

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

Ф.Ф. МЕНДЕ

*доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник
НИИ Криогенного приборостроения
Физико-технический институт низких
температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
г. Харьков, Украина
E-mail: mende_fedor@mail.ru*

О ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВАХ УНИПОЛЯРНОЙ ИНДУКЦИИ. НОВЫЙ ТИП УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Униполярная индукция была открыта Фарадеем более 200 лет назад, но и до настоящего времени физические принципы работы некоторых конструкций униполярных генераторов остаются неясны. Были попытки объяснить работу таких генераторов действием на движущиеся заряды силы Лоренца, но оказалось, что существуют такие конструкции, в которых объяснить их принцип действия таким способом нельзя. В настоящей работе показано, что концепция скалярно-векторного потенциала, которая предполагает зависимость скалярного потенциала заряда от его относительной скорости, позволяет объяснить работу всех существующих типов униполярных генераторов. Со дня открытия Фарадеем униполярной индукции данная статья является первой и пока единственной, где отражены истинные причины этого феномена.

Ключевые слова: закон индукции Фарадея, сила Лоренца, униполярная индукция, униполярный генератор, скалярно-векторный потенциал.

F.F. MENDE

*Doctor of Technical Sciences, Senior Research
Research institute for cryogenic instrument engineering
B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics
and Engineering, NAS Ukraine, Kharkov, Ukraine
E-mail: mende_fedor@mail.ru*

ABOUT THE PHYSICAL THE BASES OF UNIPOLAR INDUCTION. NEW TYPE OF UNIPOLAR GENERATOR

Unipolar induction was discovered Faraday more than 200 years ago, but also up to now the physical principles of the operation of some constructions of unipolar generators remain obscure. There were the attempts to explain the work of such generators by action on the moving charges of Lorentz force, but it turned out that there are such constructions, in which to explain their operating principle thus is impossible. It is in the present work shown that the concept of the scalar-vector potential, which assumes the dependence of the scalar potential of charge on its relative speed, makes it possible to explain the work of all existing types of unipolar generators. From the day of discovery Faraday unipolar induction this article appears first and thus far of only, where the true reasons for this phenomenon are reflected.

Key words: law induction of Faraday, Lorentz force, unipolar induction, unipolar generator, scalar-vector potential.

Введение

В настоящее время классическая электродинамика состоит из двух не связанных между собой частей. С одной стороны это уравнения Максвелла, определяющие волновые свойства полей, с другой стороны это сила Лоренца, определяющая пондеромоторные (силовые) взаимодействия токнесущих систем. Как известно, эта сила вводится в виде отдельного постулата. И пока нет того

связующего звена, которое объединило бы эти два разрозненные направления. Основным законом индукции в электродинамике является закон Фарадея. Но и здесь дела обстоят не наилучшим образом. Униполярная индукция является исключением из этого закона, что свидетельствует о его неполноте. Именно эта индукция до сих пор вызывает среди ученых много споров, она была открыта Фарадеем более

200 лет назад, но и до настоящего времени физические принципы работы некоторых конструкций униполярных генераторов остаются неясны. Были попытки объяснить работу таких генераторов действием на движущиеся заряды силы Лоренца, но оказалось, что существуют такие конструкции, в которых объяснить их принцип действия таким способом нельзя. Вот один из примеров. Если к проводящему диску, прикрепив на изолирующей прокладке торцевой магнит, и начать токовую конструкцию вращать, то между щетками, скользящими по периферии диска и его осью, возникнет разность потенциалов. Поскольку в указанном случае магнит вращается совместно с диском, то отсутствует движение зарядов диска в магнитном поле магнита, и объяснить возникновение разности потенциалов на щетках на основе силы Лоренца нельзя.

В отдельных публикациях указывается на то, что для объяснения работы униполярных генераторов следует привлекать специальную теорию относительности (СТО), но никто не показал, как это сделать. В данной работе будет показано, что привлечение концепции скалярно-векторного потенциала для объяснения работы всех известных конструкций униполярных генераторов дает ответы на все поставленные вопросы.

Со дня открытия Фарадеем униполярной индукции данная статья является первой и пока единственной, где отражены истинные причины этого феномена.

