

4. ЭДС и напряжение – силы антиподы, преобразование энергии в электрических цепях

Нечипуренко Николай Алексеевич.

г. Энергодар, Украина.

4.1. Основные силы, действующие в электрических цепях

Не только учащиеся или начинающие свою трудовую деятельность электрики, но и специалисты, умудренные практическим опытом и обладающие солидным теоретическим багажом, не всегда могут ответить (внятно ответить) на вопрос, в чем заключается принципиальная разница между электрическим напряжением и электродвижущей силой (ЭДС)? И все это потому, что ответ на этот вопрос невозможно найти ни в учебной, ни технической литературе. В теории электричества уделяется внимание электрическому току и особо подчеркивается, что электрический ток – это упорядоченное движение зарядов проводимости, но не рассматриваются с достаточными подробностями силы, которые поддерживают течение тока или противодействуют ему.

Если бы в механике рассматривалось какое-либо движение без учета сил, сопровождающих это движение, то такое рассмотрение было бы неполноценным – не объясняющим до конца сути самого движения, в абсолютном большинстве случаев, такое рассмотрение оказывается невостребованным из-за его ограниченности.

Основными движущими силами в электрических цепях являются электрическое напряжение и ЭДС, необходимо выяснить, как взаимодействуют между собой ЭДС и электрическое напряжение и в чем заключена принципиальная разница между этими двумя силами.

4.2. Электродвижущая сила

В замкнутом контуре трубопровода может циркулировать какая-либо жидкость, но для этого необходимо устройство, которое поддерживало бы непрерывное движение жидкости. В механике такое устройство принято называть насосом. Очевидно, что для протекания электрического тока так же необходимо устройство, способное поддерживать длительное упорядоченное движение зарядов проводимости. В электротехнике такое устройство называется источником электродвижущей силы. Следовательно, **источник электродвижущей силы – это своеобразный насос, перемещающий (перекачивающий) заряды проводимости в замкнутом токопроводящем контуре.**

Рассмотрим процесс наведения ЭДС в проводнике, который движется во внешнем магнитном поле. На рис. 1-а изображен проводник P , который, находясь в междуполусном пространстве магнита, движется в направлении вектора v .

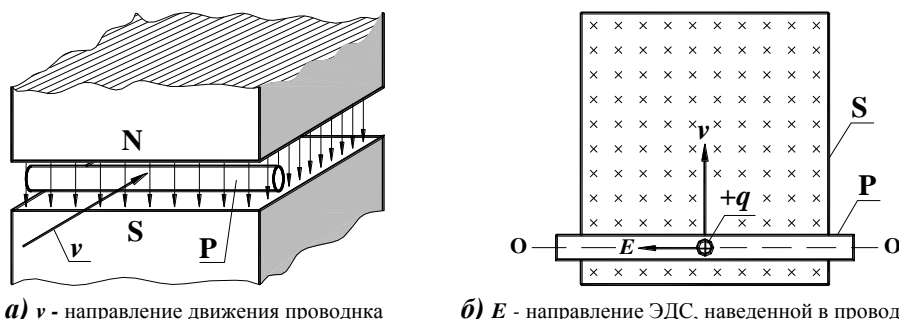


Рис. 1. Движение проводника в междуполусном пространстве электромагнита и наведенная в проводнике ЭДС

На рис. 1-б изображено междуполусное пространство представленного на рис. 1-а магнита, рассматриваемое со стороны северного N магнитного полюса. Северный полюс на рис. 1-б не показан, а на южном S полюсе крестиками отмечено направление силовых линий, которыми изображается магнитное поле междуполусного пространства (крестиками обозначаются магнитные силовые линии, направленные вглубь рисунка – от нас). В проводнике

P (рис. 1-б), продольная ось которого OO' движется перпендикулярно магнитным силовым линиям, наводится ЭДС, значение которой равно сумме сил Лоренца, действующих на содержащиеся в проводнике заряды проводимости.

Направление ЭДС, наведенной в проводнике P (рис. 1-б), определяется с помощью правила правой руки (рис. 2) – это направление условились совмещать с направлением сил Лоренца, действующих на положительные $+q$ электрические заряды, а на разноименные заряды, которые содержатся внутри движущегося в магнитном поле проводника, действуют противоположно направленные силы Лоренца.



