$$

Основные законы физики

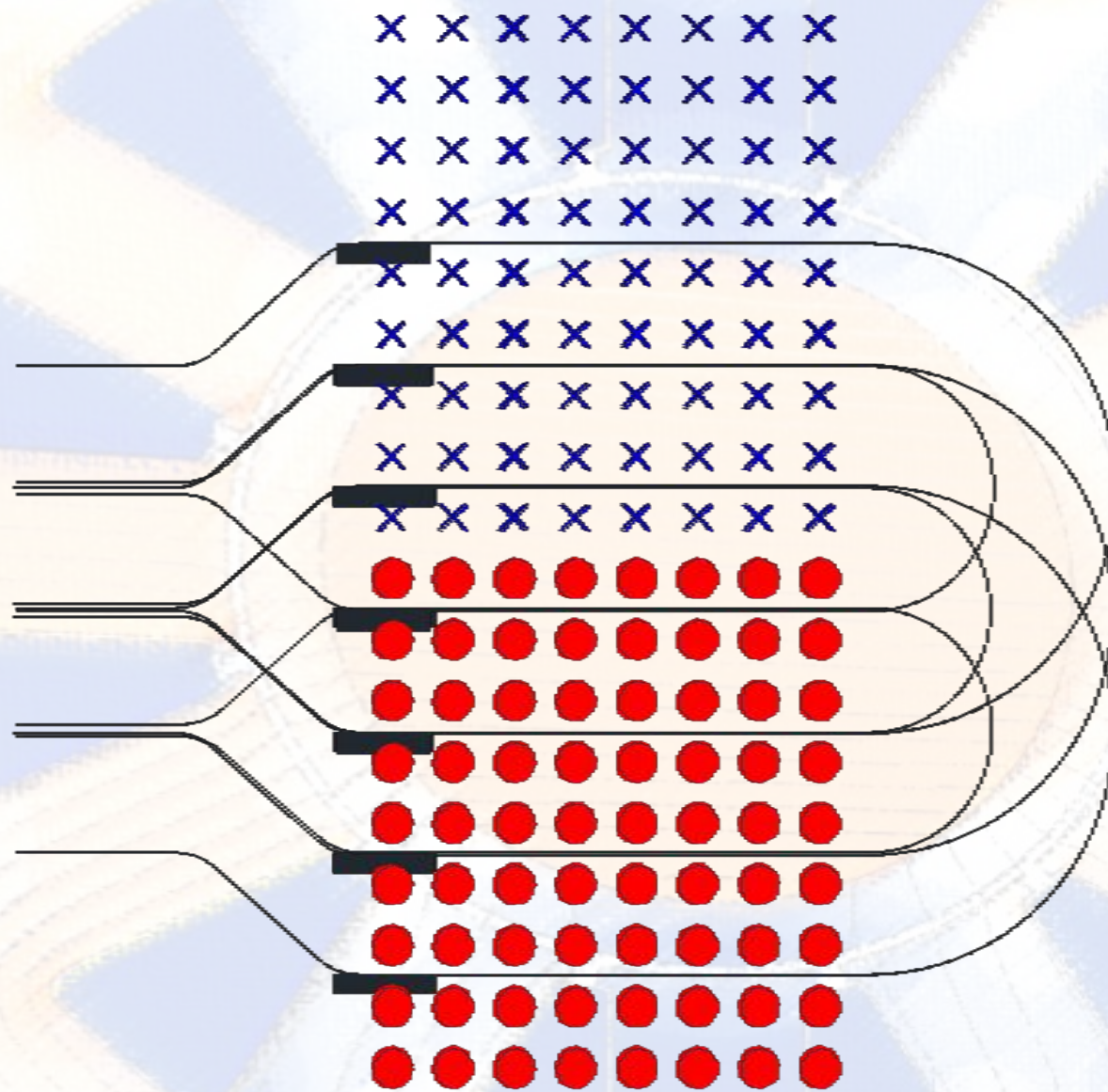
Рассмотрим поток вектора магнитной индукции через замкнутый контур:

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot ds$$

$$\Phi = \iint B \cdot ds$$

Очевидно, что этот интеграл изменяется при движении витка в рассмотренном поле

Основные законы физики



Основные законы физики

Оценим изменение этого потока, рассмотрим отдельно разнонаправленные составляющие:

$$\frac{d\Phi_{\text{возр.}}}{dt} = -B \cdot L \cdot \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{d\Phi_{\text{убыв.}}}{dt} = B \cdot L \cdot \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{dy}{dt} = V$$

Основные законы физики

Таким образом, полное изменение потока равно:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{\text{полн.}}}{dt} &= \frac{d\Phi_{\text{возр.}}}{dt} - \frac{d\Phi_{\text{убыв.}}}{dt} = \\ &= -2 \cdot B \cdot L \cdot V \end{aligned}$$

Основные законы физики

И мы получаем закон электромагнитной индукции:

$$e_{\text{витка}} = - \frac{d\Phi_{\text{полн.}}}{dt}$$

Основные законы физики

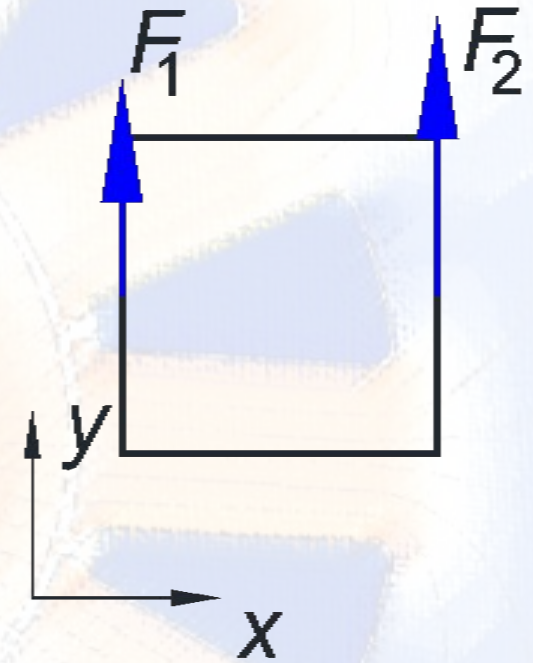
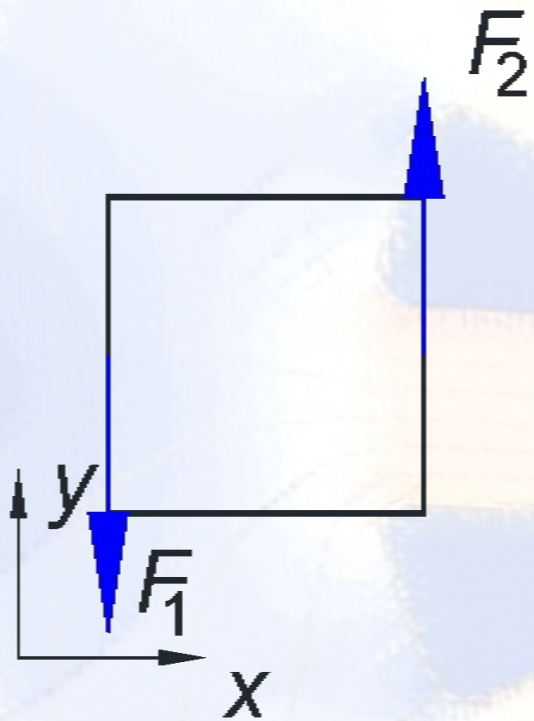
Закон Фарадея:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Основные законы физики

Функция ротора:

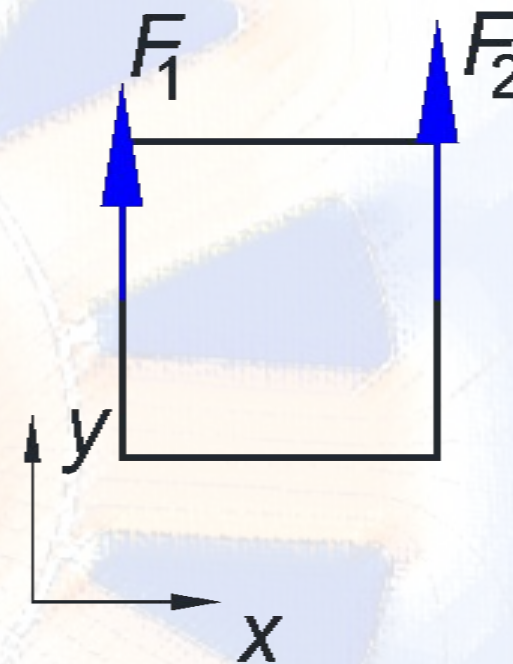
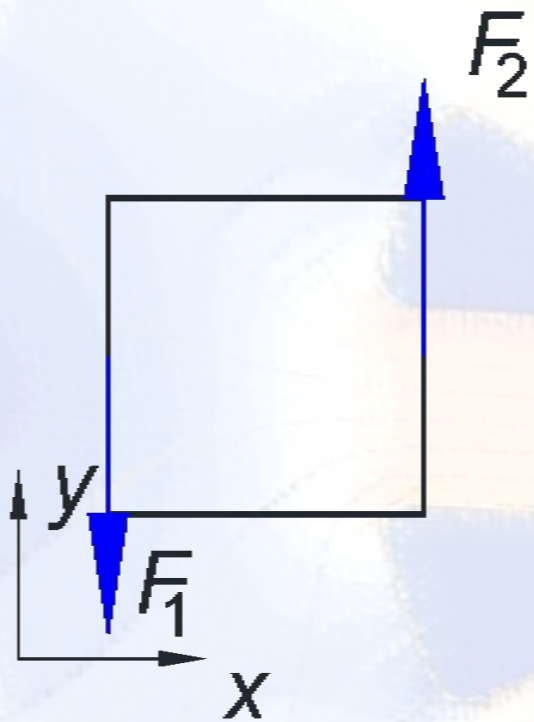