2. Униполярная индукция в концепции скалярно-векторного потенциала

Начиная рассмотрение этого вопроса, мы должны четко разграничить понятия разности потенциалов и ЭДС. Скалярный потенциал неподвижного заряда, находящегося в вакууме, определяется соотношением

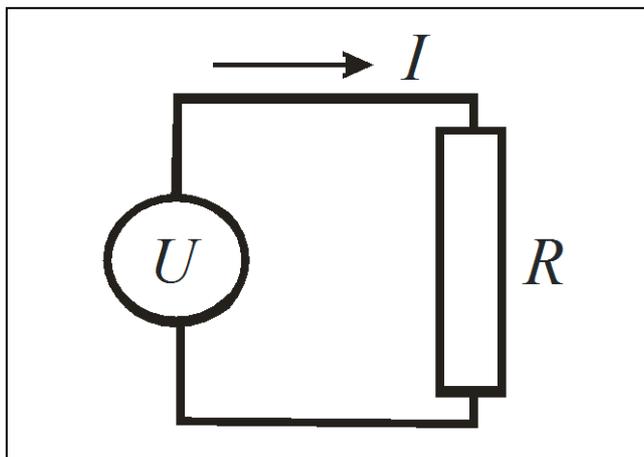


Рис. 1. Источник ЭДС в составе замкнутой цепи с сопротивлением

$$\Phi_0(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r},$$

где Q – величина заряда; ϵ – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Электрическое поле является градиентом скалярного потенциала

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \Phi_0(r).$$

Это поле является потенциальным, а это означает, что при переносе пробного заряда в этом поле по любой замкнутой траектории работа не совершается.

Электродвижущая сила ЭДС – скалярная величина, характеризующая работу сторонних (непотенциальных) сил в замкнутом проводящем контуре. ЭДС определяет работу этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль контура. Эта работа определяется произведением ЭДС на величину заряда. И разность потенциала и ЭДС измеряются в вольтах.

Эквивалентной схемой источника ЭДС является идеальный источник напряжения с нулевым внутренним сопротивлением, включенный в замкнутую цепь как показано на рисунке 1.

В соответствии со вторым законом Киргофа с учетом полярности источника ЭДС и падения напряжения на сопротивлении сумма всех напряжений в такой цепи равна нулю

$$U + U_R = U + IR = 0.$$

В обычных электрогенераторах ЭДС возбуждается в замкнутом неподвижном или движущемся контуре, частью которого является нагрузка. Отличием униполярного генератора от таких генераторов является то, что в нем замкнутый контур является составным: одна часть этого контура является неподвижной, а вторая движется относительно первой. Гальванический контакт между этими частями обеспечивается при помощи скользящих щеток. В обеих частях контура униполярного генератора возбуждаются свои разности потенциалов, которые имеют разную величину. ЭДС в таком составном контуре является суммой разностей потенциалов его составных частей. Заметим, что составных частей может быть и более двух.

Концепция скалярно-векторного потенциала, развитая в работах [1...6], предполагает зависимость скалярного потенциала заряда от его относительной скорости.

$$\varphi(v) = \Phi_0 ch \frac{v_{\perp}}{c}, \quad (1)$$

где v_{\perp} – скорость заряда нормальная к вектору, соединяющему движущийся заряд с точкой наблюдения; c – скорость света.

Рассмотрим случай, когда имеется отрезок проводника, по которому течет ток (рис. 2). Будем

считать, что в проводнике имеются две подсистемы взаимно вложенных зарядов положительной решетки g^+ и свободных электронов g^- , абсолютные значения которых равны по величине и компенсируют друг друга, оставляя проводник нейтральным. Для удобства рассмотрения на рисунке эти две подсистемы раздвинуты по оси r .

Электрическое поле, создаваемое неподвижной решеткой в зависимости от расстояния r от центра проводника, имеет вид

$$E^+ = \frac{g}{2\pi\epsilon r}, \quad (2)$$

где g – абсолютное значение плотности положительных зарядов, приходящихся на единицу длины проводника.

Как и в соотношении (2), при дальнейшем рассмотрении будем вводить только абсолютные значения плотности как положительных, так и отрицательных зарядов, считая, что абсолютные величины электрических полей, совпадающие по направлению с осью r – *положительны, а не совпадающие – отрицательны.*

Используя соотношение (2), получаем значения электрических полей, создаваемых электронами, движущимися в проводнике со скоростью v_1

$$E^- = -\frac{g}{2\pi\epsilon r} ch \frac{v_1}{c} \cong -\frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{c^2}\right). \quad (3)$$

В данном соотношении взяты только два первых члена разложения в ряд гиперболического косинуса.

