

Зачем быть конденсатору в магнитном поле?

А. СТАСЕНКО

ТАК УЖ повелось издавна, что в конденсаторе, этом хранителе зарядов, существует электрическое поле, а в катушке с током – магнитное. Но повесить конденсатор в магнитном поле – такое могло прийти в голову только очень Любопытному ребенку. И не зря – он узнал нечто новое.

А дело было так. Смастерил Любопытный ребенок конденсатор из двух длинных коаксиальных цилиндров с мало отличающимися радиусами a и b , так что их разность, т.е. ширина зазора $b - a = l$, много меньше любого из этих радиусов ($l \ll a < b$), да и повесил его вертикально в вертикальном же магнитном поле \vec{B}_y , причем так, что конденсатор мог вращаться вокруг своей оси совсем без трения (см. рисунок).

На внутренний цилиндр он поместил положительный заряд $+q_0$, на внешний – отрицательный $-q_0$. В результате между обкладками конденсатора возникло радиальное электрическое поле E_r . Да вот беда: конденсатор оказался заполненным веществом, обладающим электропроводностью, так что началась утечка заряда и возник радиальный электрический ток. Но на каждый за-

ряд e_0 , движущийся поперек линий магнитного поля, действует, как известно, сила Лоренца, перпендикулярная обоим векторам – скорости заряда \vec{v}_r и индукции магнитного поля \vec{B}_y , а значит, направленная по касательной к окружности, и равная

$$F_\phi = e_0 v_r B_y$$

(индексы у букв как раз и подчеркивают взаимную перпендикулярность этих трех векторов).

Если концентрация движущихся зарядов n , то на единицу объема будет действовать сила, ее можно назвать *объемной плотностью силы*,

$$f_\phi = nF_\phi = ne_0 v_r B_y.$$

Поскольку эта сила направлена по касательной, то весь конденсатор начнет вращаться. Цилиндрический слой вещества между обкладками конденсатора и связанные с ним обкладки будут ускоряться в своем вращательном движении под действием суммарной силы, действующей на весь объем $2\pi a l h$ и равной

$$f_\phi \cdot 2\pi a l h = ne_0 v_r B_y \cdot 2\pi a l h$$

(тут-то Любопытному ребенку и пригодились предположение о тонкости зазора между обкладками конденсатора – а то пришлось бы интегрировать по объему).

Итак, уравнение второго закона Ньютона, описывающего ускоренное вращательное движение конденсатора (пусть его масса m) можно записать в виде

$$m \frac{dv_\phi}{dt} = (ne_0 v_r)(2\pi a h) \cdot l B_y.$$

Выражение в первой скобке – это плотность тока $j_r = ne_0 v_r$, а во второй – площадь обкладок $S = 2\pi a h$ (она почти одинакова для обеих обкладок, опять же в силу малости зазора между ними). Но если плотность тока умножить на поперечную площадь, получится пол-

ный ток $I = j_r S$. Таким образом,

$$d(v_\phi m) = l B_y (I dt).$$

Снова не напрасно появились скобки. В скобках справа заключено изменение положительного заряда на внутренней обкладке:

$$dq = -I dt$$

(знак «минус» указывает на тот факт, что положительный радиальный ток уменьшает положительный заряд). Получилось, что приращение импульса конденсатора во вращательном движении $d(mv_\phi)$ пропорционально убыли заряда конденсатора. Значит, когда конденсатор полностью разрядится, его «вращательный» импульс достигнет максимально возможной величины

$$mv_\phi = l B_y q_0.$$

Образованный физик предпочел бы (в случае вращательного движения) говорить не об импульсе (поскольку центр масс конденсатора остается в покое), а о *моменте импульса*. Он умножил бы силу и импульс силы на плечо a (расстояние до оси вращения) и получил бы совсем грамотное уравнение

$$mv_\phi a = a l B_y q_0$$

для момента импульса конденсатора. Но дело не в этой тонкости (тем более, что Любопытному ребенку многое простительно). Возникает вопрос: откуда взялся вращательный импульс (или момент импульса) у конденсатора, который первоначально покоился? Ведь, согласно фундаментальным законам физики, эти величины не могут уничтожаться или возникать из ничего. Вывод один: они раньше принадлежали электромагнитному полю. В начальный момент конденсатор покоился, но существовали поля E_r и B_y . По мере разрядки конденсатора уменьшалось электрическое поле, и момент импульса электромагнитного поля постепенно переходил к ускоряющемуся (во вращательном движении) конденсатору. Наконец, электрическое поле исчезло совсем, и вместе с этим перестало существовать электромагнитное поле (осталось только магнитное), а конденсатор приобрел наибольшую угловую скорость.

Оказывается, – сказал себе Любопытный ребенок, – *электромагнитное поле обладает атрибутами механики: плотностью импульса и момента импульса!*