$$M = F_2 \cdot l + (F_1 \cdot l)$$

$$M = F_2 \cdot l - (F_1 \cdot l)$$

Основные законы физики

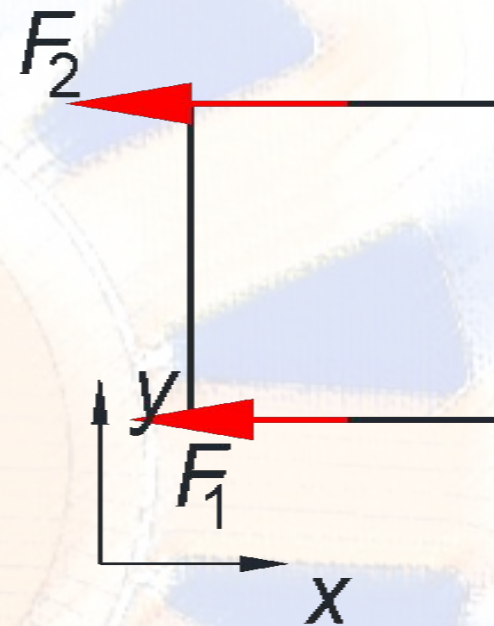
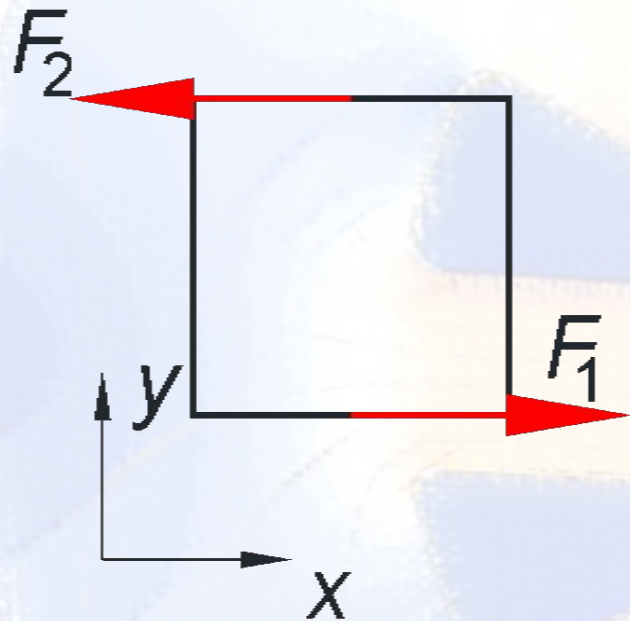
Если размеры кубика малы:



$$M = l \cdot \frac{\partial F_y}{\partial x}$$

Основные законы физики

По другой оси:

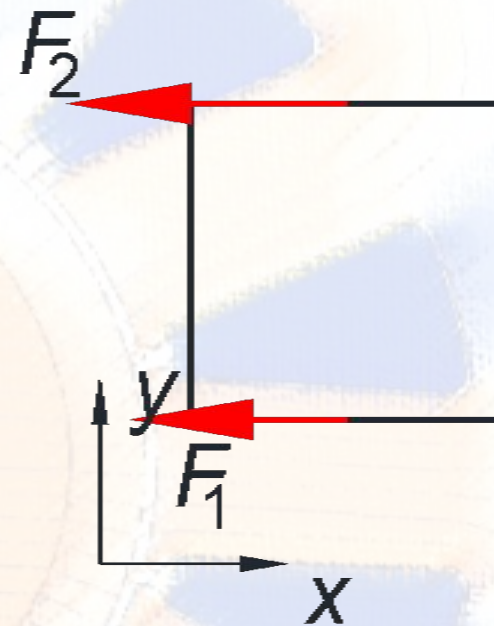
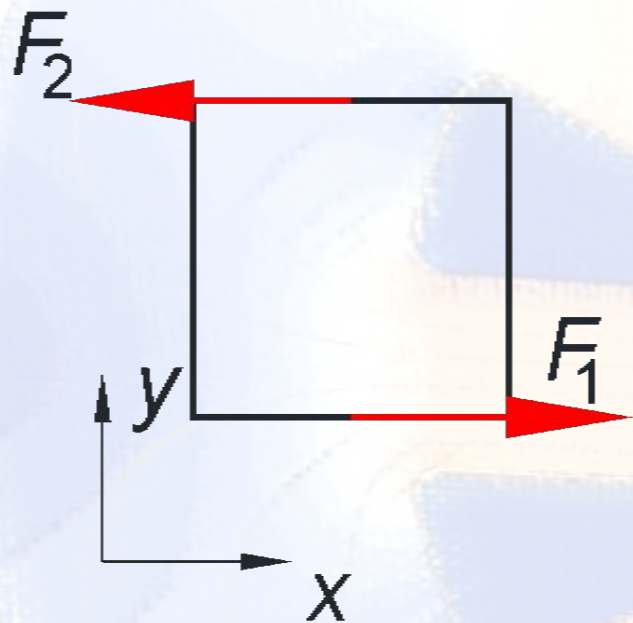


$$M = F_2 \cdot l + (F_1 \cdot l)$$

$$M = F_2 \cdot l - (F_1 \cdot l)$$

Основные законы физики

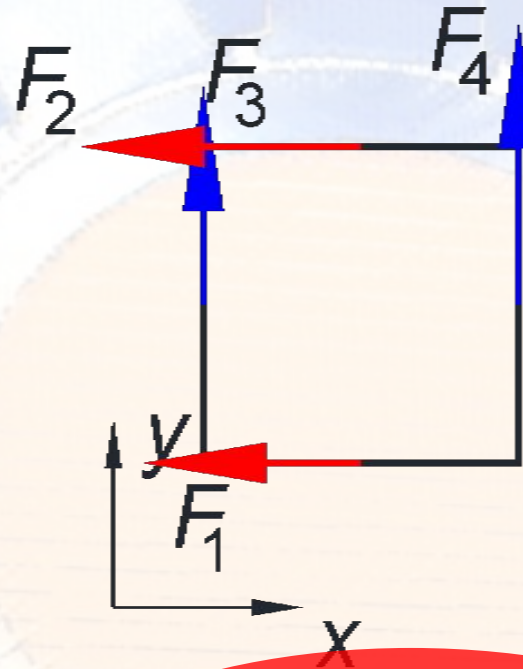
Также, если кубик мал:



$$M = -l \cdot \frac{\partial F_x}{\partial y}$$

Основные законы физики

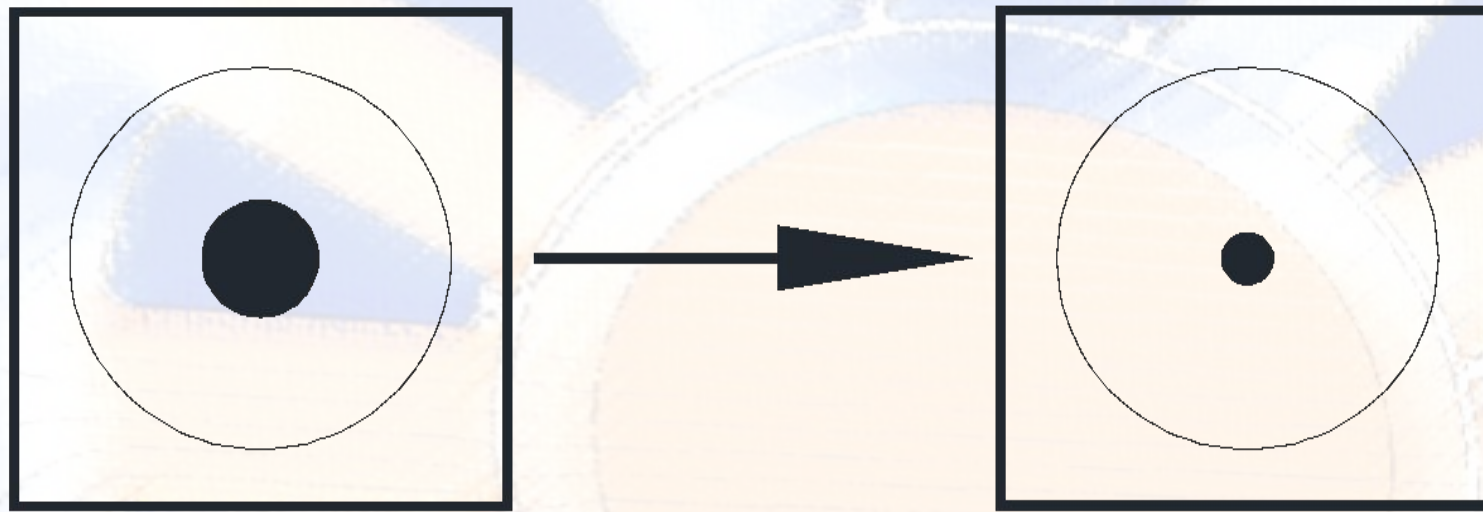
Результирующий момент от всех сил:



$$M = l \cdot \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \text{ Rot } F$$

