


DOI: 10.53078/20778481_2022_2_57

УДК 530:372.8

А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова, А. В. Хомченко

ВЫВОД ЗАКОНА ОМА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

A. I. Lyapin, E. V. Pivovarova, A. V. Khomchenko

DERIVATION OF OHM'S LAW IN INTEGRAL FORM FOR A NONUNIFORM SECTION OF DC CIRCUIT

Аннотация

Показано, что при наличии в цепи гальванического элемента следует учитывать различие в локализации полей «сторонней» и электрической сил. В источнике ЭДС «сторонняя сила» совершает работу по переносу заряда «против» силы созданного ею электрического поля. В ненагруженном источнике указанная работа, отнесенная к перенесенному заряду, определяет ЭДС. Выражения, полученные существующим методом, относятся к разным электрическим цепям. В то же время предложенный подход приводит к аналогичным формулам, описывающим два участка одной цепи. ЭДС определена как сумма напряжения между электродами источника и падения потенциала на его внутреннем сопротивлении.

Ключевые слова:

методика преподавания, неоднородный участок электрической цепи, гальванический элемент, закон Ома для неоднородной цепи, различие между ЭДС и разностью потенциалов.

Для цитирования:

Ляпин, А. И. Вывод закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи постоянного тока / А. И. Ляпин, Е. В. Пивоварова, А. В. Хомченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 57–66.

Abstract

It is shown that in the presence of a galvanic cell in the circuit, the difference in the localization of fields of «external» and electrical forces should be taken into account. In the EMF source, the «external force» performs the work of transferring the charge against the force of the electric field created by it. In an unloaded source, the specified work divided by the amount of charge transferred determines the EMF. The formulas obtained by the existing method refer to different electrical circuits. At the same time, the proposed approach leads to similar formulas describing two sections of the same chain. EMF is defined as the sum of the voltage between the source electrodes and the potential drop across its internal resistance.

Keywords:

teaching techniques, nonuniform section of electrical circuit, galvanic cell, Ohm's law for nonuniform circuit, EMF and potential difference.

For citation:

Lyapin, A. I. Derivation of Ohm's law in integral form for a nonuniform section of dc circuit / A. I. Lyapin, E. V. Pivovarova, A. V. Khomchenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 57–66.

Введение

В ходе изложения основ теории электричества используют закон Ома в дифференциальной или интегральной формах. В то же время при текущей аттестации студентов нередко обнаруживается непонимание различия между указанными законами. Например, вопрос, касающийся закона Ома в интегральной либо дифференциальной форме, у большинства обучающихся вызывает затруднение, но, когда предлагает-

ся записать любую известную формулу закона Ома, большинство приводит выражение

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

В методических пособиях, посвященных закону Ома, можно встретить упрощенные рисунки для однородного (рис. 1, а) и неоднородного (рис. 1, б) участков электрической цепи.



Рис. 1. Однородный (а) и неоднородный (б) участки электрической цепи

Однако используемое упрощение не облегчает понимания изучаемого материала. На приведенных рисунках имеется «логический разрыв», т. к. из них непонятно, чем создана разность потенциалов и почему имеется ток, если цепь разомкнута. Если для однородного участка не важна природа разности потенциалов, то на неоднородном участке разность потенциалов может быть создана как исследуемым, так и внешним источником. В лучшем случае обучающийся мысленно достроит эти рисунки до некоторой замкнутой цепи или, вероятнее всего, будет искать ответ в глобальной сети.

Авторы большинства учебников вначале рассматривают закон Ома для участка цепи, который не содержит источник ЭДС, не называя его при этом однородным, а произведение силы тока и сопротивления называют напряжением [1, 2]. Также во всех учебниках при рассмотрении закона Ома для неоднородного участка цепи напряжение на

участке определяется суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда. В некоторых учебных пособиях для вузов [1, 2] при рассмотрении законов Ома вообще не приводятся электрические схемы. Более того, в [1] не упоминается о законе Ома в интегральной форме, хотя формулу закона получают интегрированием.

