

Една бележка върху определението на електрична потенциална енергия¹

Съгласно с определението, дадено например в учебника по физика за 10. клас²:
“потенциална енергия W на един заряд в електростатично поле се нарича скаларната величина, чието изменение при преместване на заряда от една точка на полето до друга е равно на работата A' на електростатичните сили, взета с обратен знак...”.

Тъй като това е дефиниция, не може да става дума дали е вярна или не, но в този вид тя малко помага за пресмятане на енергията, ако не бъде съпроводена с допълнителното изискване – преместването на заряда да става *безкрайно бавно*. На равнището, на което се излага физиката в горния курс, това допълнение не е задължително. Целта на настоящата бележка е да насочи вниманието на учителя към него, защото в своята работа (особено при решаване на задачи) той може да се натъкне на въпроси, чийто отговор е свързан именно с това допълнително изискване (условие).

Усложнението идва от това, че във физиката под *енергия на една система се разбира функцията на състоянието на системата, чието изменение при промяна на състоянието е равна на работата на външните сили*. (Обърнете внимание – тази работа се взема със знак **плюс**!)

В електростатиката разглеждаме системи от **неподвижни** заряди. Съгласно с една обща теорема (теоремата на Ирншоу), система, в която действат само електростатични сили, не може да се намира в стабилно равновесие. Следователно, когато разглеждаме системи от неподвижни заряди, трябва да отчитаме, че освен електростатичните (*вътрешни*) сили, върху тях действат и някакви *външни* сили, които осигуряват стабилността на системата. Системата ще бъде статична тогава и само тогава, когато общата външна сила, действаща върху всеки заряд, е точно равна по големина и противоположна по посока на общата електрична сила, действаща върху същия заряд. (В обикновените лабораторни постановки, в които зарядите се разполагат върху наелектризирани леки топчета, изолирани проводници и др.п., ролята на външни сили играят тежестта на топчетата, опъването на нишките, на които са окачени, силите на еластичност, породени от незабележимите деформации на изолаторите, които държат проводниците и т.н.)

Когато променяме състоянието на системата, т.е. – когато разместваме зарядите, за да бъде тя във всеки момент **статична** система, за която са приложими законите на електростатиката, трябва да се погрижим тази промяна да става безкрайно бавно. А това означава, че във всяко моментно положение на всеки заряд, действащите му външни и вътрешни сили трябва да се уравновесяват. При това условие, работата на *външните* сили, която по дефиниция определя промяната на енергията, ще бъде *равна по големина и с обратен знак* в сравнение с работата на *вътрешните* (електричните) сили. Само в този случай на безкрайно бавни премествания общата дефиниция за енергия съвпада с дефиницията от училищните учебници. (Всъщност, не случайно в училище говорим за *преместване*, а не за *движение* на зарядите. Движението е винаги във времето, то се извършва за някакъв краен интервал време, характеризира се със скорост и т.н. За разлика от него, по подразбиране преместването е **извън времето** – то може да се извърши и безкрайно бавно.)

Когато външните и вътрешните сили не се уравновесяват, системата не може да бъде статична. Тъй като зарядите винаги се носят от някакви частици, които имат ненулева маса (едно от седемте фундаментални свойства на електричния заряд!), резултантната на двете сили придава на заредената частица (или тяло) ускорение и тя

¹ Физика, 1980, 6, с. 14–16.

² Златев Ив. и др. *Физика – учебник за десети клас на общообразователните трудово-политехнически училища*, ДИ “Народна просвета”, С., 1977.

придобива крайна скорост. Това веднага усложнява баланса на енергиите в системата, тъй като в този случай трябва да се отчитат и кинетичните енергии на телата, и излъчената електромагнитна енергия (ускорено движещите се заряди излъчват!).

Нека разгледаме сега един популярен конкретен случай, в който, ако не се отчита допълнителното условие за безкрайно бавно преместване на зарядите, може да се стигне до привидно парадоксални ситуации. В много сборници със задачи по физика фигурира следната задача (или нейни варианти):

Дадени са два кондензатора с равни капацитети C . В началото единият има заряд Q , а другият е незареден, след което кондензаторите се свързват успоредно. Сравнете енергията на системата в началното и в крайното състояние.