Основные законы физики

Теперь говорим об индукции:

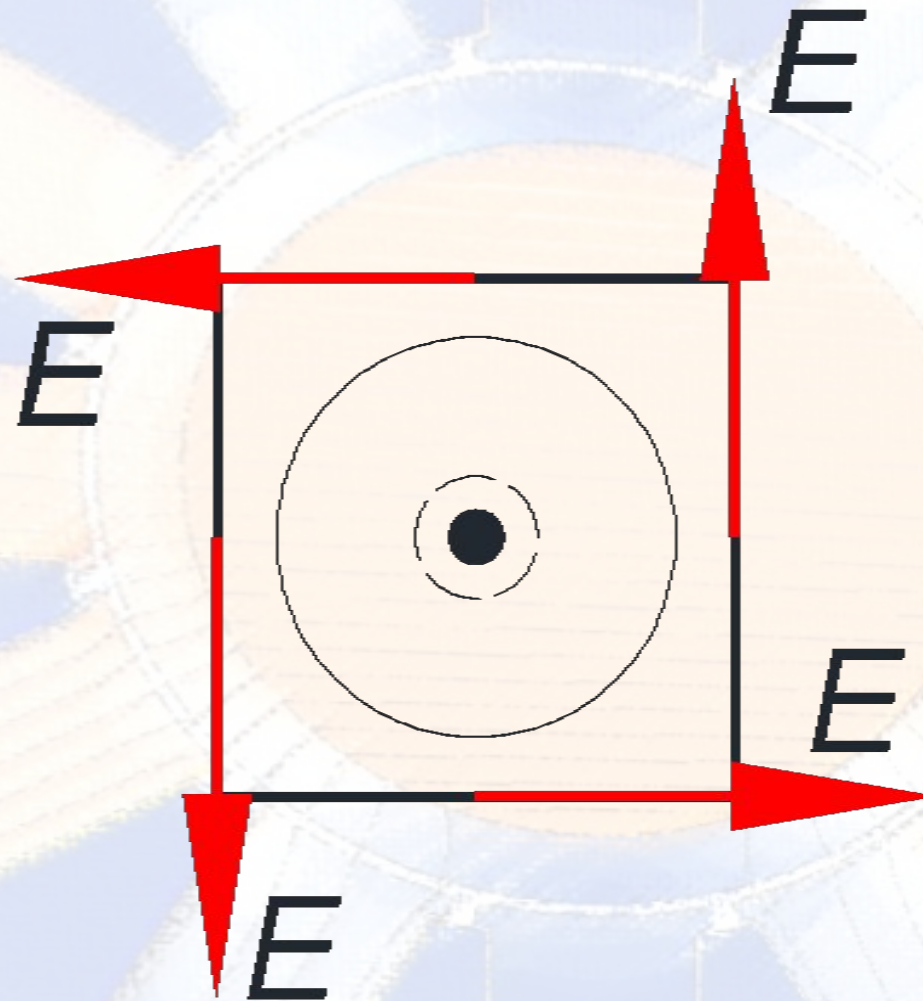


Если вектор индукции направлен на нас (по оси Z), и её величина уменьшается, то:

$$-\frac{\partial B_z}{\partial t} > 0$$

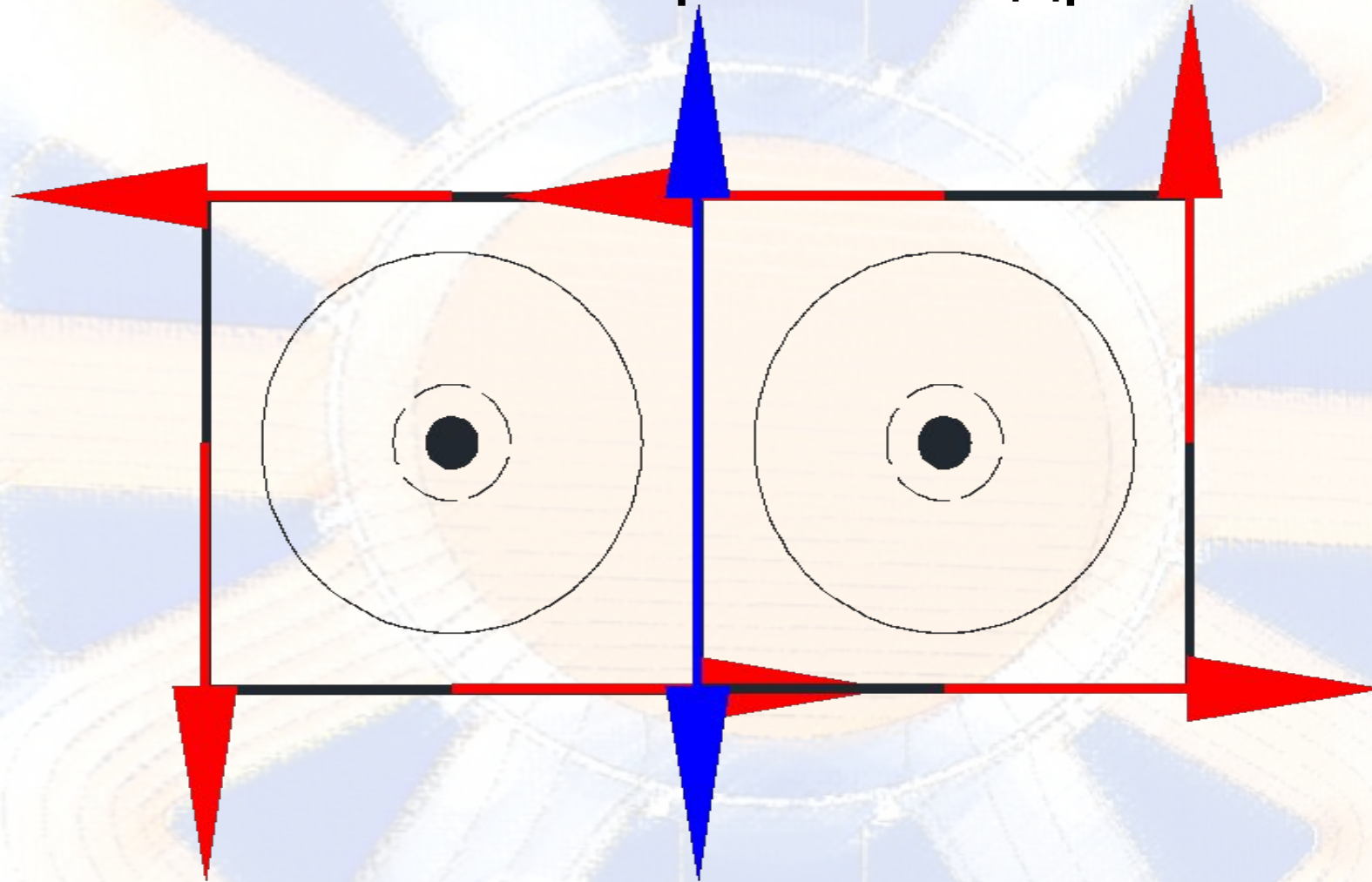
Основные законы физики

А это означает, что должно быть создано поле E :



Основные законы физики

Поле E нескольких элементарных квадратиков:



Основные законы физики

Поле E нескольких элементарных квадратиков:

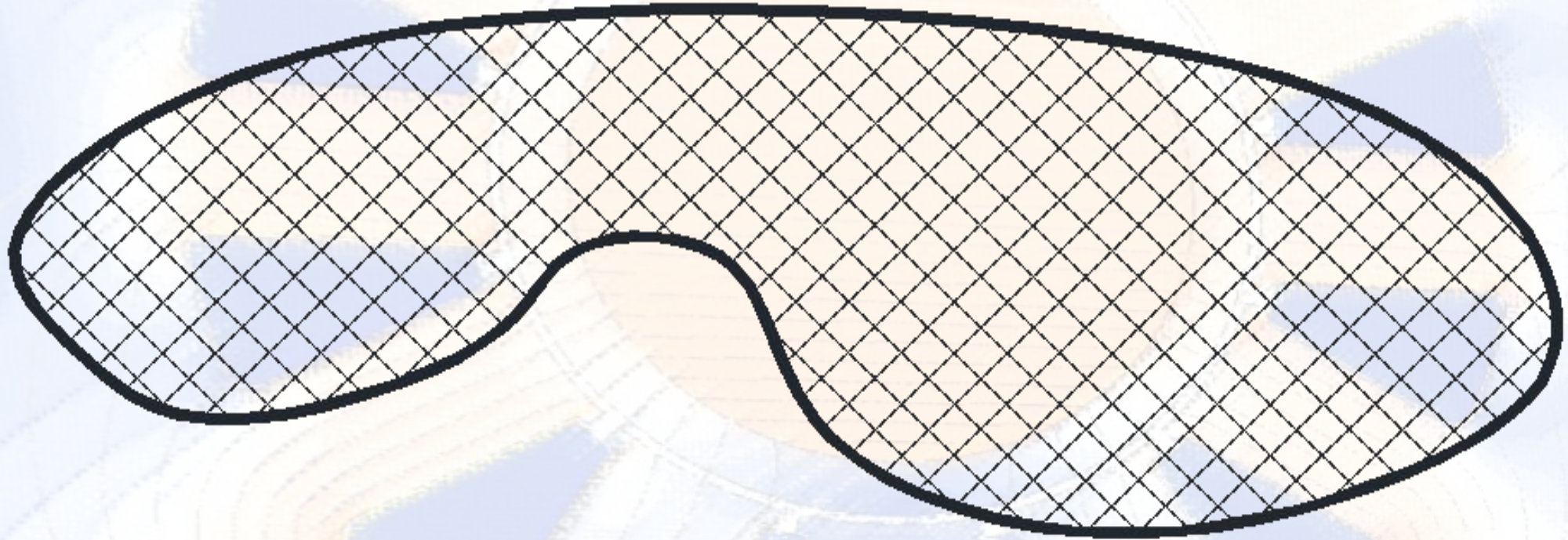
циркуляция $\vec{E} = \sum \vec{E}_{\text{гр}} \cdot \vec{l}_{\text{гр}}$