Следует отметить разночтение терминов «разность потенциалов» и «напряжение». В литературе последних лет потенциал (разность потенциалов) определяется как работа по перемещению единичного заряда в электрическом поле (часто говорится об электростатическом поле). Большинство авторов отождествляют понятия разности потенциалов и электрического напряжения [3, 4].

В [5] разность потенциалов определяется как мера изменения электрической потенциальной энергии электрона, когда он движется между двумя точка-

ми цепи, при этом изложение материала ограничивается только разностью потенциалов и электродвижущей силой. Автор уточняет, что термин «напряжение» чаще применяется к электрическим цепям с током. Отметим в связи с этим, что разность потенциалов и напряжение количественно определяются работой по перемещению единичного электрического заряда и в обоих случаях имеет место движение заряда в электрическом поле, т. е. ток.

В Оксфордском словаре [6] напряжением (voltage) называют ЭДС и разность потенциалов, выраженные в вольтах. В [7] используется образное выражение «exertion» и отмечается, что в электрических цепях потенциал и разность потенциалов часто называют термином «voltage».

Подходы в определении ЭДС также разнятся. В Физической энциклопедии [8, с. 518] в статье «Электродвижущая сила» отмечено, что ЭДС как феноменологическая характеристика источника тока была введена Омом в 1827 г. для цепей постоянного тока. Через 30 лет (в 1857 г.) Кирхгоф определил ЭДС как работу «сторонних сил» при переносе единичного электрического заряда вдоль замкнутого контура. Автор [5] отмечает неудачность термина ЭДС, поскольку эта величина не является силой. ЭДС определяется изменением потенциальной энергии заряда при его движении по цепи. В [7] также отмечается неудачность термина, но ЭДС определяется как влияние (действие), которое движет заряд от низкого потенциала к высокому (несмотря на то, что электрическое поле действует в обратном направлении). Количественно же ЭДС – это разность потенциалов между электродами идеального источника независимо от тока через него. В [8] ЭДС – это наибольшая разность потенциалов, которую может генерировать источник электрического тока. На практике это может наблюдаться на нагруженном источнике. Автор рабо-

ты [6] определяет ЭДС через энергию, сообщаемую заряду, когда он проходит через источник.

Целью работы является попытка разработать дидактический материал, лишенный указанных неточностей.

Классический вывод закона Ома в интегральной форме для участка цепи

Попыткой математически определить различие между рассматриваемыми понятиями является вывод обобщенного закона Ома для неоднородного участка цепи [1, 2, 9]. Авторы работы [9] вначале рассматривают цепь с гальваническим элементом, замкнутым на внешнее сопротивление, и получают законы Ома для однородного и неоднородного участков. Затем обобщают понятие ЭДС для случая, когда она действует в любой точке цепи. Полагая, что в любой точке некоторой цепи на заряд действуют сила электростатического поля $\vec{f}_{эл} = e \cdot \vec{E}_{эл}$ и сторонняя сила $\vec{f}_{стор}$, записывают формулу для ускорения заряда

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \frac{\vec{f}_{эл} + \vec{f}_{стор}}{m} = \frac{e \cdot \vec{E}_{эл} + \vec{f}_{стор}}{m} = \\ &= \frac{e \cdot \left(\vec{E}_{эл} + \frac{\vec{f}_{стор}}{e} \right)}{m}, \end{aligned} \quad (1)$$

где e и m – заряд и масса частицы, участвующей в электрическом токе; $\vec{E}_{эл}$ – напряженность электростатического поля.

Введя обозначение напряженности поля сторонней силы $\vec{E}_{стор} = \vec{f}_{стор}/e$, формулу (1) можно представить в виде

$$\vec{a} = \frac{e \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор})}{m}. \quad (2)$$

Затем, повторяя рассуждения, приводимые при выводе закона Ома в дифференциальной форме, получают следующую формулу этого закона:

$$\vec{j} = \sigma \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (3)$$

где σ – удельная электропроводность, которая зависит и от массы частицы.

Умножением (3) на элемент Δl трубки тока и суммированием по всем элементам замкнутой трубки тока получают закон Ома для замкнутой цепи, в котором ЭДС определяется как циркуляция напряженности поля сторонней силы. В более поздних работах используются те же допущения и рассуждения, но суммирование заменяется интегрированием.