Складывая (2) и (3), получаем суммарное значение электрического поля в точке r

$$E = -\frac{g v_1^2}{4\pi\epsilon c^2 r}. \quad (4)$$

Это соотношение указывает на то, что вокруг проводника, по которому движутся электроны, имеется электрическое поле, соответствующее отрицательному заряду проводника. Однако это

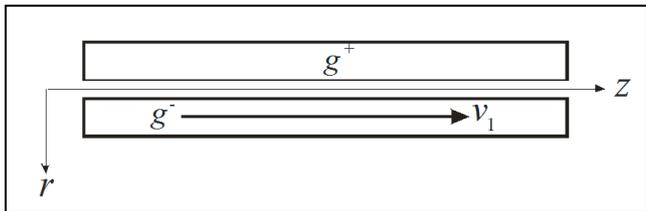


Рис. 2. Отрезок проводника, по которому течет ток

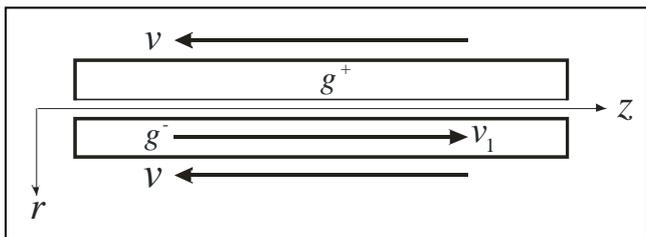


Рис. 3. Отрезок проводника с током, движущийся со скоростью v

поле при тех плотностях токов, которые могут быть обеспечены в нормальных проводниках, имеет незначительную величину, и при помощи существующих измерительных средств обнаружено быть не может. Оно может быть обнаружено только при протекании токов через сверхпроводники, где плотность токов может на много порядков превосходить плотность токов в нормальных металлах [4].

Рассмотрим случай, когда сам отрезок проводника, по которому со скоростью v_1 текут электроны, движется в обратном направлении со скоростью v (рис. 3).

В этом случае соотношения (2) и (3) примут вид

$$E^+ = \frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right); \quad (5)$$

$$E^- = -\frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(v_1 - v)^2}{c^2}\right). \quad (6)$$

Складывая (5) и (6), получаем суммарное поле по отношению к неподвижному наблюдателю

$$E_\Sigma = \frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(\frac{v_1 v}{c^2} - \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{c^2}\right). \quad (7)$$

Если параллельно с проводником движется с такой же скоростью проводящая пластинка, ширина которой равна $r_2 - r_1$ (показана в нижней части рисунка 4), то пользуясь соотношением (4), получим значение разность потенциалов между ее краями

$$U_1 = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{g v_1^2 dr}{4\pi\epsilon c^2 r} = -\frac{g v_1^2}{4\pi\epsilon c^2} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (8)$$

В то же время разность потенциалов для неподвижного наблюдателя между точками r_2 и r_1 составит

$$U_2 = \frac{g}{2\pi\epsilon} \left(\frac{v_1 v}{c^2} - \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{c^2}\right) \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (9)$$

Подключим к торцам движущейся пластины скользящие щетки, как показано на рисунке 4, которые вместе с вольтметром покоятся в исходной системе отсчета. Тогда ЭДС в таком составном

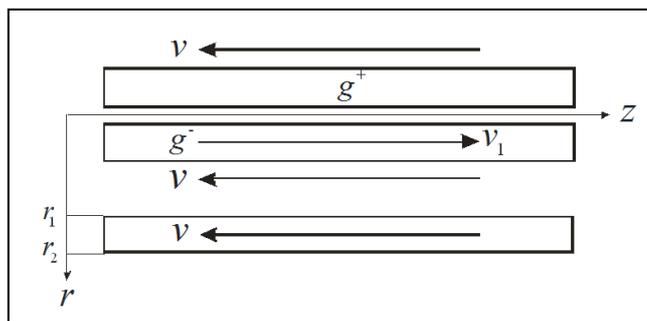


Рис. 4. Проводящая пластинка движется с той же скоростью, что и отрезок проводника

