

Электромагнитные волны



Теория Максвелла

Всякое переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле.

Всякое переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле

Вихревое электрическое поле

По Максвеллу, изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле (вихревое поле) \vec{E}_B , циркуляция которого

$$\oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = \oint_L \vec{E}_{Bl} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Первое уравнение системы уравнений Максвелла

$$\vec{E} = \vec{E}_B + \vec{E}_q$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

Это уравнение показывает, что источниками электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и изменяющиеся во времени магнитные поля

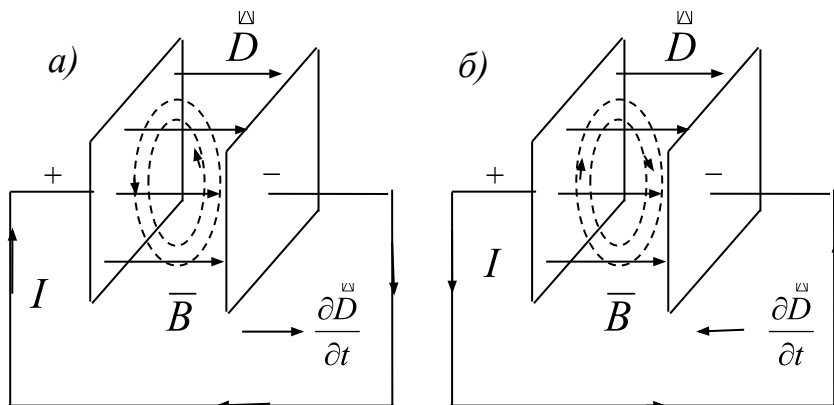
Ток смещения

Т.к. магнитное поле есть основной обязательный признак всякого тока, Максвелл назвал переменное электрическое поле **током смещения**, в отличие от тока проводимости, обусловленного движением заряженных частиц.

$$\vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

- ПЛОТНОСТЬ ТОКА СМЕЩЕНИЯ

Ток смещения



При зарядке конденсатора (рис.а) ток течет от правой обкладки к левой, поле в конденсаторе усиливается $\frac{\partial D}{\partial t} > 0$ направления векторов $\frac{\partial D}{\partial t}$ и $\vec{j}_{см}$ совпадают.

При разрядке конденсатора (рис.б) ток течет от левой обкладки к правой, поле в конденсаторе ослабляется $\frac{\partial D}{\partial t} < 0$, т.е. вектор направлен против вектора D .

Однако вектор $\frac{\partial D}{\partial t}$ направлен опять так же, как и вектор $\vec{j}_{см}$.

Полный ток

Если в каком-либо проводнике имеется переменный ток, то внутри проводника существует переменное электрическое поле. Поэтому внутри проводника имеется и ток проводимости, и ток смещения и магнитное поле проводника определяется суммой этих двух токов.

Максвелл ввел понятие **полного тока**, равного сумме токов проводимости и смещения.

Плотность полного тока

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Полный ток всегда замкнут. На концах проводника обрывается лишь ток проводимости, а в диэлектрике (или вакууме) между концами проводника имеется ток смещения, который замыкает ток проводимости.

Второе уравнение системы уравнений Максвелла

Обобщенная теорема о циркуляции вектора \vec{H}

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

Это уравнение показывает, что магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями.

Третье уравнение системы уравнений Максвелла

Это – постулат Максвелла, выражающий закон создания электрических полей действием зарядов в произвольных средах.

$$\oint_S \vec{D} dS = \int_V \rho dV$$

Четвертое уравнение системы уравнений Максвелла

Теорема Гаусса для вектора \vec{B}

$$\oint_S \vec{B} dS = 0$$

Уравнение отражает тот факт, что магнитных зарядов в природе нет.

Система уравнений Максвелла

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Материальные уравнения

Материальные уравнения описывают характеристики среды, в которой распространяется электромагнитная волна, а именно – наличие диэлектриков (ε) ферромагнетиков (μ), удельной проводимости (σ).

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

где ε_0 и μ_0 – соответственно электрическая и магнитная постоянные;

ε и μ – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости;

σ - удельная проводимость вещества.

Уравнения Максвелла для стационарных полей

$$(E = \text{const}; B = \text{const})$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Т.е. источниками электрического поля в данном случае являются только электрические заряды, а источниками магнитного – только токи проводимости.

