

Напрежение и потенциална разлика¹

Същността на разглеждания проблем става ясна от анализа на отговорите на два прости въпроса:

1. Какво измерват волтметрите? – Най-често срещаният и по същество верен отговор е “Напрежение”.
2. Какво е напрежение? – Един често срещан в учебниците (не само наши!) отговор е “Разлика от потенциали”.

От комбинацията на двата отговора следва твърдението “Волтметрите измерват потенциални разлики.” То, както и отговорът на втория въпрос, обаче не са общовалидни. Те са безусловно верни за статични и стационарни електрични полета, т.е., когато характеристиките на полето не се променят с времето. С волтметри обаче измерваме и променливи напрежения, а променливите електрични полета са вихрови, скаларният потенциал не е достатъчен за тяхното характеризиране. Тогава какво всъщност мерим с волтметрите в тези случаи – потенциални разлики, или нещо друго? Какво имаме предвид, когато в 9. клас говорим за променливо напрежение – зависица от времето потенциална разлика или друга величина?

Фактът, че обикновено не се задава въпрос за смисъла на напрежението при вихрови полета не означава, че не трябва да сме готови с отговора, още повече, че съществува проста опитна постановка (вж. по-долу), с която се получават привидно парадоксални резултати (19). С нея се демонстрира например, че показанието на волтметъра може да зависи не само от точките, с които са свързани изводите му, но и от неговото положение. Такъв ефект нашите ученици не могат да обяснят, защото те учат, че напрежението е потенциална разлика, а тя зависи само от точките и от нищо друго.

Предмет на разглеждане по-долу са причините за трудностите при тълкуване смисъла на величината напрежение, а целта – да се посочи път за избягването им.

Що е напрежение?

Да проследим отговора на този въпрос в някои учебници за начални и за системни курсове по физика, както и в някои университетски учебници и публикации.

В началните (пропедевтични) курсове по физика се използва само един подход за въвеждане на напрежението – чрез работата при пренасяне на единица електричен заряд ((7, с. 216), (15), (24, с. 134)). (Съзнателно не уточняваме важни детайли: за работата на кои сили става дума и зависи ли тази работа от формата на траекторията, защото точно тук са различията между различните източници.) Типичен представител на подобни дефиниции е например тази от нашия учебник (15, с. 23):

“Напрежението между две точки на електричното поле е равно на работата, извършена от електричните сили при пренасяне на единица заряд от едната точка до другата.”

По същество този подход е една конкретна реализация на енергетичния подход към физичните проблеми. Той се използва и в някои от системните курсове (вж. напр. (23, с. 148), (8, с. 75), (5, с. 120), (16, с. 307), (17, с. 30)). Тук вече, след въвеждане на напрежението, като следствие се показва, че в статичния случай то е равно на разликата от потенциалите на началната и на крайната точка на преместването. (Интересно е, че във второто издание на (8), т.е. в (9), под натиска на общественото мнение, изразено многократно при обсъжданията на учебника, такъв подход бе изоставен – както ще видим по-долу, този факт може да се оцени като грешка.)

¹ Физика, 1993, 2, с. 22–28.

Далеч по-разпространен в системните курсове е вторият подход, при който в електростатиката първо се дефинира величината потенциал, показва се, че работата при пренасяне на заряд между две точки е пропорционална на потенциалната разлика и, накрая, тази потенциална разлика се нарича напрежение. Този подход откриваме в нашите учебници от последните години ((1, с. 185), (3, с. 130), (9, с. 75), (10, с.21), а така също и в редица чужди ((2, с. 131), (12, с. 188), (20, с. 207)).