В [2] рассмотрен участок цепи, где действует ЭДС и к концам которого приложена разность потенциалов. Используя закон сохранения и превращения энергии, получают закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) \pm \varepsilon}{R}.$$

Замыкая концы рассматриваемого участка, получают закон для замкнутой цепи, а приравняв ЭДС нулю, – для однородного участка цепи. То есть, рассматривая один участок цепи, выводят два выражения для разных цепей.

Рассмотрим существующий вывод [1] обобщенного закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи постоянного тока. Авторы выбирают неоднородный участок электрической цепи, к концам которого приложена разность потенциалов. Закон Ома в дифференциальной форме (3) записывают в виде

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (4)$$

где ρ – удельное сопротивление рас-

сматриваемого участка.

Здесь следует уточнить, что рассуждения авторов были формально корректны до тех пор, пока не была выбрана конкретная цепь. А из описания не ясно, чем создано электрическое поле: это может быть поле «внешней» разности потенциалов (от внешнего источника) либо разности потенциалов между электродами источника. И в каждом рассматриваемом случае мы получим разный результат.

Выражение (4) определяет плотность тока в точке проводника, в которой известна напряженность полей. Чтобы получить выражение для рассматриваемого участка, сначала умножают скалярно обе части уравнения (4) на вектор $d\vec{l}$, численно равный бесконечно малому элементу dl длины проводника и совпадающий по направлению с вектором плотности тока:

$$\vec{j} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (5)$$

Так как плотность постоянного тока $j = I/S_{\perp}$ и скалярное произведение векторов \vec{j} и $d\vec{l}$ одного направления равно произведению их модулей, то формулу (5) записывают в виде

$$I \cdot \frac{dl}{S_{\perp}} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (6)$$

Затем выражение (6) интегрируют от сечения 1 до сечения 2 и получают формулу закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи:

$$I \cdot \int_1^2 \frac{\rho \cdot dl}{S_{\perp}} = \int_1^2 \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}. \quad (7)$$

Подынтегральное выражение в левой части формулы (7) определяет электрическое сопротивление элемента dl , а сам интеграл выражает электрическое

сопротивление цепи на рассматриваемом участке «1–2»:

$$\int_1^2 \frac{\rho \cdot dl}{S_{\perp}} = R_{1-2}. \quad (8)$$

При этом сопротивление R_{1-2} включает в себя как сопротивление R проводника (внешнее сопротивление), так и сопротивление r промежутка цепи между электродами источника тока (внутреннее сопротивление источника):

$$R_{1-2} = R + r. \quad (9)$$

Первое слагаемое в правой части (7) выражает работу сил электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 . Как известно, этой работой определяется разность потенциалов на рассматриваемом участке:

$$\int_1^2 \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (10)$$

Второе слагаемое в выражении (7) отличается от первого только индексом при \vec{E} , поэтому оно также определяет работу, но работу сторонней силы по перемещению единичного положительного заряда. Указанной работой определяется электродвижущая сила:

$$\int_1^2 \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l} = \varepsilon. \quad (11)$$

На основе выражения (11) дается определение ЭДС: электродвижущей силой на участке цепи называется физическая величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда на этом участке. С учетом введенных обозначений выражение (7) записывается в виде

$$I \cdot R_{1-2} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon. \quad (12)$$

При расчетах с помощью формулы (12) учитывается знак ЭДС: если направление переноса зарядов в источнике совпадает с направлением тока в цепи, то ЭДС считается положительной; если указанные направления не совпадают, то ЭДС считается отрицательной. Изложенное здесь означает, что разность потенциалов на рассматриваемом участке создается дополнительным источником.

Выражение (12) также определяют как математическую формулировку обобщенного закона Ома, т. к. она справедлива для однородного участка и неразветвленной замкнутой цепи с ЭДС.

Закон Ома для однородного участка получают из (12), полагая, что ЭДС и внутреннее сопротивление равны нулю:

$$I \cdot R = (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (13)$$

В данном случае непонятно, как выражение (13) связано с рассматриваемым участком.