Или, если грани малы:

циркуляция $\vec{E} = \oint E_{\text{кас}} dl$

Основные законы физики

Любую поверхность, ограниченную замкнутым контуром можно разбить на элементарные площади:



Основные законы физики

Тогда поле E , циркулирующее по контуру можно будет определить как сумму роторов всех элементов поверхности:

циркуляция $\vec{E} = \sum_{j=1}^n -\frac{\partial \vec{V}_j}{\partial t}$

Основные законы физики

Магнитный поток через элемент поверхности обозначим:

$$\Phi_{\text{эл}j} = \vec{B}_j \cdot \vec{n} \cdot S_{\text{эл}}$$

Тогда полный поток будет равен:

$$\Phi_{\text{полн.}} = \sum_{j=1}^n \Phi_{\text{эл}j}$$

Основные законы физики

Выражение для циркуляции поля E примет вид:

$$\text{циркуляция } \vec{E} = - \frac{\partial \Phi_{\text{полн.}}}{\partial t}$$

Основные законы физики

Если по линии контура пронести единичный заряд, то поле E совершит работу:

$$A = \oint E_{\text{касат.}} dl$$

Равную своей циркуляции. А работа поля - это ЭДС.

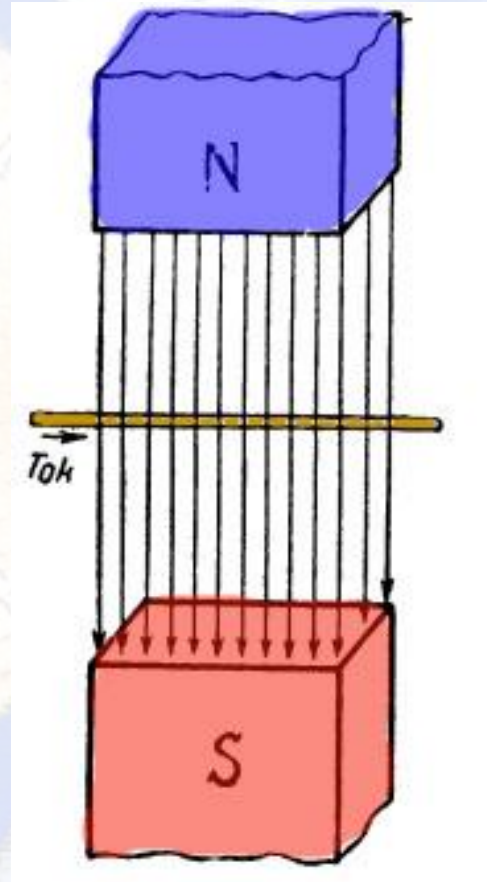
Основные законы физики

Мы получили закон электромагнитной индукции:

$$E_{\text{контура}} = - \frac{d\Phi_{\text{ОХВ.}}}{dt}$$

Основные законы физики

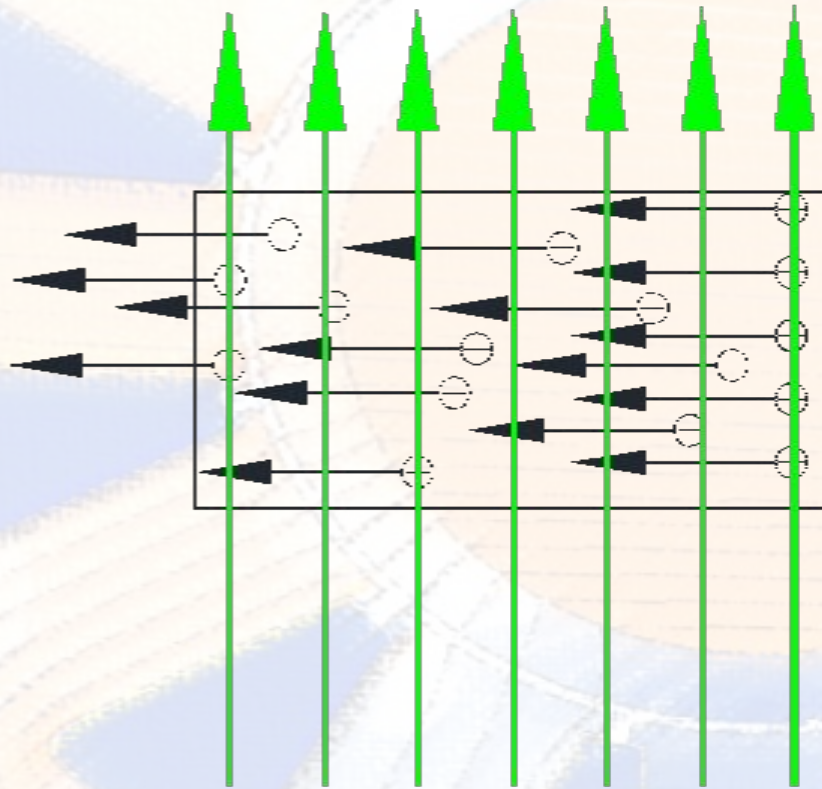
действовать сила, если он помещён в магнитное поле...



Основные законы физики

Как же её выразить?