Рис. 2. Определение направления ЭДС, наведенной в проводнике P

Под действием сил Лоренца, то есть под действием ЭДС на противоположных концах проводника P накапливаются избыточные разноименные заряды (рис. 2), следовательно, **действие ЭДС направлено на разделение разноименных электрических зарядов, содержащихся в проводнике P .**

Существование источника ЭДС возможно только при непрерывном поступлении к нему энергии от стороннего источника. Фотоэлемент, являясь источником ЭДС, получает энергию от внешнего источника электромагнитного излучения, в качестве которого может быть солнечный свет. В термоэлементах для появления ЭДС необходим внешний источник тепловой энергии. В электрогенераторах, работа которых подчинена законам электромагнитной индукции, источником энергии, поддерживающим действие ЭДС, является первичный двигатель, в качестве которого может использоваться двигатель внутреннего сгорания, паровая или гидравлическая турбина и т. п.

Можно встретить утверждения, что гальваническим источникам ЭДС не требуется внешний источник энергии. Но ЭДС, действующая в гальванических источниках, – это результат определенных химических реакций, в процессе которых расходуются (преобразуются) химические реактивы, в результате чего выделяется электрическая энергия. И процесс горения бензина – это тоже химическая реакция, сопровождаемая выделением тепловой энергии, но никто же не утверждает, что двигатель внутреннего сгорания, работая, не потребляет энергию от внешнего источника. Следовательно, как залитый в бак автомобиля бензин является внешним источником энергии для двигателя внутреннего сгорания, так и химические реактивы, заложенные в конструкцию гальванического элемента, являются внешним источником энергии для гальванического элемента. Наиболее убедительным доказательством того, что химическим источникам ЭДС требуется внешний источник энергии, является аккумулятор. Длительная работа аккумулятора, без периодической его зарядки от внешнего источника энергии, так же невозможна, как невозможна длительная работа автомобиля без периодической заправки его бензином. Гальванические элементы одноразового использования можно сравнить с реактивным двигателем одной из ступеней космического аппарата, такой двигатель после выработки топлива повторно не используется. Однако работоспособность реактивного двигателя, как и работоспособность гальванического элемента, могут обеспечить только внешние источники энергии.

Энергия, поступающая к источнику ЭДС от внешнего источника, преобразуется внутри источника ЭДС в электрическую энергию, которая в подсоединенных к выходу источника ЭДС электрических цепях преобразуется в другие виды энергии. Следовательно, **источник ЭДС – это одновременно и источник электрической энергии или генератор электрической энергии.**

4. 3. Разность электрических потенциалов – электрическое напряжение

Накопившимся на противоположных сторонах проводника P (рис. 2) разноименным избыточным зарядам принадлежит электрическое поле. Любой электрический заряд q , который оказался в электрическом поле избыточных зарядов, будет испытывать действие сил отталкивания со стороны избыточного заряда одноименного с зарядом q и действие сил притяжения со стороны избыточного заряда противоположной полярности. Следовательно, электрический заряд q , оказавшийся во внешнем электрическом поле, находится под действием результирующей силы F , поэтому в случае движения заряда q , силами электрического совершается работа A , значение которой определяется уравнением

$$A = Fs \quad (1)$$

Значение работы, совершаемой силами электрического поля в процессе перемещения **положительного** электрического заряда **единичной величины** между двумя точками электрического поля, условились называть **разностью электрических потенциалов** этих двух точек, следовательно,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Fs}{q} \quad (2)$$

где φ_1 – потенциал первой точки электрического поля; φ_2 – потенциал второй точки поля; F – значение силы, действующей на электрический заряд q ; q – величина заряда; s – расстояние, пройденное зарядом **вдоль направления действия силы F** .

Электрический потенциал одной произвольно выбранной точки электрического поля необходимо приравнять нулевому значению. После этого можно определять значения разности потенциалов между выбранной точкой нулевого потенциала и всеми остальными точками рассматриваемого электрического поля.

«Разность электрических потенциалов» и **«электрическое напряжение»** – это два названия одной и той же физической величины. Электрическое напряжение обозначается символом U , следовательно, $U = \varphi_1 - \varphi_2$ или:

$$U = \frac{Fs}{q} \quad (3)$$

Электрическое напряжение, действующее на участок токопроводящей цепи и являющееся результатом прохождения электрического тока в этом участке, называется **падением электрического напряжения U** .