Същите два подхода се срещат и в университетските учебници. Дефиниция на напрежението като потенциална разлика се среща например в (11, с. 242) и (13, с. 215). Дефиницията на напрежението чрез работа се използва в курсовете по електротехника (където величината напрежение е основна) – вж. напр. (4, с. 56) и (14, с. 19), а така също и в университетския курс (6, с. 74). И тук обаче съществуват различия. Едни автори определят напрежението като циркулация на електричното поле по определена крива, свързваща началната и крайната точка ((4), (14), (21), (26)). По общо е определението, използвано в (6), (25) и др., в което участва не само циркулацията на електричното поле, но и на страничните сили. Това означава, че в първия случай напрежението е числено равно на работата само на електричните сили при пренасяне на заряд +1 С по разглежданата крива, а във втория – на общата работа на електричните и на електродвижещите сили при този процес.

Тук, в качеството на пример, ще приведем само определението от (6):

*“Величината, числено равна на общата работа, извършена от електростатичните и външните сили при пренасяне на единица положителен заряд, се нарича **напрежение** върху даден проводник.”*

Същественото в двата подслучая е, че се допуска зависимост на определяемата величина – напрежението – от вида на кривата, свързваща двете точки, което означава, че то е не билокална, а глобална характеристика на полето.

Разликата между първия и втория подход за въвеждане на величината напрежение е следната. Когато напрежението се дефинира чрез работа (първи подход), в случая на статични и стационарни полета като следствие се получава, че то е равно на потенциалната разлика. Когато напрежението се дефинира като потенциална разлика (втория подход), като следствие от същите случаи се получава, че работата е пропорционална на напрежението.;

Ясно е, че първият подход е по-общ, той може да се прилага и за променливи полета, когато напрежението зависи не само от началната и от крайната точка, но и от формата на траекторията, по която се пренася зарядът.

Дефиницията на напрежението като потенциална разлика (вторият подход), макар и коректна от логична гледна точка, при променливи полета е безполезна, защото, както ще видим по-долу, не това е величината, която измерват волтметрите. (Тук е необходимо следното уточнение. В общия случай на променливи полета, за които са характерни вълновите явления, и в присъствието на произволни среди, потенциали или не могат да се въведат, или като правило не се въвеждат – полето се описва със силовите си характеристики \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} и \vec{B} и величината напрежение, която има значение предимно за приложенията (напр. в електротехниката и електрониката), въобще не се използва. Потенциали и напрежения се използват при квазистационарните явления – на практика те са предмет на електро- и радиотехниката и в училище се изучават в разделите за променлив ток и електромагнитни трептения.)

И така, за нашите гимназиални учебници термините *напрежение* и *потенциална разлика* са синоними. Понякога се създава впечатление, че те имат различни области на приложение – *потенциална разлика* се разглежда като физичен термин, а *напрежение* – като термин, който се използва повече в техническите приложения на физиката, напр. в електротехниката. Основен недостатък на този подход е неприложимостта му при

променливи токове, поради което всяко споменаване там на термина *променливо напрежение* остава необосновано. Освен това при него се губи единството, приемствеността с използвания в началния курс подход.

Какво мери волтметърът?

Вече е ясно, че отговорът “напрежение” е неудовлетворителен – той не уточнява какво се има предвид: напрежение като потенциална работа, или напрежение като работа при пренасяне на единица заряд. В някои случаи се твърди, че волтметрите измерват потенциална разлика ((20, с. 208), (12, с. 205), като в последния източник това твърдение на с. 188 се прилага и за променливи полета?)

Волтметърът е уред, чието показание U (това, което отчитаме като *напрежение*) е пропорционално на тока I' през него, колкото и малък да е той. Ако разгледаме уреда като двуполусник с омово съпротивление R' и ЕДН \mathcal{E}' , въпросният ток се определя от обобщения закон на Ом (11, с. 293):

$$(1) \quad U = R' I' = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}' - \frac{d\Phi}{dt},$$

където φ_1 и φ_2 са потенциалите на началната и крайната точка, напрежението между които измерваме, а магнитният поток Φ се определя с израза:

$$(2) \quad \Phi(t) = \int_L \vec{A}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{r},$$

т.е. той е криволинеен интеграл от векторния потенциал \vec{A} по контура L , образуван от съединителните проводници и уреда.