$$F_{\text{маг}} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

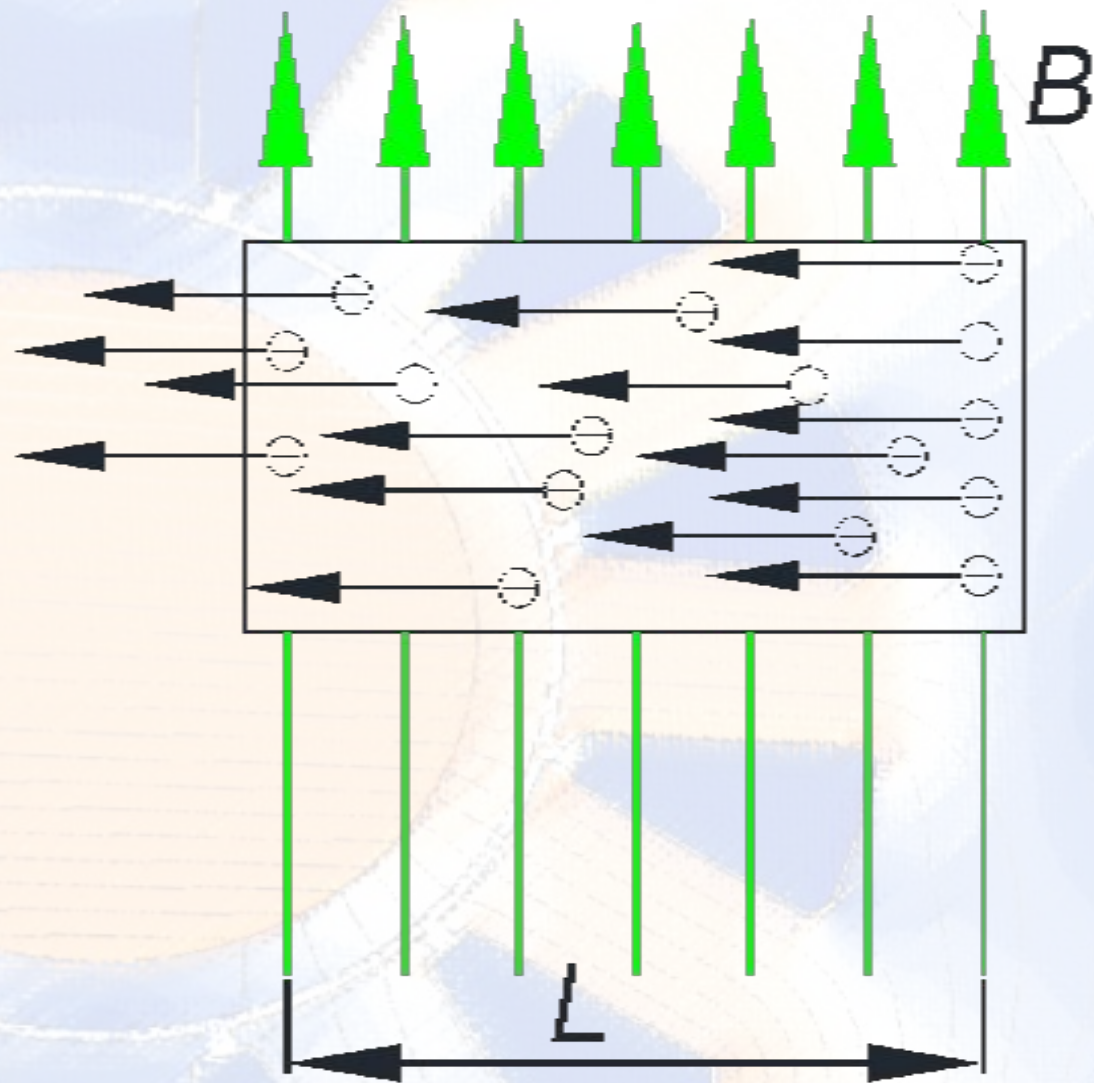


Основные законы физики

$$F_{\text{рез}} = N \cdot q \cdot V \cdot B$$

$$\Delta t = \frac{L}{V}$$

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$



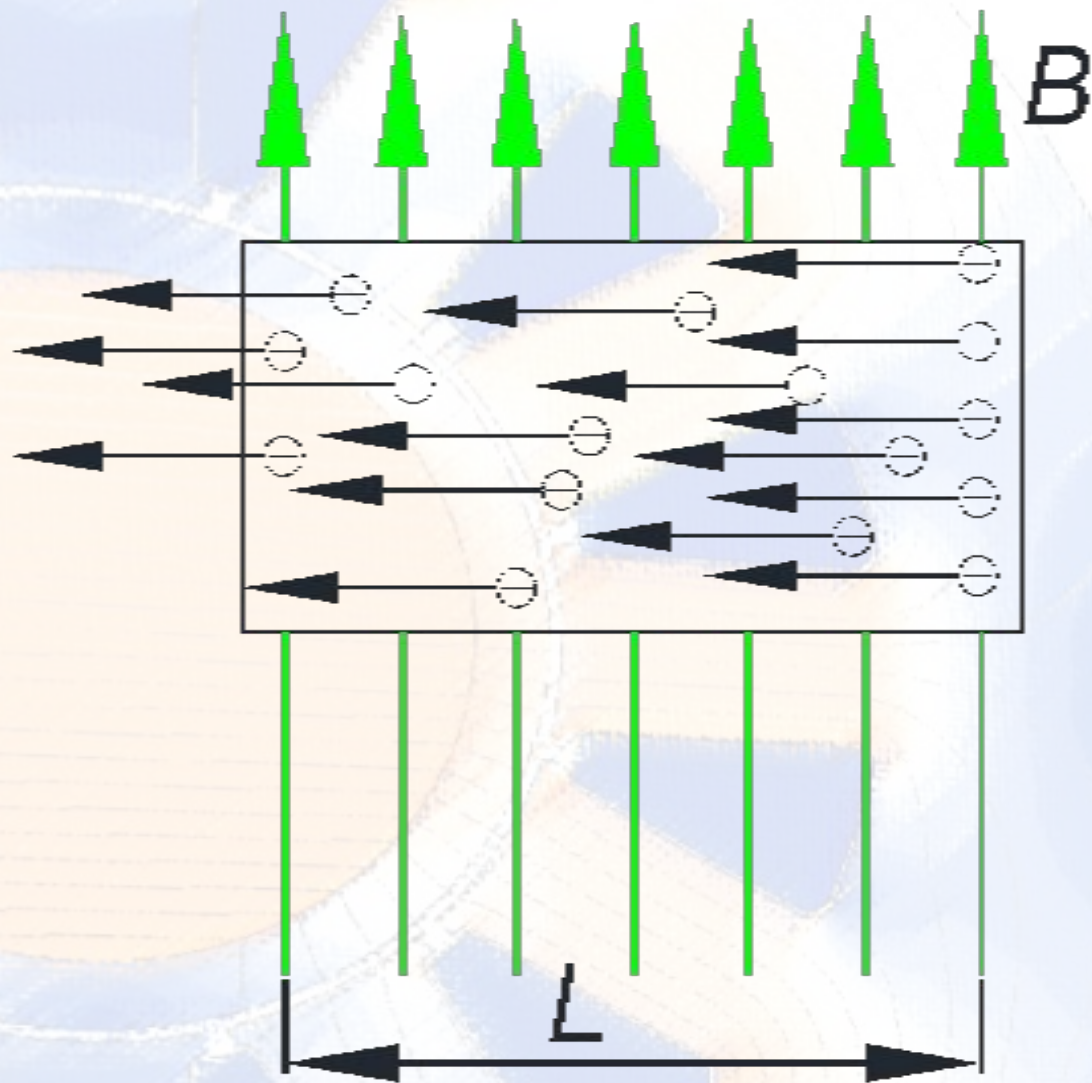
Основные законы физики

$$N \cdot q = \Delta Q$$

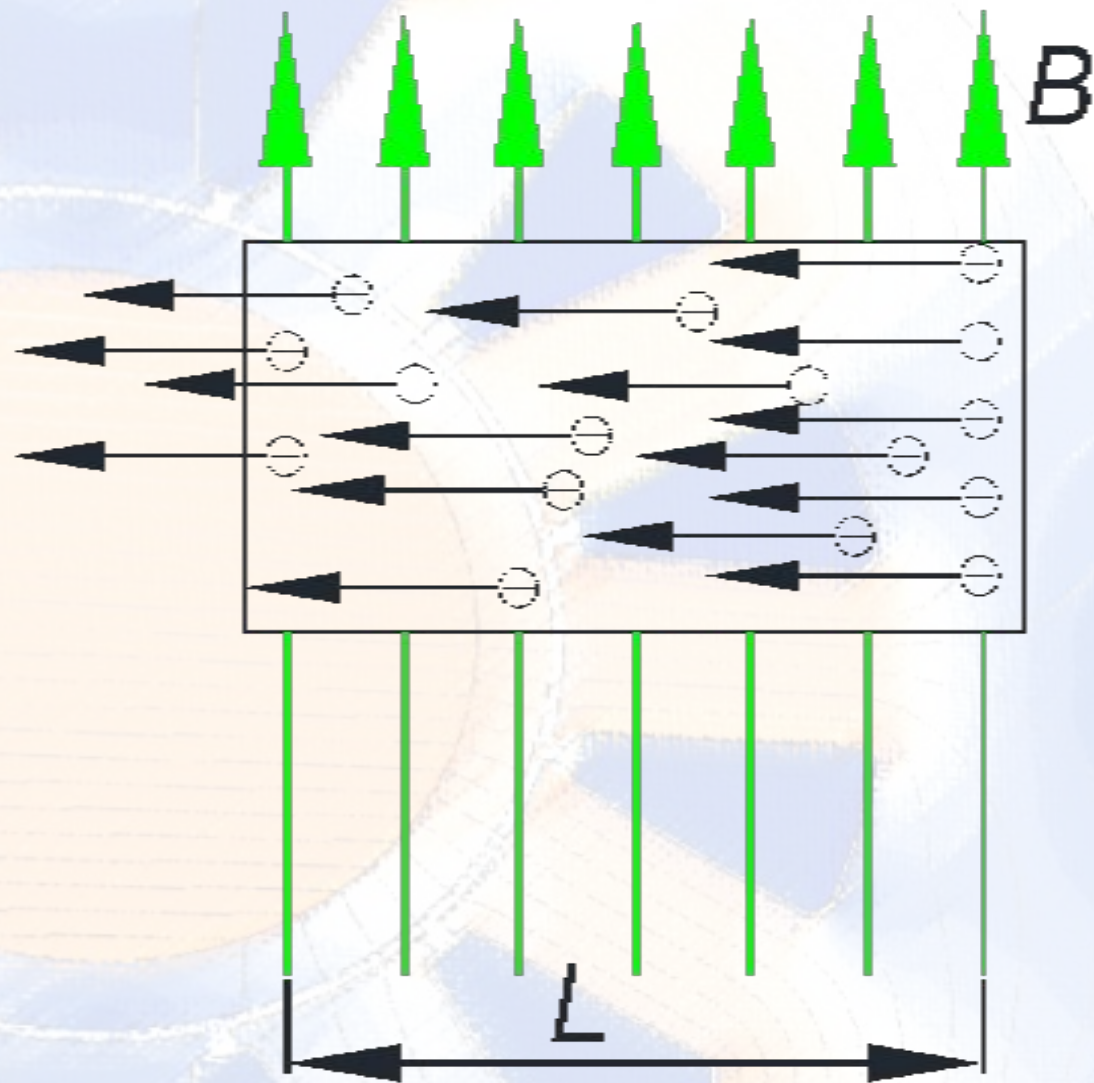
$$F_{\text{рез}} = \Delta Q \cdot \frac{L}{\Delta t} \cdot B$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$$