В данном случае электрические и магнитные поля независимы друг от друга, что позволяет изучать отдельно *постоянные* электрические и магнитные поля.

Электромагнитная волна

- это переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью.

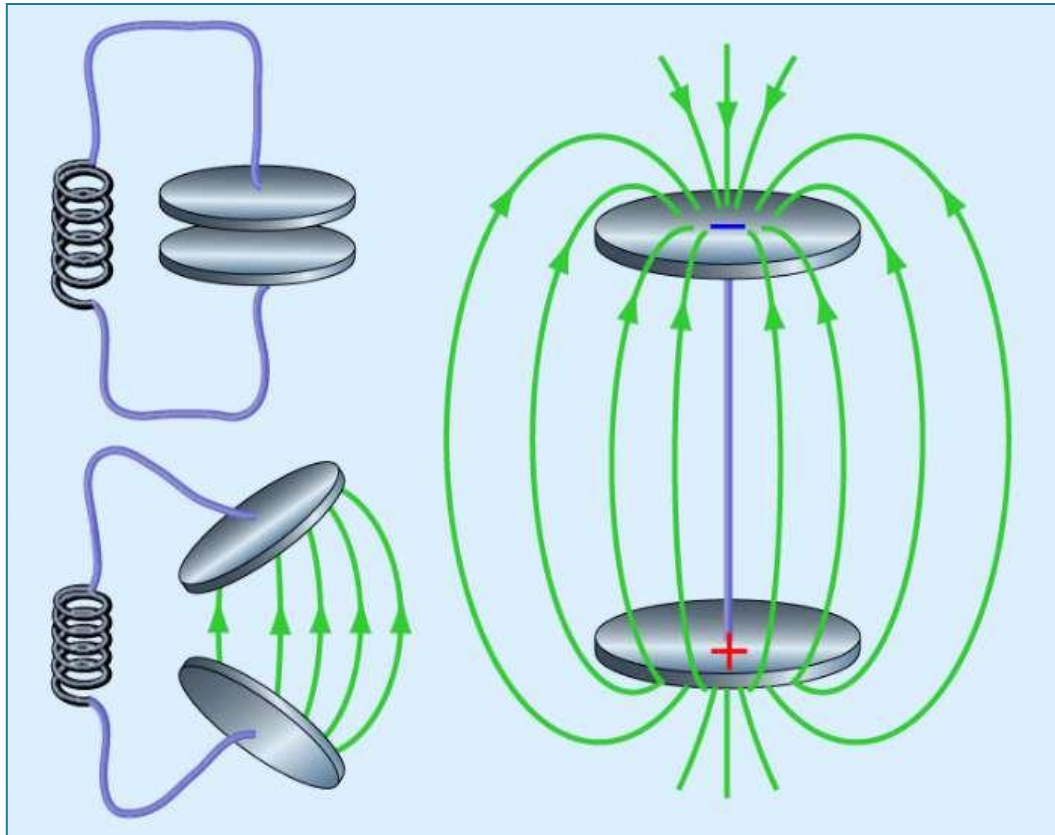
Существование электромагнитных волн вытекает из уравнений Максвелла.

Источники ЭМВ

- любой электрический колебательный контур или проводник, по которому течет переменный электрический ток.

Излучающая способность источника определяется его формой, размерами и частотой колебаний.