После преобразования уравнения (3) получим следующее выражение

$$F = \frac{q}{s}U \quad (4)$$

Заряды проводимости, как и связанные электрические заряды, равномерно распределены во всем объеме проводника, поэтому если проводник однороден по химическому составу, и площадь поперечного сечения проводника неизменна вдоль всей его длины, то в каждой единице длины такого проводника содержится одинаковое количество зарядов. Это означает, что всегда при изменении длины проводника в n раз, в те же n раз изменяется и значение суммарного электрического заряда q , содержащегося в проводнике, а значение отношения q/s остается неизменным – это указывает на то, что **электрический заряд проводника является аналогом длины проводника или аналогом расстояния**.

Значение отношения q/s не зависит от длины проводника, поэтому отношение q/s , входящее в уравнении (3), исполняет роль коэффициента пропорциональности, следовательно, **электрическое напряжение является аналогом механической сил**. Однако в некоторых литературных источниках утверждается, что разность электрических потенциалов – это **энергетическая характеристика электрического поля**. Чтобы разрешить эти противоречия вспомним уравнение, с помощью которого определяется количество энергии W , расходуемой на перемещение движущегося тела:

$$W = Fvt \quad (5)$$

где F – значение действующей на тело силы, которая направлена вдоль направления движения этого тела; v – скорость движения тела; t – время движения тела.

Уравнение (5) – это универсальное уравнение, с помощью которого определяется количество энергии, расходуемой как в механических, так и в электрических системах. Вместе с тем существует еще и аналогичное уравнение, с помощью которого определяется количество энергии W , затрачиваемой на поддержание протекания тока в участке электрической цепи:

$$W = UIt \quad (6)$$

где U – значение электрического напряжения, действующего на участок электрической цепи; I – значение текущего в электрической цепи тока; t – время протекания тока.

Значение тока I пропорционально скорости, с которой происходит упорядоченное движение зарядов проводимости. Следовательно, если уравнение (6) сопоставлять с уравнением (5), то окажется, что ток I – это аналог скорости механического движения, поэтому напряжение U – это вовсе не энергетический параметр, а аналог силы, действующей в механической системе. Это означает, что **все параметры, имеющие размерность вольт – напряжение, падение напряжения, электродвижущая сила – это электрические силы, являющиеся аналогами сил, действующих в механических системах.**

Законы электростатики свидетельствуют о том, что значение напряженности электрического поля внутри проводника, оказавшегося во **внешнем электрическом поле**, оказывается равным нулю. Это свойство проводников используется для создания экранов – устройств, защищающих людей и оборудование от влияния внешних электрических полей. На основании этого, иногда, делается ошибочный вывод, что электрическое поле не может проникнуть внутрь проводника. Однако те же законы электростатики указывают на то, что внешнее электрическое поле не только свободно проникает внутрь проводника, но еще и оказывает силовое действие на электрические заряды, содержащиеся внутри проводника. Подчиняясь действию сил внешнего электрического поля, заряды проводимости смещаются внутри проводника на незначительные расстояния – это приводит к накоплению на противоположных сторонах проводника избыточных разноименных зарядов.

Накопившимся разноименным избыточным зарядам принадлежит **дополнительное электрическое поле**, которое встречно направлено внешнему электрическому полю и накладывается на это внешнее поле. Итогом наложения двух существующих внутри проводника электрических полей является **резльтирующее электрическое поле**, появляющееся внутри проводника. Смещение зарядов проводимости и накопление избыточных зарядов продолжается до момента установления равновесного состояния между внешним и дополнительным электрическим полем, в этом случае значение напряженности результирующего электрического поля внутри проводника будет равно нулю. Следовательно, хотя внутри проводника напряженность результирующего электрического поля и уменьшается до нулевого значения, но внутри проводника одновременно сосуществуют два (внешнее и дополнительное) встречно-направленных и взаимно уравновешенных (взаимно скомпенсированных) электрических поля. Если же по каким-либо причинам две разделенные расстоянием точки проводника оказываются под действием разности электрических потенциалов, то внутри проводника существует электрическое поле, напряженность которого имеет определенное (отличное от нуля) значение. В этом случае все электрические заряды, содержащиеся в проводнике, находятся под действием сил электрического поля. Как раз эти силы, а не какие-либо иные, поддерживают или противодействуют упорядоченному движению зарядов проводимости – поддерживают или противодействуют течению электрического тока.