Основные законы физики



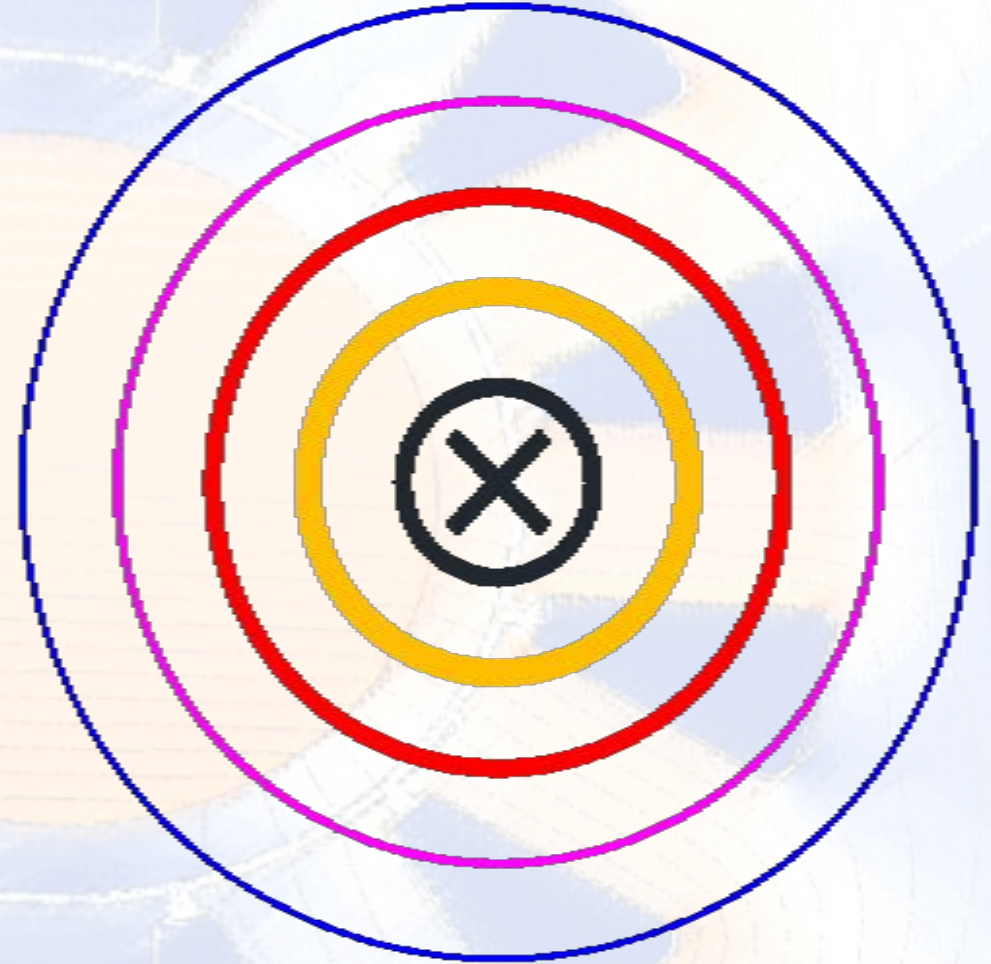
$$F_{\text{рез}} = I \cdot L \cdot B$$



Основные законы физики

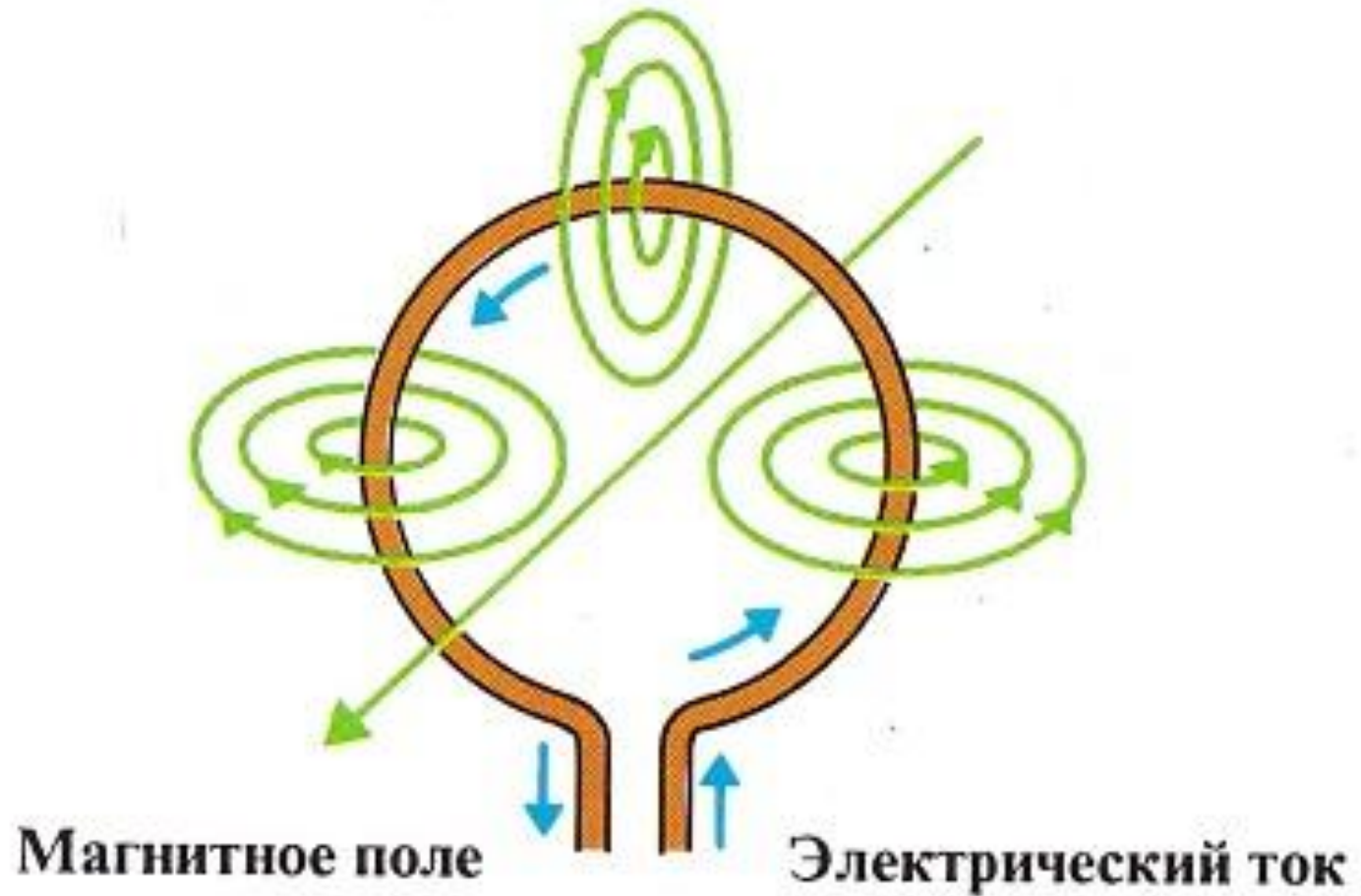
Как же создаётся магнитное поле?