Открытый колебательный контур



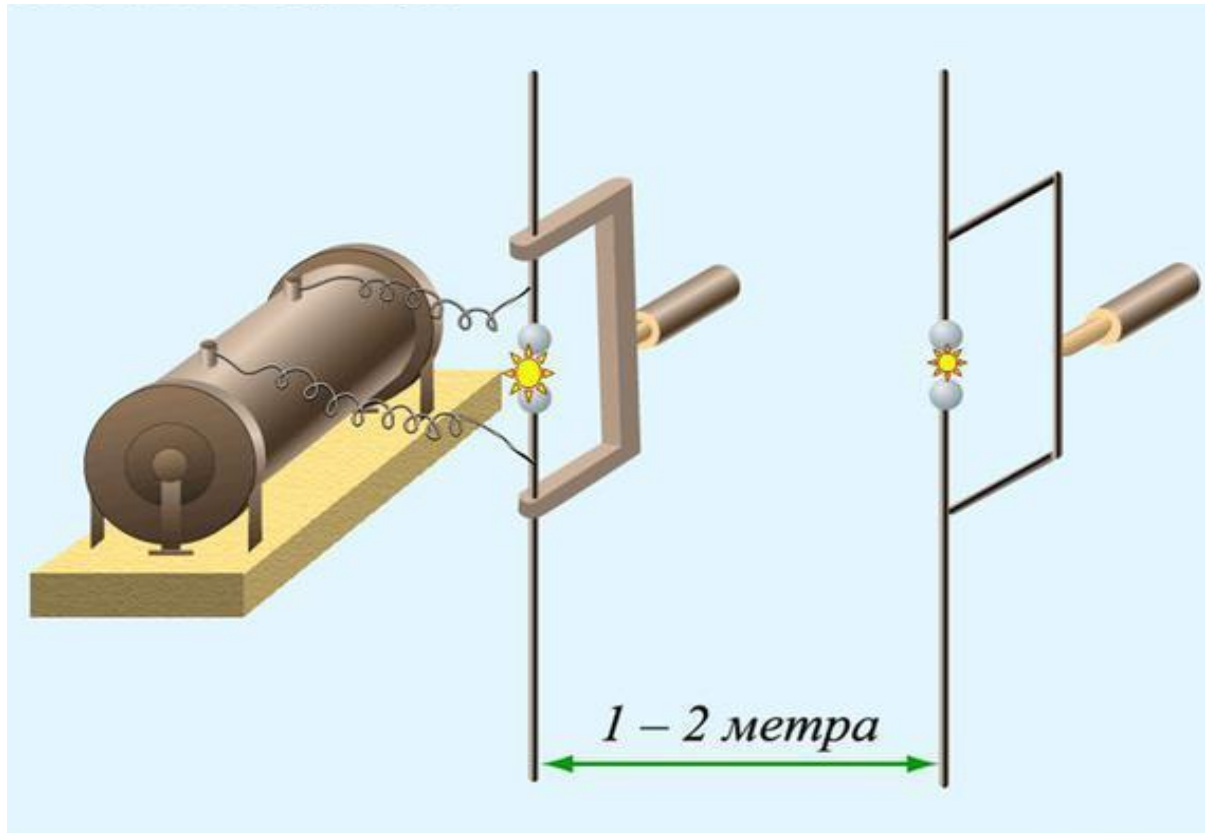
Генрих Рудольф Герц



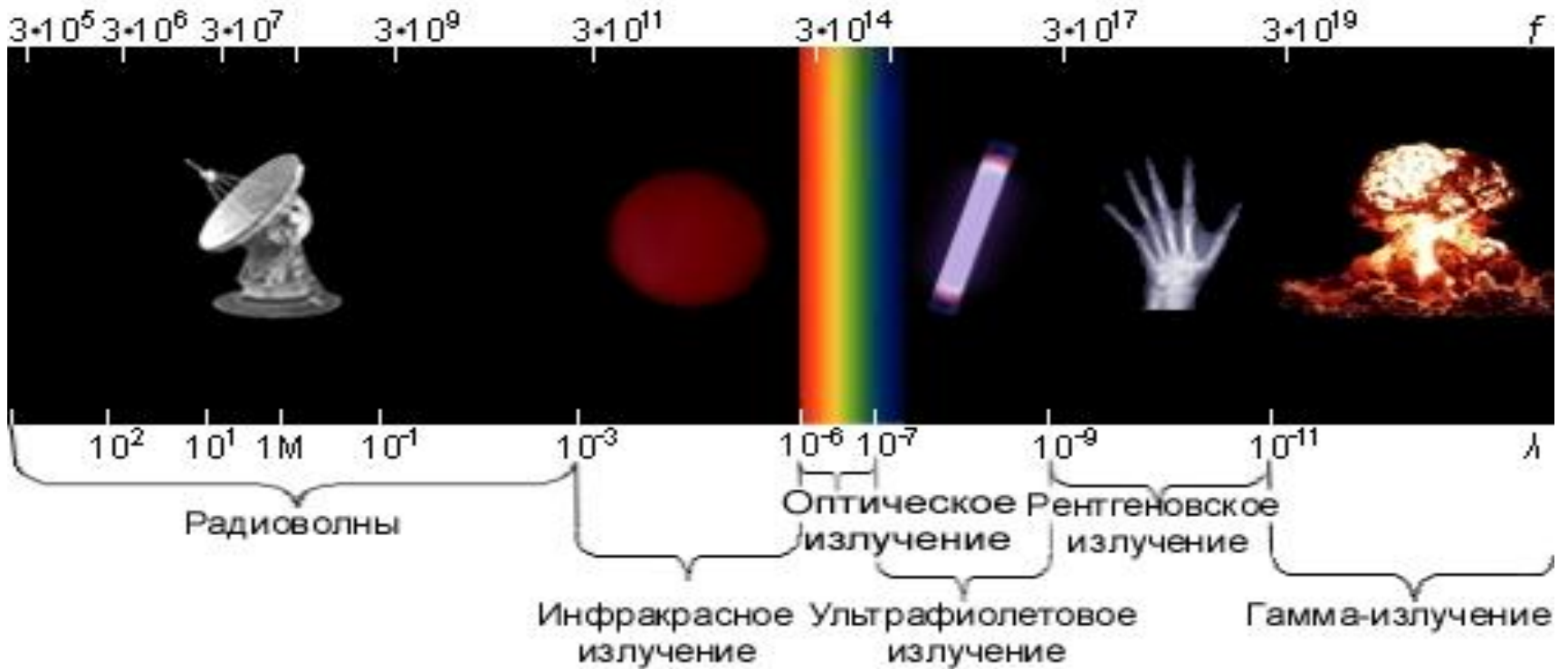
В 1883 году немецкий инженер Генрих герц подтвердил существование электромагнитных волн и доказал, что никакой материальный предмет не может помешать их распространению