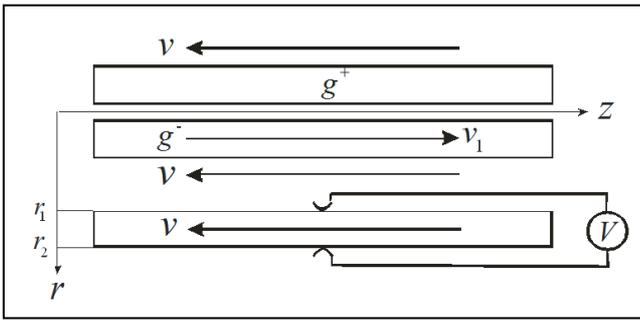


Рис. 5. К торцам проводящей пластине, двигающейся совместно с отрезком проводника, при помощи неподвижных скользящих щеток подключен вольтметр контуре определится как сумма разностей потенциалов U_1 и U_2 .

$$U_{\text{эдс}} = \frac{g}{2\pi\epsilon} \left(\frac{v_1 v}{c^2} - \frac{v_1^2}{c^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (10)$$

Возвращаясь к схеме, изображенной на рисунке 1, видно, что нагрузочным сопротивлением в данном случае служит внутреннее сопротивление вольтметра, который и зафиксирует полученное значение $U_{\text{эдс}}$.

Поскольку для реальных проводников дрейфовая скорость электронов в проводниках значительно меньше круговой скорости диска и кольца, вторым членом в скобках в соотношении (10) можно пренебречь. И окончательно получаем

$$U_{\text{эдс}} \cong \frac{g}{2\pi\epsilon} \left(\frac{v_1 v}{c^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Свернем проводник в кольцо, а проводящую пластинку в диск с отверстием и присоединим к образующим диска скользящие щетки, как показано на рисунке 5. Если с одинаковой скоростью вращать кольцо и диск, то для случая, когда расстояние между щетками значительно меньше радиуса кольца и диска, на щетках получим $U_{\text{эдс}}$, определяемую соотношением (10).

Кольцо из проволоки может состоять не из одного, а из нескольких витков. Такие витки

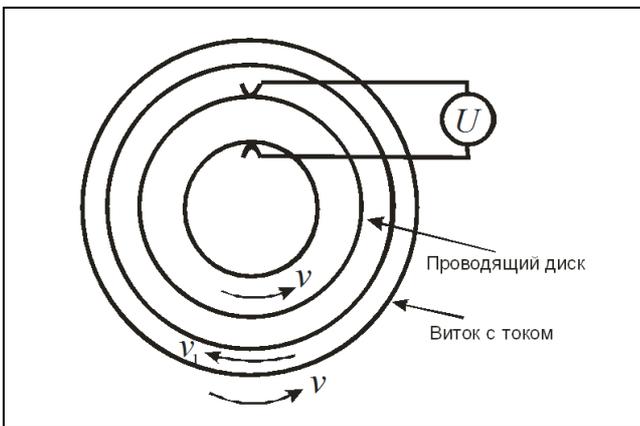


Рис. 6. Схема униполярного генератора с вращающимся витком с током и вращающимся проводящим диском

являются аналогом торцевого магнита, вращающегося совместно с проводящим диском.

Мы рассмотрели наиболее противоречивый вариант униполярного генератора, объяснение принципа действия которого в литературных источниках ранее отсутствовало. При таком рассмотрении нельзя использовать понятие силы Лоренца, т.к. и магнит и проводящий диск вращаются с одинаковой скоростью.

Проводящий диск и вращающийся совместно с ним магнит можно совместить в единой конструкции. Для этого следует взять проводящий диск из магнитного материала и намагнитить его в осевом направлении, присоединив скользящие щетки к его образующим. Предельным случаем такой конструкции является сплошной намагниченный диск. При этом ЭДС снимается при помощи скользящих щеток между образующей диска и его осью. Такая конструкция представляет униполярный генератор, который был предложен еще Фарадеем.

Возможны различные сочетания вращающихся и неподвижных магнитов и дисков.

Случай с неподвижным магнитом и вращающимся проводящим диском характеризуется схемой, изображенной на рисунке 7.