$$\operatorname{rot} \vec{B} = j_{\text{охв}} \cdot \mu_0$$



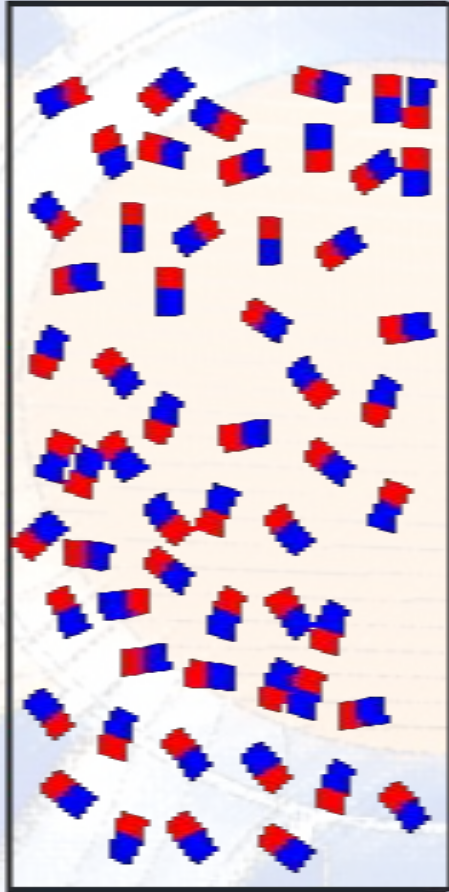
Основные законы физики

Магнитное поле витка с током



Основные законы физики

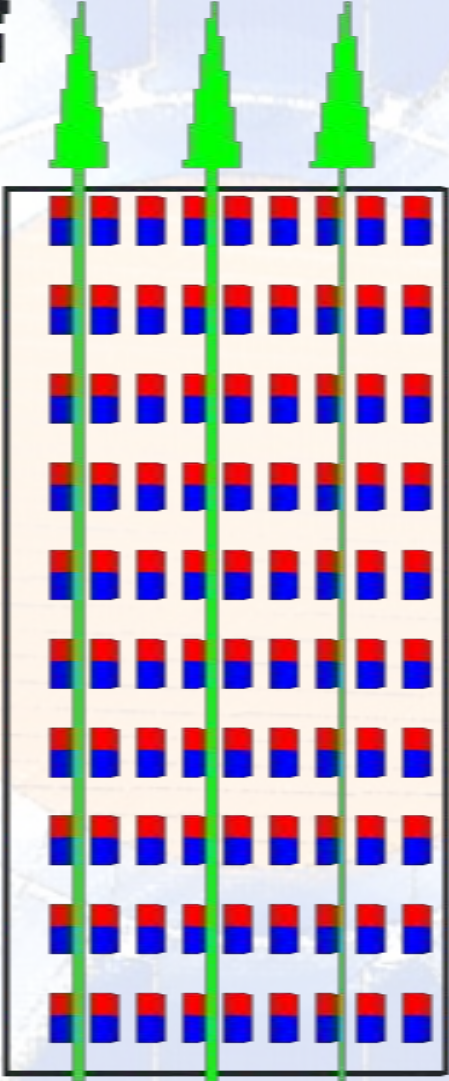
Магнитное поле в ферромагнетиках



Основные законы физики

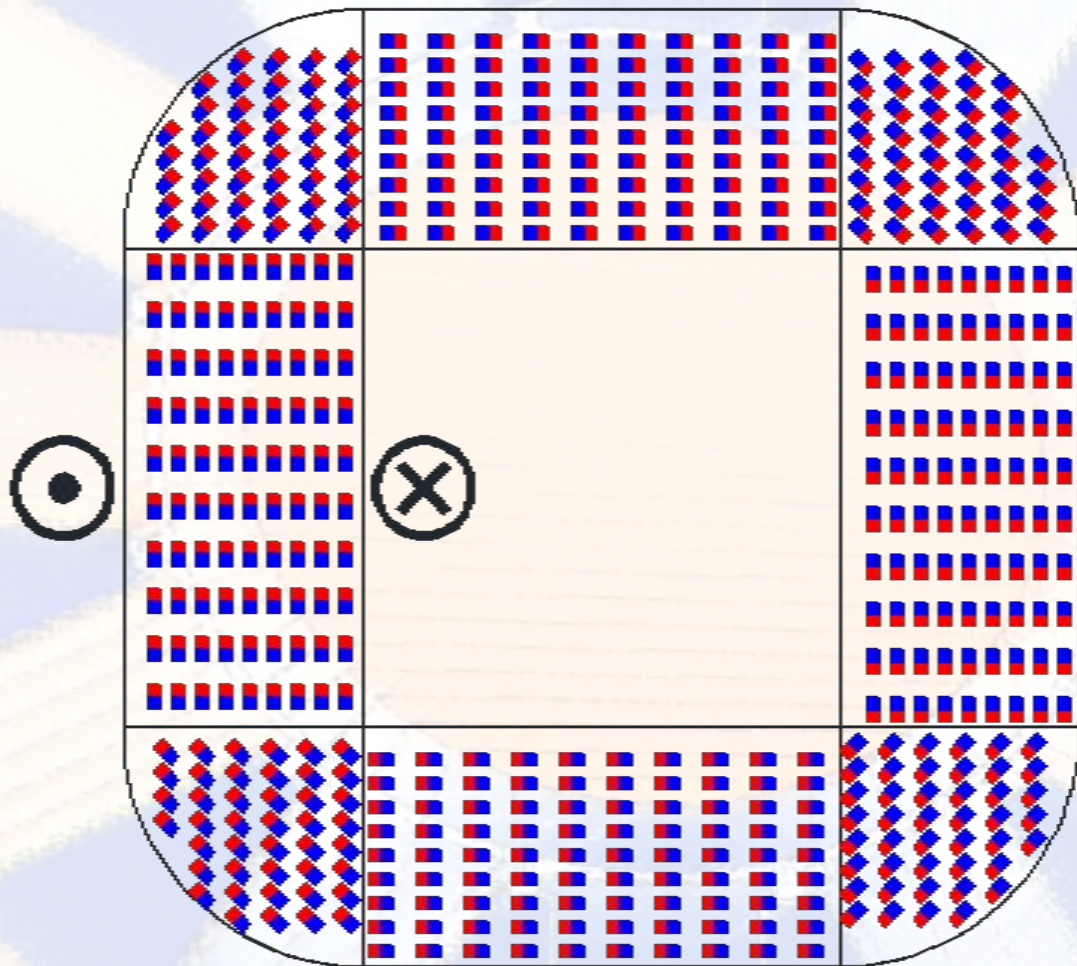
Магнитное поле в ферромагнетиках

B



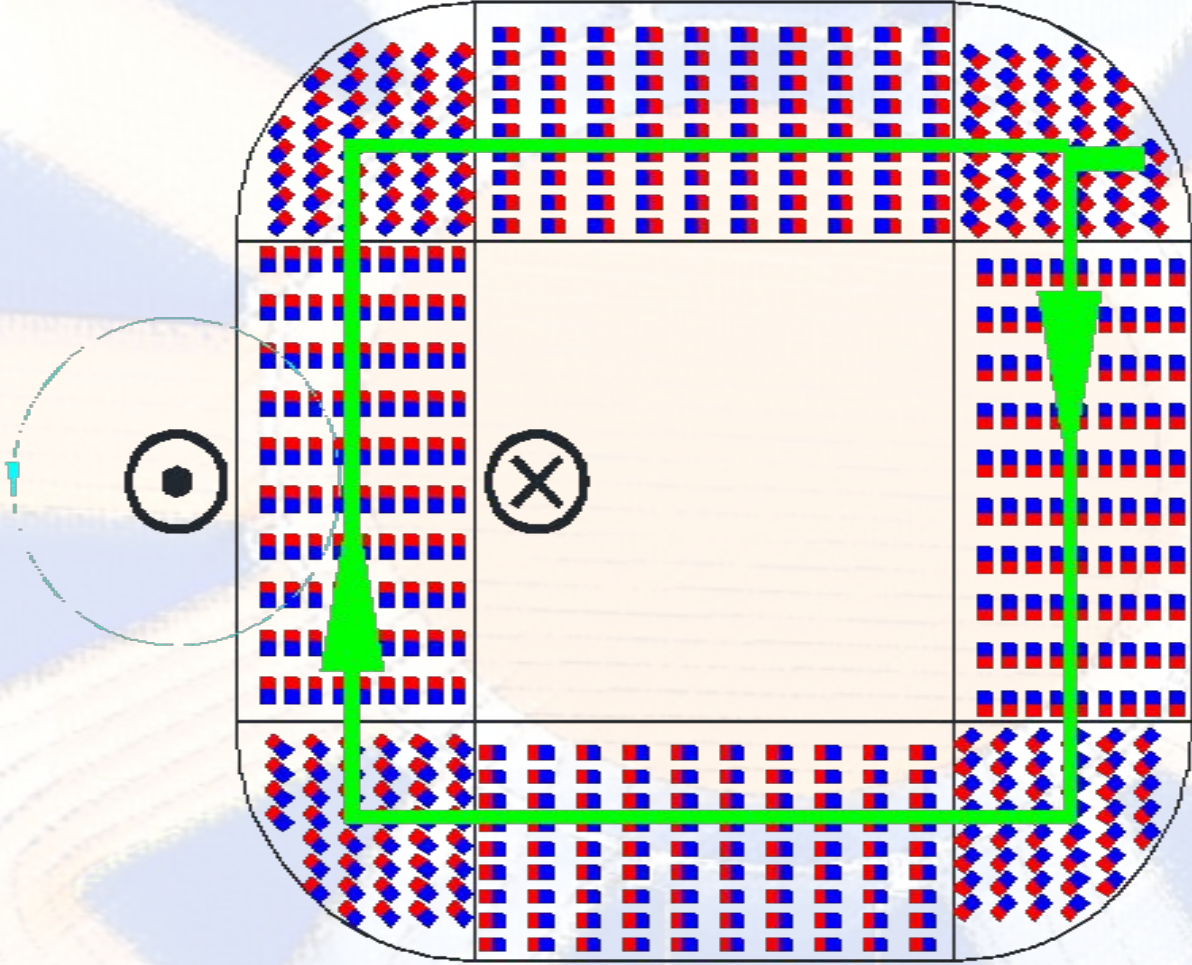
Основные законы физики

Магнитное поле в ферромагнетиках



Основные законы физики

Магнитное поле в ферромагнетиках



Основные законы физики

The background of the slide features a stylized representation of a transformer core, shown as a circular ring with several radial segments. Overlaid on this are concentric, dashed lines representing magnetic field lines, which are denser in the center and become sparser towards the outer edge. The color palette is a mix of light blue and pale yellow, creating a technical and scientific atmosphere.

Магнитное поле пропорционально току

Если ток изменяется, то и поле изменяется

А изменение поля приведёт к появлению ЭДС в витке

И ЭДС будет пропорциональна скорости изменения тока

Основные законы физики

Отношение ЭДС к скорости изменения тока называется индуктивностью.

$$L = \frac{E}{dI/dt}$$

Основные законы физики

ЭДС – изменение потока, тогда:

$$L = \frac{d\Phi / dt}{dI / dt} = \frac{d\Phi}{dI}$$

И, если принять систему линейной, то:

$$L = \frac{d\Phi}{dI} = \frac{\Phi}{I}$$

Основные законы физики

Если контур тока содержит не один виток, то вводится термин потокосцепления.

$$\Psi = \Phi \cdot w$$

Ведь ЭДС будет наводиться в каждом витке. Тогда определение индуктивности запишется как:

$$L = \frac{\Psi}{I}$$

Основные законы физики

Расчёт магнитного потока – непростое занятие.
Надо решать уравнения Максвелла...