Смисълът на членовете в дясната страна на (1) е ясен: $\varphi_1 - \varphi_2$ е потенциалната разлика, определена от моментното разпределение на некомпенсираните заряди и е числено равна на работата на консервативната част на променливото електрично поле при пренасяне на заряд $+1$ С между началната и крайната клемма на уреда. Според (11, с. 287), скаларният потенциал на квазистационарното поле се определя от уравнението:

$$(3) \quad \operatorname{div}[\varepsilon(\vec{r}) \operatorname{grad} \varphi(\vec{r}, t)] = k(\vec{r}, t),$$

където $k(\vec{r}, t)$ е обемната плътност на некомпенсираните заряди, а $\varepsilon(\vec{r})$ – електричната проницаемост на средата.

Вторият член в дясната страна на (1) е числено равен на работата на наличните в съединителните проводници и във волтметъра ЕДС, при пренасяне на заряд $+1$ С по контура L . В повечето случаи този член е нула.

Третият член в дясната страна на (1) представлява напрежението, **индуцирано** в интеграционния контур от променливото магнитно поле, т.е. и той представлява *работа* – работата на индуцираните ЕДС. Обикновено интегралът (2) се пресмята не по кривата, определена от съединителните проводници и уреда, а по друга, подходящо избрана крива със същите начало и край, при условие, че заграденият от двете криви магнитен поток не се променя с времето. (Вж. по-долу.)

По този начин се убеждаваме, че наистина показанието U на уреда се определя от работата на **всички** сили, действащи на заряд $+1$ С при пренасянето му от началната до крайната точка по контура през уреда, т.е. показанието е в съответствие с определението за напрежение, дадено например в (6) и (25). В случаите, когато в този контур няма ЕДС, показанията се определят само от работата на електричната сила, като тази работа се състои от консервативна, т.е. независеща от траекторията част $\varphi_1 -$

φ_2 и от неконсервативна част $\frac{d\Phi}{dt}$, дължаща се на индуцираните ЕДС. В тези случаи

показанието на волтметъра съответства на по-тясното определение за напрежение, съдържащо се например в (4), (14), (26).

От (1) се вижда, че е възможно двата подхода за дефиниране на напрежение дори при променливи полета да доведат до еднакъв резултат – в случаите на резистори и кондензатори напрежението е равно на потенциалната разлика, както при статични и при стационарни полета. Ако обаче веригата съдържа индуктивности, не е все едно дали напрежение ще наречем потенциалната разлика, или работата при пренасяне на заряд $+1$ С.

Приведените дотук съображения използват аргументи, неприложими в училище. Въпросът за това, от какво зависи токът през волтметъра (новата редакция на въпроса какво мери уреда), може да се изясни и на равнище на провежданите в училище разглеждания. За целта, както в (25), веригата от съединителните проводници и уреда се разглежда като една дисипативна система: колкото енергия се придаде на свободните заряди при преминаването им през нея, толкова се повишава вътрешната ѝ енергия благодарение на отделената джаулева топлина. А придадената на свободните заряди енергия е равна на работата на всички действащи им сили. Ако тази работа е нула, ток няма. В случаите на не много големи токове може да се предположи права пропорционалност между работата W за пренасяне на единица заряд и пренесения през системата за това време заряд, т.е. големината на тока I' . Така получаваме равенството $R'I' = W$, където коефициентът на пропорционалност R' се нарича омово съпротивление на системата. (Това предположение, както и обосновката на факта, че R' е същата величина, която участва и в закона на Ом, представляват отделни, по-лесно решими проблеми.)