Если замкнуть концы рассматриваемого участка цепи проводником (в формуле (12) разность потенциалов приравнивают нулю), то получают закон Ома для неразветвленной замкнутой цепи с источником ЭДС:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (14)$$

Из последнего выражения также следует, что указанная разность потенциалов не связана с рассматриваемым источником. Следовательно, приведенному выводу формулы (7) должна соответствовать схема с дополнительным источником (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что выражение (13) мы получим, замкнув электроды исследуемого источника, а для получения формулы (14) нужно замкнуть клеммы внешнего источника.

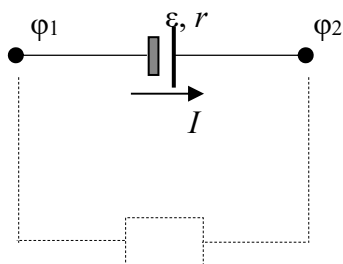


Рис. 2. Предполагаемая схема при выводе закона Ома для неоднородного участка цепи

Таким образом, формулы (13) и (14) соответствуют разным цепям, а не различным участкам одной цепи.

Авторы определяют напряжение $(I \cdot R_{1-2})$ суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль участка цепи. Это определение, формально вытекающее из (12), скорее усложняет понимание материала, чем передает различия между указанными тремя величинами.

Предполагалось, что рассмотренный закон Ома в интегральной форме позволяет математически строго обосновать существующие определения разности потенциалов, напряжения и ЭДС. Однако, как показывает анализ, приведенный вывод требует уточнений, а неоднозначность некоторых результатов связана, на наш взгляд, с формализмом в исходных предпосылках. Исходя из изложенного, следует признать, что затронутые вопросы требуют методической доработки.

Уточнение исходных допущений при выводе закона Ома для неоднородного участка цепи

В учебной литературе при обсуждении работы гальванического элемента часто встречается утверждение о том, что в источнике за счет «сторонней силы» происходит перенос электронов от электрода с меньшим потенциалом к электроду с большим потенциалом. Для выяснения справедливости этого утвер-

ждения рассмотрим принцип работы источника на примере гальванического элемента Даниеля.

Избыточные заряды на электродах элемента и создаваемые ими разности потенциалов между электродами и электролитом (электрохимические потенциалы) возникают в результате растворения цинкового электрода (ухода иона Zn^{++} в электролит) и осаждения иона Cu^{++} из электролита на медном электроде. Таким образом, цинковый электрод заряжается отрицательно, а медный – положительно. Разность потенциалов между электродами гальванического элемента практически равна разности названных электрохимических потенциалов. «Сторонней силой» в данном случае выступает сила межмолекулярного взаимодействия, которая приводит к растворению (осаждению) ионов материала электрода и появлению разности потенциалов между электродами.

При отсутствии электрической нагрузки в элементе устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся равенством скоростей осаждения и растворения ионов материалов электродов. Этому соответствует равенство напряженностей полей сторонней и электрической сил. Максимальная (равновесная) разность потенциалов между электродами элемента определяет его ЭДС.

При подключении нагрузки избыточные электроны с цинкового электрода по внешней цепи переходят на мед-

ный электрод, уменьшая межэлектродную разность потенциалов. Это приводит к нарушению указанного выше равновесия и дополнительным переходам ионов Zn^{++} в электролит и Cu^{++} на электрод. Таким образом, количество избыточных зарядов на электродах источника, создаваемая ими разность потенциалов и электронный ток во внешней цепи поддерживаются непрерывной работой «сторонней силы» по перемещению ионов в межэлектродном промежутке. То есть в случае гальванического элемента электронный ток во внешней цепи замыкается ионным током в источнике. При этом сторонняя сила перемещает заряды (ионы) против «электрической силы» созданной ею разности потенциалов.