Генрих Рудольф Герц

Опыты Герца



Электромагнитные волны



	Радиоволны
Длина волны(м)	$10^5 - 10^{-3}$
Частота(Гц)	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{11}$
Энергия(ЭВ)	$1,24 \cdot 10^{-10} - 1,24 \cdot 10^{-2}$
Источник	Колебательный контур Макроскопические вибраторы
Приемник	Искры в зазоре приемного вибратора Свечение газоразрядной трубки, когерера
История открытия	Феддерсен (1862 г.), Герц (1887 г.), Попов , Лебедев, Риги
Применение	Сверхдлинные- Радионавигация, радиотелеграфная связь, передача метеосводок Длинные – Радиотелеграфная и радиотелефонная связь, радиовещание, радионавигация Средние- Радиотелеграфия и радиотелефонная связь радиовещание, радионавигация Короткие- радиолюбительская связь УКВ- космическая радио связь ДМВ- телевидение, радиолокация, радиорелейная связь, сотовая телефонная связь СМВ- радиолокация, радиорелейная связь, астронавигация, спутниковое телевидение ММВ- радиолокация

	Инфракрасное излучение
Длина волны (м)	$2 \cdot 10^{-3} - 7,6 \cdot 10^{-7}$
Частота(Гц)	$3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{14}$
Энергия(ЭВ)	$1,24 \cdot 10^{-2} - 1,65$
Источник	Любое нагретое тело: свеча, печь, батарея водяного отопления, электрическая лампа накаливания Человек излучает электромагнитные волны длиной $9 \cdot 10^{-6}$ м
Приемник	Термоэлементы, болометры, фотоэлементы, фоторезисторы, фотопленки
История открытия	Рубенс и Никольс (1896 г.),
Применение	В криминалистике, фотографирование земных объектов в тумане и темноте, бинокль и прицелы для стрельбы в темноте, прогревание тканей живого организма (в медицине), сушка древесины и окрашенных кузовов автомобилей, сигнализация при охране помещений, инфракрасный телескоп,