Работата W при пренасяне на единица заряд през системата е сума от работата $\varphi_1 - \varphi_2$ на кулоновите сили и работата \mathcal{E}' на всички некулонови сили. Към последните се причисляват индуцираните ЕДС, ЕДС с химичен произход, термо-ЕДС и т.н. Така получаваме *обобщения закон на Ом*:

$$U = R' I' = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}'$$

и по такъв начин отново достигаем до извода, че показанието на уреда (което е пропорционално на $R'I'$), т.е. – напрежението, се определя от работата на всички действащи върху свободните заряди сили.

Накрая ще отбележим и едно неудобство, произтичащо от определението на напрежението чрез работата на *всички* сили – и електрични, и електродвижещи. То се изразява в зависимостта на напрежението от кривата, по която става пренасянето на зарядите дори в статичния и в стационарния случай, т.е. когато електричното поле е консервативно. Тази зависимост може да се илюстрира със следния прост пример.

Да разгледаме един химичен източник на ЕДН (акумулатор), чиято верига е отворена. Очевидно е, че потенциална разлика между полюсите му съществува и тя е равна на ЕДН на източника, т.е. на \mathcal{E} . Ако си представим, че заряд $+1$ С се пренася по въздуха от положителния до отрицателния полюс, единствените сили, които му действат, са електричните и тяхната работа, т.е. напрежението е точно равно на \mathcal{E} . Ако обаче траекторията на заряда минава през вътрешността на източника, където електричните и електродвижещите сили се уравниават (веригата е отворена, ток не тече!), общата работа и напрежението по тази траектория се оказват нула. Обратно, ако източникът е свързан накъсо, потенциална разлика между полюсите му няма, не действат и електрични сили. В този случай напрежението, мерено по външната траектория, е нула, а по вътрешната е – \mathcal{E} (ако пренасяме заряда от положителния към отрицателния електрод).

Посоченото неудобство се избягва, ако се използва по-тясното определение за напрежение чрез работата само на електричните сили ((4), (14), (21), (26) и др.) В този случай при консервативно електрично поле напрежението остава билокална величина,

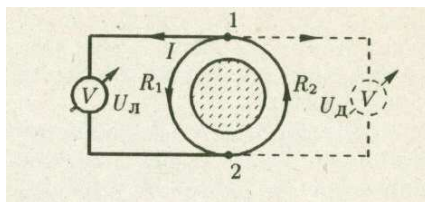
т.е. не зависи от вида на траекторията, а в същото време се обхващат и случаите на вихрови полета.

Пример

Да илюстрираме гореизложеното с един често срещан пример ((25), (26), (19), (22), (12) и др.).

Нека токът по дълга намотка нараства равномерно с времето. По закона на Фарадей в пространството се създава **постоянно** вихрово електрично поле. Ако около намотката се постави проводящ пръстен, в него се индуцира постоянно ЕДН с големина $\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}$. На фиг. 1 са изобразени напречното сечение на намотката и пръстенът, а

площта, която се пробожда от променливия магнитен поток, е заштрихована. За конкретност посоката на ЕДН е избрана обратна на движението на часовниковите стрелки. Търсим напрежението U между т. 1 и т. 2, които лежат върху един диаметър на пръстена, ако омовите съпротивления на лявата и на дясната част на пръстена са съответно R_1 и R_2 .



Фиг. 1.

За да отговорим на въпроса, първо намираме разликата в потенциалите на т. 1 и т. 2. За целта записваме закона (1) за лявата и за дясната половина на пръстена, като отчитаме, че в единия случай начална е т. 1, а в другия – т.2, и, че индуцираното напрежение \mathcal{E} се разпределя поравно между двете части:

$$(3) \quad R_1 I = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{1}{2} \mathcal{E}$$

$$R_2 I = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{1}{2} \mathcal{E},$$

където I е токът през пръстена, а φ_1 и φ_2 – потенциалите съответно на т. 1 и на т. 2. От (3) намираме:

$$(4) \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \frac{\mathcal{E}}{2}.$$