Отметим также, что межмолекулярное взаимодействие имеет электромагнитную природу, а следовательно, такой же является природа и «сторонней силы» в гальваническом элементе. Кроме того, «поле сторонней силы» и электрическое поле разности потенциалов, созданной этой силой, отличаются локализацией. Если первое действует (и совершает работу по перемещению иона) в приэлектродной области, то «поле разности потенциалов» присутствует и действует в любой точке

рассматриваемой электрической цепи, включая сам источник. «Неоднородным» является источник ЭДС. Поэтому при изучении неоднородного участка цепи следует рассматривать поля «сторонней силы» и «разности потенциалов на электродах исследуемого источника». Включение дополнительных источников усложняет понимание изучаемого материала.

Последнее обобщение означает, что приведенные выше формулы следует записывать для ионного тока и приэлектродных областей в источнике. При этом следует учитывать удельные сопротивления электролита и электродов. В гальваническом элементе электрическое поле одновременно существует с полем «сторонней силы» в пределах источника. Соответственно, пределы интегрирования в (11) должны быть ограничены расстоянием между электродами источника.

Уточненный вывод закона Ома в интегральной форме для неоднородного участка цепи

Рассмотрим неразветвленную замкнутую цепь с источником ЭДС, к которому подключена нагрузка с сопротивлением R (рис. 3).

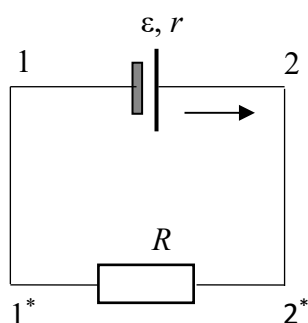


Рис. 3. Неразветвленная замкнутая цепь с источником ЭДС

В данном случае имеют место неоднородный «1–2» и однородный «1*–2*» участки цепи. На неоднородном

участке (в источнике) одновременно существуют электрическое поле напряженностью $\vec{E}_{эл}$ и поле «сторонней

силы» с напряженностью $\vec{E}_{стор}$. На однородном участке «1*–2*» существует только электрическое поле. Работа «сторонней силы» при перемещении электрического заряда в электрическом поле отрицательна, но изменение потенциальной энергии является положительным.

Закон Ома в дифференциальной форме для неоднородного участка имеет следующий вид:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} + \vec{E}_{стор}), \quad (15)$$

где ρ – удельное сопротивление рассматриваемого участка.

Умножив скалярно обе части (15) на элемент $d\vec{l}$ и выразив плотность тока через силу тока I и площадь электрода S , получим

$$I \cdot \frac{dl}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot (\vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}). \quad (16)$$

Проинтегрируем (16) в пределах расстояния l между электродами источника:

$$I \cdot \int_0^l \frac{\rho \cdot dl}{S} = \int_0^l \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} + \int_0^l \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l}. \quad (17)$$

Обратим внимание на то, что внешне формулы (17) и (7) совпадают за исключением физического смысла величин.

В этом случае интеграл в левой части (17) будет определять внутреннее сопротивление источника:

$$\int_0^l \frac{\rho \cdot dl}{S} = r. \quad (18)$$

Первый интеграл правой части (17) определяет ту часть работы сторонней силы, которая идет на переме-

щение единичного положительного заряда в электрическом поле между электродами. В стационарном электрическом поле эта работа равна изменению потенциала со знаком «минус»:

$$\int_0^l \vec{E}_{эл} \cdot d\vec{l} = -(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (19)$$

В (19) работа «сторонней силы» по перемещению заряда в рассматриваемом электрическом поле отрицательна, т. к. изменение потенциальной энергии заряда положительно.

Второй интеграл правой части (17) определяет полную работу сторонней силы по перемещению единицы заряда, т. е. ЭДС источника:

$$\int_0^l \vec{E}_{стор} \cdot d\vec{l} = \varepsilon. \quad (20)$$

С учетом формул (18)–(20) выражение (17) можно записать в виде

$$I \cdot r = \varepsilon - (\varphi_2 - \varphi_1), \quad (21)$$

или

$$I \cdot r + (\varphi_2 - \varphi_1) = \varepsilon. \quad (22)$$

Из (22) следует, что «сторонние силы» совершают работу по преодолению внутреннего сопротивления и электрического поля, определяемого разностью потенциалов на электродах источника, т. е. электродвижущая сила определяется суммой разности потенциалов между электродами источника и падения потенциала на внутреннем сопротивлении. Другими словами, разность потенциалов на электродах нагруженного источника меньше ЭДС на значение падения потенциала на внутреннем сопротивлении:

$$(\varphi_2 - \varphi_1) = \varepsilon - I \cdot r. \quad (23)$$

Нередко разность потенциалов на электродах нагруженного источника называют напряжением на его зажимах. Из (23) следует, что в рассмотренном случае напряжение равно разности ЭДС и падения потенциала на внутреннем сопротивлении. Если же источник не нагружен $I = 0$, то указанная разность потенциалов равна ЭДС, т. е. максимальна.

Теперь рассмотрим однородный участок «1*–2*» (см. рис. 3). Исключив в (15) $\vec{E}_{стор}$ и повторив приведенный вывод, получим формулировку закона Ома для однородного участка:

$$I \cdot R = (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (24)$$

Очевидно, что разности потенциалов на рассматриваемых участках «1–2» и «1*–2*» равны. Поэтому, приравняв (23) и (24) и выразив I , получим формулу закона Ома для неразветвленной замкнутой цепи постоянного тока с источником ЭДС:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (25)$$

Это же выражение можно также получить интегрированием по замкнутому контуру «1–2–2*–1*–1».

Обратим внимание на то, что все формулы мы получили, рассматривая два участка одной электрической цепи. В то же время в существующем классическом выводе эти же формулы получают для двух разных цепей.

Заключение

Показано, что при наличии в цепи гальванического элемента следует учитывать различие в локализации полей «сторонней» и электрической сил. В источнике ЭДС «сторонняя сила» совершает работу по переносу заряда против сил созданного ею электрического поля. В ненагруженном источнике указанная работа, отнесенная к перенесенному заряду, определяет ЭДС. Под нагрузкой электродвижущая сила равна сумме напряжения на зажимах источника и падения потенциала на его внутреннем сопротивлении. Выражения, полученные существующим методом, относятся к разным электрическим цепям, в то же время предложенный вывод приводит к аналогичным формулам, описывающим два участка одной цепи.

Формальное определение напряжения суммарной работой кулоновских и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль участка цепи скорее усложняет понимание материала, чем передает различия между указанными тремя величинами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Детлаф, А. А.** Курс физики: учебное пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2004. – 607 с.
2. **Трофимова, Т. И.** Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Академия, 2007. – 560 с.
3. **Калашников, С. Г.** Электричество / С. Г. Калашников. – Москва: Наука, 1964. – 668 с.
4. **Орир, Дж.** Физика : учебник: пер. с англ. / Дж. Орир. – Москва: КДУ, 2010. – 752 с.: ил.
5. **Bowen-Jones, M.** IB Physics Course Book / M. Bowen-Jones, D. Homer. – Oxford University Press, 2014. – 710 p.
6. A Dictionary of Physics: edited by Jonathan Law and Richard Rennie. – Oxford University Press, 2015. – 666 p.
7. **Young, H. D.** College Physics / H. D. Young. – 9th ed. – Addison Wesley, 2011. – 1151 p.
8. Физическая энциклопедия: в 5 т. / Под ред. А. М. Прохорова. – Москва: Большая Российская энциклопедия, 1998. – Т. 5. – 760 с.

9. **Фриш, С. Э.** Курс общей физики / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – Ленинград: Физматгиз, 1962. – Т. 2. – 516 с.

Статья сдана в редакцию 3 марта 2022 года

Али Ибрагимович Ляпин, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: ali_lyapin@tut.by.

Елена Валентиновна Пивоварова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: h-v-pivovarova@yandex.ru.

Александр Васильевич Хомченко, д-р физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: avkh@bru.by.

Ali Ibragimovich Lyapin, PhD (Physics & Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: ali_lyapin@tut.by.

Helena Valentinovna Pivovarova, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: h-v-pivovarova@yandex.ru.

Alexandr Vasilievich Khomchenko, DSc (Physics & Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: avkh@bru.by.