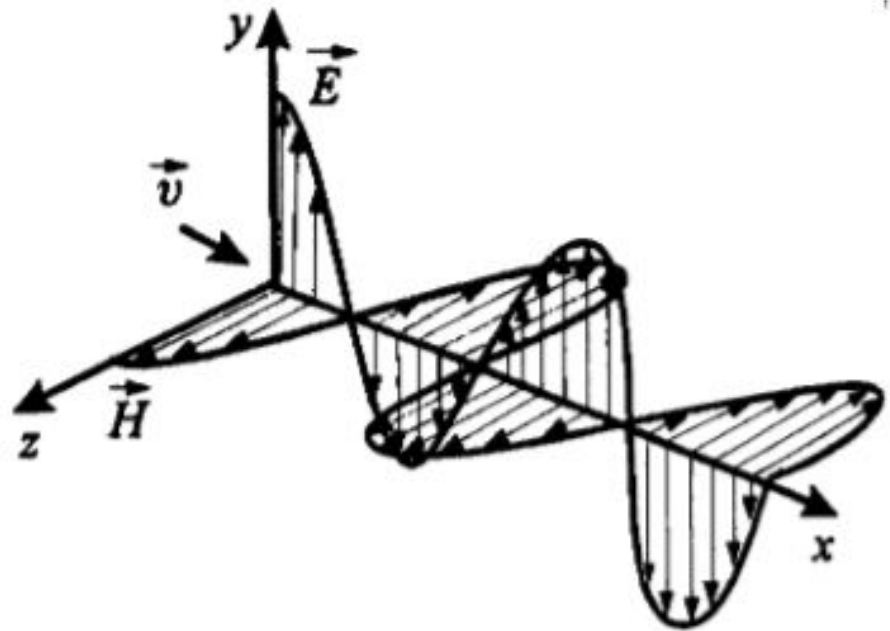
	Видимое излучение
Длина волны(м)	$6,7 \cdot 10^{-7} - 3,8 \cdot 10^{-7}$
Частота(Гц)	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
Энергия(ЭВ)	1,65 – 3,3 ЭВ
Источник	Солнце, лампа накаливания, огонь
Приемник	Глаз, фотопластинка, фотоэлементы, термоэлементы
История открытия	Меллони
Применение	Зрение Биологическая жизнь

	Рентгеновское излучение
Длина волны (м)	$10^{-9} - 3 \cdot 10^{-12}$
Частота(Гц)	$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$
Энергия(ЭВ)	$247,5 - 1,24 \cdot 10^5$ ЭВ
Источник	Электронная рентгеновская трубка (напряжение на аноде – до 100 кВ. давление в баллоне – $10^{-3} - 10^{-5}$ н/м ² , катод – накаливаемая нить . Материал анодов W,Mo, Cu, Вi, Со, Тl и др. Н = 1-3%, излучение – кванты большой энергии) Солнечная корона
Приемник	Фотопленка, Свечение некоторых кристаллов
История открытия	В. Рентген , Милликен
Применение	Диагностика и лечение заболеваний (в медицине), Дефектоскопия (контроль внутренних структур, сварных швов)

	<i>Гамма - излучение</i>
Длина волны(м)	$3,8 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$
Частота(Гц)	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
Энергия(ЭВ)	$9,03 \cdot 10^3 - 1,24 \cdot 10^{16}$ ЭВ
Источник	Радиоактивные атомные ядра, ядерные реакции, процессы превращения вещества в излучение
Приемник	счетчики
История открытия	
Применение	Дефектоскопия; Контроль технологических процессов; Терапия и диагностика в медицине

Электромагнитная волна

- это переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью.



Свойства электромагнитных волн

- электромагнитная волна – поперечная
- электромагнитные волны распространяются в вакууме с конечной скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с
- в электромагнитной волне векторы E и H пропорциональны друг другу

$$\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H$$

Электромагнитная волна

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}$$

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

E_0 и H_0 – амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей волны,
 ω – циклическая частота волны,
 $k = \omega/v$ – волновое число,
 φ – начальная фаза колебаний.

Энергия электромагнитной волны

Объемная плотность энергии электромагнитной волны складывается из объемных плотностей энергий электрического и магнитного полей

$$w = w_e + w_m = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H$$

$$w = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu} EH$$

Плотность потока энергии

$$S = wv = EH$$

Вектор Умова-Пойтинга

– вектор плотности потока энергии электромагнитной волны

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$$

Вектор \vec{S} плотности потока энергии электромагнитной волны направлен в сторону распространения ЭМВ, а его модуль равен энергии, переносимой ЭМВ за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Скалярная величина I , модуль среднего значения вектора Умова – Пойтинга, называется **интенсивностью волны**

$$I = \left| \langle \vec{S} \rangle \right|$$