След като сме намерили потенциалната разлика, можем да се върнем към въпроса за напрежението. Да си представим, че волтметърът, с който го измерваме, е поставен **отляво** на намотката. Тъй като във веригата на уреда няма ЕДС, равенство (1), което определя “лявото напрежение” $U_{\text{л}}$, приема вида:

$$(5) \quad U_{\text{л}} = R' I_{\text{л}} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{\text{л}},$$

където R' е съпротивлението на уреда и съединителните проводници, а $\mathcal{E}_{\text{л}}$ – индуцираното в съединителните проводници и в уреда напрежение. И сега следва най-съществената част от разсъжденията, която често не се изяснява достатъчно добре: **поради това, че през повърхността, заградена от съединителните проводници, уреда и лявата половина на пръстена няма променлив магнитен поток, $\mathcal{E}_{\text{л}}$ е равно на индуцираното в лявата половина на пръстена напрежение $\mathcal{E}/2$.** Наистина, ако си представим затворен контур с две части: съединителните проводници и уреда от една страна, и лявата половина на пръстена – от друга, общото индуцирано в него ЕДН е

нула, защото този контур не обхваща променлив магнитен поток. А това всъщност означава, че индуцираното в първата част ЕДН (\mathcal{E}_1) е равно по големина на индуцираното във втората част ($\mathcal{E}/2$).

По такъв начин равенство (3) води до уравнението:

$$(6) \quad U_{\text{л}} = R' I_{\text{л}} = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{\mathcal{E}}{2}.$$

Ако обаче волтметърът е поставен **отдясно** на намотката (положението, показано с щрихи на фиг. 1), същото равенство (1) води до следното уравнение за “дясното напрежение” $U_{\text{д}}$:

$$(7) \quad U_{\text{д}} = \varphi_1 - \varphi_2 - \frac{\mathcal{E}}{2},$$

защото посоката на обхождане на контура през уреда (от т. 1 към т. 2) сега е противоположна на посоката на ЕДН.

От (6), (7) и (4) получаваме:

$$(8) \quad U_{\text{л}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mathcal{E} \quad \text{и} \quad U_{\text{д}} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \mathcal{E}.$$

Това е споменатият в началото парадоксален резултат: напрежението между две точки зависи от положението на уреда. Напреженията $U_{\text{л}}$ и $U_{\text{д}}$ се различават не само по големина, но и по знак. Едва ли съществува друг пример, който по-ясно от този демонстрира различието между потенциална разлика и напрежение.

Заклучение

Величините потенциална разлика и напрежение са еквивалентни само в статичния и в стационарния случай. При променливи полета те се различават съществено: разликата в потенциалите на две точки не определя работата A на електричните сили при пренасяне на заряд от едната до другата, защото тази работа вече зависи от формата на траекторията (полето не е консервативно). За напрежение обаче се говори и в този случай, защото за **произволно поле електричната сила е пропорционална на заряда** и следователно отношението A/q не зависи от заряда. То остава характеристика на полето, но от билокална се превръща в глобална характеристика, т.е. във величина, която зависи не от две точки (както потенциалната разлика), а от формата на цяла крива, която ги свързва (кривата, по която се пренася зарядът).

В пропедевтичните курсове у нас напрежението се въвежда чрез работата, а в системните – като потенциална разлика. Последното определение не подлежи на обобщение за случаите на променливи токове, тъй като в този случай потенциалната разлика не е право пропорционална на работата на електричните сили, а волтметрите мерят величина, пропорционална на тази работа. Освен това в този случай няма приемственост между пропедевтичния и системния курс.