4.4. Взаимодействие ЭДС и электрического напряжения

Одноименные электрические заряды находятся под действием сил взаимного отталкивания, а разноименные заряды – под действием сил взаимного притяжения, и как раз эти силы F имелись в виду при составлении уравнения (1). Из уравнения (4) следует, что сила F и электрическое напряжение U связаны прямой пропорциональной зависимостью, поэтому действие силы F , как и действие электрического напряжения U , направлено на рассеяние (на

разрушение) одноименных избыточных зарядов и на слияние (на объединение) разноименных избыточных зарядов.

Действие ЭДС направлено на разделение разноименных зарядов, содержащихся в проводнике P (рис. 1), а электрическое напряжение U (сила F), действует на слияние разноименных зарядов находящихся в том же проводнике P , в этом и заключено принципиальное отличие ЭДС от электрического напряжения – ЭДС и напряжение – это силы антиподы.

На рис. 3 изображен тот проводник P , который так же изображен на рис. 1 и на рис. 2. В этом проводнике наводится ЭДС, поэтому проводник является источником (генератором) электроэнергии. Последовательно с проводником P соединен потребитель электроэнергии резистор R . Пока разомкнут контакт S (рис. 3-а), ток в цепи потребителя отсутствует, поэтому отсутствует и падение напряжения в цепи резистора: $U_R = 0$.

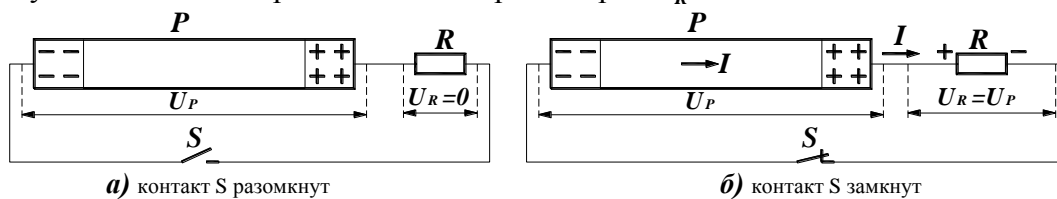


Рис. 3. Взаимодействие ЭДС и электрического напряжения

ЭДС, в соответствие со вторым законом Кирхгофа, уравновешена электрическим напряжением. Второй закон Кирхгофа применяется для замкнутых электрических контуров, и на рис. 3-а изображен замкнутый контур, потому что цепь разомкнутого контакта S мы вправе заменить резистором, активное сопротивление которого стремится к бесконечности. Следовательно, если в проводнике P наводится ЭДС, то в соответствие со вторым законом Кирхгофа действие этой ЭДС, при разомкнутом контакте S , будет уравновешенно электрическим напряжением U_G .

После замыкания контакта S в проводнике P и в цепи резистора R появится электрический ток I (рис. 3-б). Независимо оттого, какова причина появления разности электрических потенциалов, если такая разность существует, то существует и электрическое поле, силы которого всегда поддерживают электрический ток, текущий от положительного к отрицательному потенциалу, и противодействуют току, текущему от отрицательного к положительному потенциалу. В проводнике P ток течет от отрицательного к положительному потенциалу. Это означает, что силы электрического поля (напряжение U_P) противодействует току, текущему внутри проводника P , поэтому только ЭДС, которая действует внутри проводника P , способна преодолеть противодействие напряжения U_P и поддерживать течение тока. Следовательно, и при разомкнутом контакте S (ток отсутствует), и при замкнутом контакте S (ток течет) напряжение U_P , под влиянием которого оказывается проводник P (рис. 3), находится в состоянии противодействия с ЭДС, действующей внутри проводника P .

4.5. Преобразование энергии в электрических цепях

Только энергия проявляет себя действием силы, и никакой иной объект, кроме объекта, стремящегося излучать или поглощать энергию, не может быть источником силы. Рассматривая действие сил необходимо помнить о третьем законе Ньютона или, применимо к электрическим цепям, о втором законе Кирхгофа, который гласит, что силу невозможно приложить к пустоте. Сила проявляется при том неременном условии, что этой силе противодействует другая равновеликая сила.

Преобразование механической, электрической, химической, ядерной и любой другой энергии происходит в процессе движения, сопровождаемого не менее чем двумя силами, которые находятся в состоянии взаимно-уравновешенного противодействия. Взаимно-уравновешенное противодействие означает, что всегда, и в статике, и в динамике (в случае преобразования энергии), значение результирующей силы равно нулю. В связи с этим может появиться вопрос, а стоит ли рассматривать силу, как физическую величину, конечное

(результатирующее) значение которой всегда равно нулю? Рассматривать необходимо, потому что *источник силы, которая поддерживает движение, одновременно является и источником энергии, а источник силы, которая противодействует движению, является потребителем энергии.*

При взаимодействии наведенной в проводнике P ЭДС (рис. 3-б) и противодействующего ей электрического напряжения U_p , энергия, поступающая от внешнего источника в проводник P , преобразуется в вырабатываемую проводником (генератором) электрическую энергию.