Для инженерных расчётов вводятся понятия магнитодвижущей силы и напряжённости магнитного поля

$$F = \operatorname{rot} \vec{H} = j_{\text{охв}}$$

Основные законы физики

В другой формулировке – это закон полного тока:

$$F = \oint \vec{H} \cdot dl = j_{\text{охв}}$$

$$F = \oint \vec{H} \cdot dl = w \cdot I$$

Основные законы физики

Таким образом вводится аналогия магнитных и электрических цепей:

$$F \rightarrow E$$

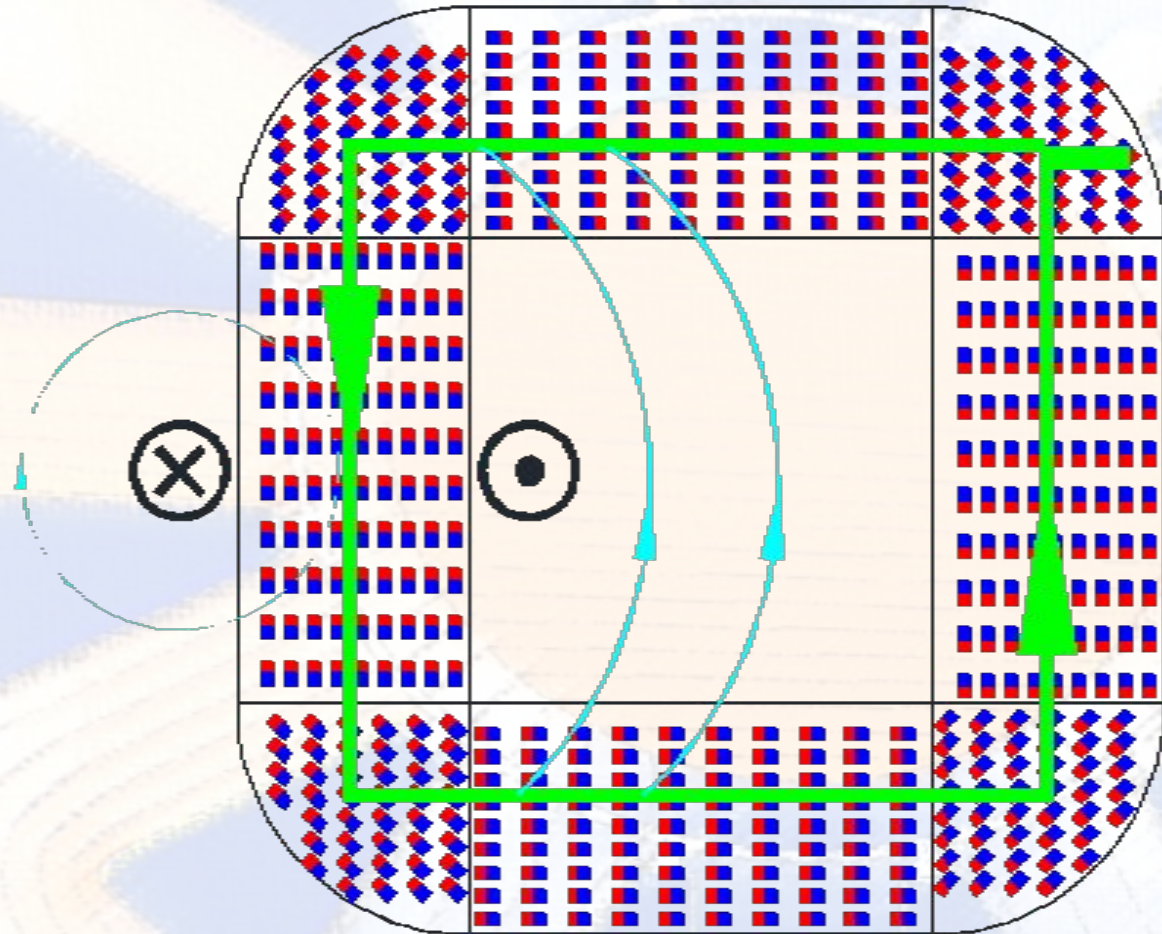
$$\Phi \rightarrow I$$

$$\Lambda \rightarrow \gamma$$

$$B(H) \rightarrow ВАХ$$

Основные законы физики

Как поле выглядит на самом деле:



Принцип работы электротехнических устройств

Что будет происходить, если по обмотке потечёт переменный ток:

$$\sim I \rightarrow \sim B \rightarrow \sim E$$

$$\frac{di(t)}{dt} \sim \frac{dB(t)}{dt} \sim e(t)$$

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} = e(t)$$

Принцип работы электротехнических устройств



Что влияет на индуктивность:

- 1) Магнитные свойства материала сердечника
- 2) Магнитные свойства материала внешней среды
- 3) Геометрия сердечника
- 4) Число витков в обмотке

Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:

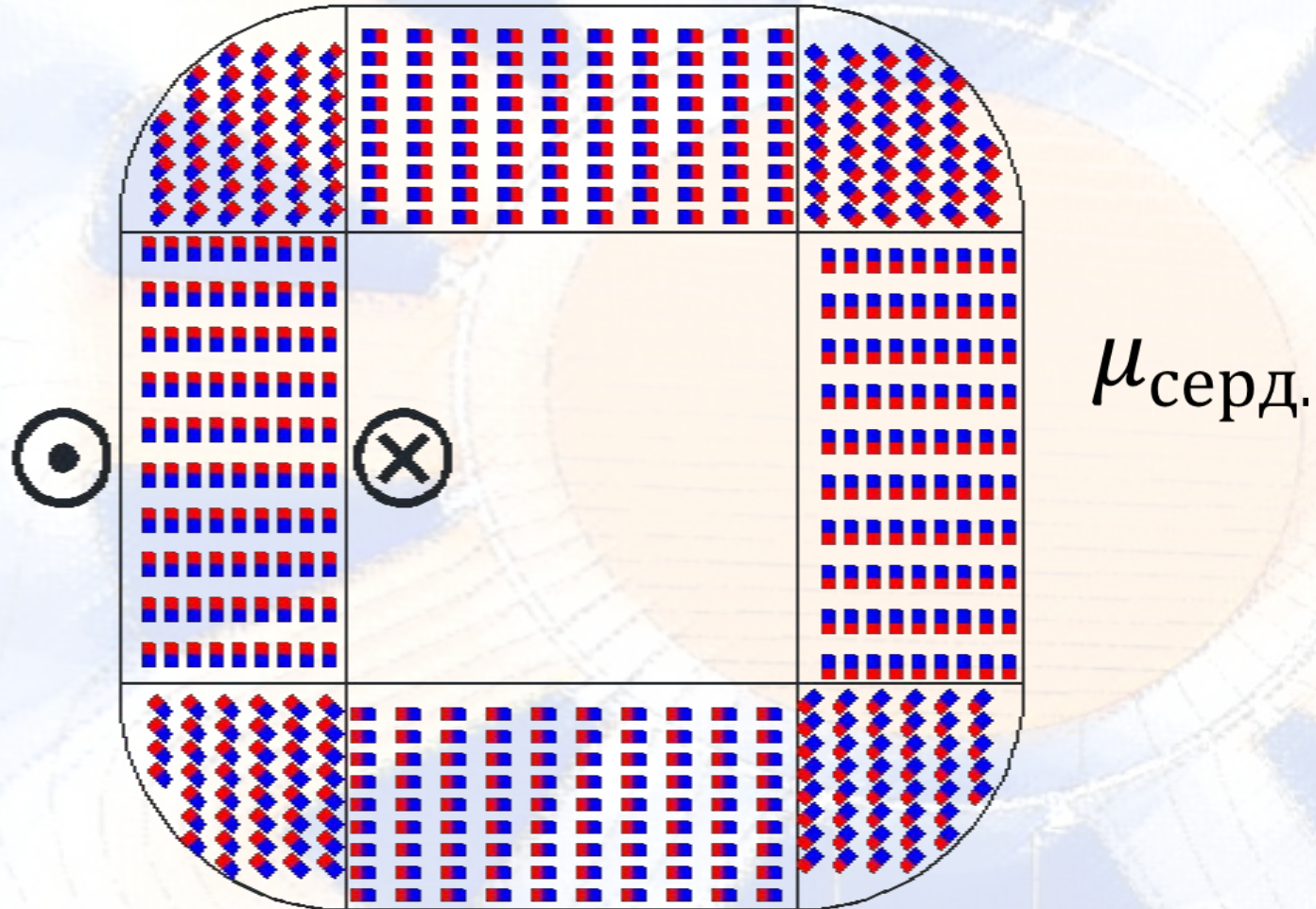
$$L = \frac{d\Psi(t)}{di(t)}$$

$$\Psi(t) = \Phi(t) \cdot w$$

$$\Phi(t) = B(t) \cdot S$$

Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:



Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:

$$B(t) = f(H(t))$$

$$B_{\text{возд.}} = \mu_0 \cdot H_{\text{возд.}}$$



$$B_{\text{серд.}} = \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0 \cdot H_{\text{серд.}}$$

Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:

$$H_{\text{серд.}} = \frac{F_{\text{кат.}}}{l_{\text{линии}}}$$

$$B_{\text{серд.}} = \frac{F_{\text{кат.}}}{l_{\text{линии}}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0$$

Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:

$$B_{\text{серд.}} = \frac{I \cdot w_{\text{кат.}}}{l_{\text{линии}}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0$$

$$\Phi_{\text{серд.}} = B_{\text{серд.}} \cdot S = \frac{I \cdot w_{\text{кат.}}}{l_{\text{линии}}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0 \cdot S$$

Принцип работы электротехнических устройств

Как рассчитать индуктивность:

$$\Psi_{\text{кат.}} = \Phi_{\text{серд.}} \cdot W_{\text{кат.}} = \frac{I \cdot w_{\text{кат.}}^2}{l_{\text{линии}}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0 \cdot S$$

$$L_{\text{кат.}} = \frac{\Psi_{\text{кат.}}}{I_{\text{кат.}}} = \frac{w_{\text{кат.}}^2}{l_{\text{линии}}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0 \cdot S$$

Принцип работы электротехнических устройств

Магнитная проводимость:

$$\Lambda_{\text{конт.}} = \frac{\Phi_{\text{конт.}}}{F_{\text{кат.}}} = \frac{B \cdot S}{I \cdot w_{\text{кат.}}}$$

$$\Lambda_{\text{конт.}} = \frac{\frac{F_{\text{кат.}} \cdot \mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0}{l_{\text{линии}}} \cdot S}{F_{\text{кат.}}} = \frac{\mu_{\text{серд.}} \cdot \mu_0 \cdot S}{l_{\text{линии}}}$$

Принцип работы электротехнических устройств