И така, причина за появата на трудности при тълкуване смисъла на величината напрежение е дефинирането ѝ като потенциална разлика. Ясно е, че в общия случай съотношението *напрежение – потенциална разлика* не може да се обсъжда нито в пропедевтичния курс (където потенциал изобщо не се въвежда), нито във варианта на системния курс, предназначен за хуманитарните профили. Това съотношение може да се коментира във физическите паралелки и при изучаване на електромагнитните явления на второ, по-високо равнище. За да се продължи обаче логиката на пропедевтичния курс, подходът в системния трябва да се промени в съответствие с факта, че напрежение е по-общо понятие от понятието потенциална разлика и затова

трябва да се въведе първо то (като работа на електричните сили) и едва след това в статичния и в стационарния случай да се свързва с потенциалната разлика.

Преимущества, които предлага една такава смяна, са следните:

1. Използва се общовалидно определение за напрежение, което има ясен физичен смисъл и в случая на квазистационарни полета.
2. Величината напрежение се въвежда по един и същ начин в системния и в бъдещия пропедевтичен курс по физика, който ще се изучава в 7. и в 8. клас.
3. Осъществява се още едно конкретно приложение на енергетичния подход, който заема все по-широко място в съвременните курсове по физика за средните училища.

Литература

1. Борисов М. и др. *Физика за 10. клас на общообразователните трудово-политехнически училища*, С., Народна просвета, 1972.
2. Буховцев Б. Б., Ю. Л. Климонтович, Г. Я. Мякишев *Физика для 9 класса средней школы*, М., Просвещение, 1980.
3. Златев Ив. И др. *Физика за 10. клас на общообразователните трудово-политехнически училища*, С., Народна просвета, 1978.
4. Златев М. П. *Основи на електротехниката*, С., Техника, 1964.
5. Кикоин А. К. и др. *Физика для 9 класса средней школы*, М., Просвещение, 1979.
6. Лалов Ив. *Електромагнетизъм*, С., Софийски университет, 1986.
7. Перьшкін А. В., Н. А. Родина *Физика для 6–7 классов средней школы*, М., Просвещение, 1980.
8. Попов Хр. и др. *Физика за 9. клас на ЕСПУ*, С., Народна просвета, 1981.
9. Попов Хр. и др. *Физика за 9. клас на ЕСПУ*, С., Народна просвета, 1984.
10. Попов Хр. и др. *Физика за 9. клас на ЕСПУ*, С., Народна просвета, 1989.
11. Попов Хр. *Електродинамика*, С., Университетско издателство “Св. Климент Охридски”, 1995.
12. Суарц Кл. Э. *Необъикновенная физика необыкновенных явлений*, ч. 2, М., Наука, 1987.
13. Тошев Стр. и др. *Физика*, С., Наука и изкуство, 1987.
14. Фархи С., С. Папазов *Теоретична електротехника*, С., Техника, 1981.
15. Фурнаджиев Йорд. и др. *Физика за 7. клас на ЕСПУ*, С., Народна просвета, 1979.
16. Dorn–Bader *Physik*, Mittelstufeq Schroedel Verlag, Hannover, 1980.
17. Ehrenwirth *Physik*, Leistungkurs 1. semester, Munchen, 1982.
18. *Einführung in die Physik*, 2 Teilband, Diesterweg Salle, Munchen, 1974.
19. Klein W. *Experimental paradox in electrodynamics*, Am. J. Phys., 49, 1981.
20. Metzler *Physik fur den kursorientierten Unterricht in der gymnasialen Oberstufe*, Stuttgart, 1983.
21. Page C. H. *Electromotive forces, potential difference and voltage*, Am. J. Phys., 45, 1977.
22. Peters P. S. *The role of the induced emf's in simple circuits*, Am. J. Phys., 52, 1984.
23. *Physik Gross Berhag*, Klett Ferlag, Stuttgart, 1992.
24. Pople St. *Physics*, Oxford Univ. Press, 1991.
25. Reif F. *Generalized Ohm's law, potential difference and voltage measurements*, Am. J. Phys., 50, 1982.
26. Romer R. H. *What do “voltmeters” measure?*, Am. J. Phys., 50, 1982.