Необходимо обратить внимание на то, что при протекании тока I (рис. 3-б) положительный потенциал напряжения U_p оказывается соединенным с положительным потенциалом падения напряжения U_R . Это означает, что напряжение U_p находится в состоянии противодействия с падением напряжения U_R (рис. 3-б). Следовательно, падение напряжения U_R оказывает противодействие току I , текущему *во внешней* по отношению к резистору R цепи.

В процессе противодействия электрического напряжения U_p и падения напряжения U_R , появляющегося на выводах резистора R , вырабатываемая генератором электроэнергия преобразуется в потребляемую резистором электрическую энергию.

Падение напряжения U_R – это ни что иное, как разность электрических потенциалов, а если существует разность потенциалов, то существует (еще раз напомним) и *электрическое поле, силы которого всегда поддерживают электрический ток, текущий от положительного к отрицательному потенциалу, и противодействуют току, текущему от отрицательного к положительному потенциалу.* Внутренняя цепь резистора, обладающая активным сопротивлением, оказывает противодействие текущему в резисторе току, и это противодействие преодолевается действием присутствующей на выводах резистора разности потенциалов (преодолевается действием падения напряжения в резисторе). Следовательно, *падение напряжения U_R (рис. 3-б) оказывает противодействие току I , текущему во внешней по отношению к резистору R цепи, и это же падение напряжения поддерживает течение тока во внутренней цепи резистора.*

Падение напряжения U_R находится в состоянии противодействия с силами, которые противодействуют течению тока в проводнике, в процессе такого противодействия потребляемая резистором электроэнергия преобразуется в выделяемую резистором тепловую энергию.

Если, присутствующая на выводах элемента X разность электрических потенциалов противодействует току, текущему во внутренней цепи этого элемента, и поддерживает ток, который течет во внешней по отношению к элементу X цепи, то такая разность электрических потенциалов является ничем иным, как электрическим напряжением, присутствующим на выводах источника электрической энергии. Если, присутствующая на выводах элемента Y разность электрических потенциалов поддерживает ток, текущий во внутренней цепи этого элемента, и противодействует току, который течет во внешней по отношению к элементу Y цепи, то такая разность электрических потенциалов является ничем иным, как падением электрического напряжения, присутствующего на выводах потребителя электрической энергии. В этом и состоит принципиальная разница между электрическим напряжением и падением напряжения.

Всякое преобразование энергии происходит в процессе противодействия не менее чем двух взаимно уравновешенных сил. Если бы действующая в электрических цепях ЭДС не вступала в противодействие с электрическим напряжением, а напряжению, в свою очередь, не противодействовало падение напряжения, то в электрических цепях не могли бы происходить процессы преобразования энергии. Однако в электрических цепях происходят процессы преобразования энергии, и это является подтверждением того, что *ЭДС и напряжение, напряжение и падение напряжения – это две пары электрических силы, которые всегда находятся в состоянии взаимного противодействия.*

Заключение

Изменения значения магнитной индукции сопровождаются наведением ЭДС – эту закономерность установил Фарадей, а в теории электромагнитного поля утверждается, что изменения значения магнитной индукции вызывают наведение вихревого электрического поля, и в подтверждение этого приводится ссылка на одно из уравнений Максвелла. Однако электрическое напряжение, то есть силы электрического поля, находится в состоянии противодействия с ЭДС и недопустимо считать, что итогом одного и того же исходного события являются два взаимоисключающих конечных результата. К тому же никаких вихревых электрических полей в природе не существует. Следовательно, теория электромагнитного поля нуждается ни в каких-то косметических доработках, а в пересмотре ее основ.

Литература

1. Кузнецов М. И. Основы электротехники. Издательство «Высшая школа». Москва, 1970.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. Перевод с немецкого. Издательство «Мир», Москва, 1985 г.
3. Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники, под редакцией Атабекова, ч. 3 Электромагнитное поле. Издательство «Энергия», Москва, 1970 г.

Более полная информация на сайте: sites.google.com/site/nikolanech/

Связь с автором: nikola-nech@yandex.ua