С помощта на формулата за енергия на кондензатор за енергията на началното състояние имаме израза $W_1 = \frac{Q^2}{2C}$. Тъй като след свързването всеки от кондензаторите носи заряд $Q/2$, енергията на крайното състояние е:

$$W_2 = \frac{(Q/2)^2}{2C} + \frac{(Q/2)^2}{2C} = \frac{Q^2}{4C} = \frac{1}{2}W_1,$$

т.е. точно половината от началната енергия. По отношение намирането на енергиите задачата е повече от елементарна, но проблемите възникват, ако се постави логично следващият от резултата въпрос: къде се губи половината от началната енергия? Нали тя може само се преобразува от един вид в друг вид? В много от сборниците, в които се поставя задачата, се разглежда и този въпрос. В повечето случаи се казва, че липсващата енергия е свързана с отделянето на джаулева топлина в проводниците, които свързват двата кондензатора и по които става прехвърлянето на зарядите³. Това обяснение може в голямата си част да бъде вярно, но не може да бъде абсолютно вярно, защото не отчита други съществени фактори. Така например токът, който зарежда втория кондензатор не е постоянен – на практика се осъществява някакъв повече или по-малко бърз процес (зависи от капацитета C и от индуктивността на свързващите проводници), при който токът в началото е голям и постепенно намалява, докато спре напълно. Протичането на променлив ток обаче непременно е свързано с излъчване на електромагнитна енергия, така че при това излъчване част от липсващата енергия със сигурност е отнесена в околното пространство. Вярно, тази част може да е нищожна в сравнение с отделеното количество топлина, но какво е точното съотношение между тях е вече сложен въпрос, отговорът на които зависи от конкретната геометрия на постановката, от свойствата на съединителните проводници и т.н., като във всички случаи излиза извън рамките на електростатиката. (Човек би могъл да си мисли и обратната ситуация, при която голямата част от “изгубената” енергия се излъчва – ако съединителните проводници са свръхпроводящи, джаулева топлина може и да няма, или да бъде твърде малка.)

По същество обаче задачата е чисто електростатична и поставеният въпрос трябва да има отговор именно в рамките на електростатиката. Абстрактно погледнато, въпросът може да се постави по следния начин: какво става с половината от началната енергия, ако при прехода от началното към крайното състояние няма нито превръщане на електрична енергия във вътрешна енергия на проводниците, нито излъчване. Такъв преход би могъл (на теория!) да се осъществи, ако успеем да пренесем половината от електроните от единия кондензатор върху другия един по един, безкрайно бавно и без помощта на проводници. За да отговорим на така поставения въпрос, необходимо е да отчетем наличието на външни сили, защото подобно безкрайно бавно преместване

³ Буховцев и др. *Сборник задач по элементарной физике*, М., Наука, 1974;

Ащеулов и Барышев *Сборник задач по элементарной физике*, Л., Изд. Ленингр. У-та, 1974.

може да стане само ако във всеки момент върху всеки заряд действа и външна сила, която уравновесява електростатичната сила. Така например при пренасяне на първия електрон от отрицателния електрод на заредения кондензатор, на него останалите заряди ще действат с електрична сила на отблъскване, която е по посока на преместването и извършва положителна работа. Следователно уравновесяващата външна сила, която трябва да действа на електрона, ще извършва отрицателна работа, а това означава, че ще се увеличава енергията на източника, който осигурява наличието на външната сила. При това (което е и най-важно), без всякакви пресмятания, само въз основа на закона за запазване на енергията може да твърдим, че точно половината от началната енергия на полето се е превърнала в енергия на източника.

И така, отговорът на поставения въпрос е следният: при преразпределение на зарядите между двата кондензатора, половината от началната енергия на полето се преобразува в енергия на източника, който поддържа полето *статично*. Ако преразпределението на зарядите става без посредничеството на такъв източник на външни сили, протичат токове с крайна големина, процесът не е статичен и с методите на електростатиката не може да се пресметне каква част от “изгубената” енергия се разходва за отделяне на количество топлина, каква част се излъчва и т.н.