В этом случае выполняются следующие соотношения:

Электрическое поле, действующее на электроны в пластинке со стороны электронов, движущихся в неподвижном кольцевом витке, определяется соотношением

$$E_1^- = -\frac{g}{2\pi\epsilon r} ch \frac{v_1 - v}{c} = -\frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(v_1 - v)^2}{c^2} \right),$$

а электрическое поле, действующее на электроны в диске, со стороны ионов в кольце

$$E_2^+ = \frac{g}{2\pi\epsilon r} ch \frac{v}{c} = \frac{g}{2\pi\epsilon r} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Поэтому разность потенциалов между краями вращающегося диска составит

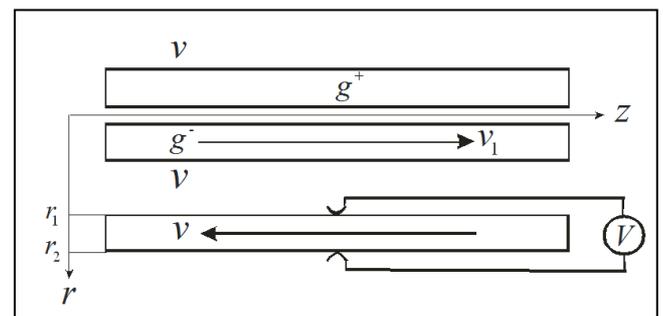


Рис. 7 Случай, когда отрезок проводника с током неподвижен, а двигается лишь проводящая пластинка

$$U_1 = \frac{g}{2\pi\epsilon} \left(\frac{v_1 v}{c^2} - \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{c^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

В то же время разность потенциалов между щетками, которые неподжны по отношению к исходной системе, определится соотношением

$$U_2 = - \int_{r_1}^{r_2} \frac{g v_1^2 dr}{4\pi\epsilon c^2 r} = - \frac{g v_1^2}{4\pi\epsilon c^2} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Суммируя U_1 и U_2 , получаем значение ЭДС

$$U_{\text{ЭДС}} = \frac{g}{2\pi\epsilon} \left(\frac{v_1 v}{c^2} - \frac{v_1^2}{c^2} \right) \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (11)$$

Видно, что это соотношение в точности совпадает с соотношением (10).

Если для рассмотренного случая свернуть в кольцо проволоку, а пластинку в диск с отверстием, то получим случай, изображенный на рисунке 8. Напряжение для ЭДС в этом случае определяется соотношением (11). Поэтому никакой разницы между случаем магнита, вращающегося совместно с диском и магнитом, который в исходной системе отсчета покоится, а диск вращается - нет. Именно этот феномен и не находил до сих пор объяснения.

Рассмотрим новый тип униполярного генератора, в котором используются намагниченные ролики. На рисунке 9 показан намагниченный проводящий ролик, катящийся между двумя плоскостями. Будем считать, что нижняя проводящая плоскость неподвижна, а верхняя движется со скоростью v , заставляя ролик осуществлять одновременно и поступательное и вращательное движение. Причем, поскольку ролик намагничен, то будем сопоставлять его, как и прежде, с витком, по которому электроны движутся со скоростью v_1 .

При этом центр витка движется со скоростью $1/2v$. Мгновенная скорость витка в точке его касания с нижней плоскостью равна нулю, а в верхней точке равна v . Выделим в верхней части витка небольшой участок dl . Скорость положительных

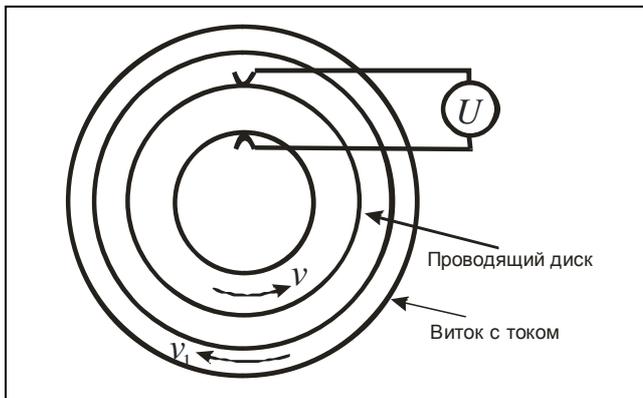


Рис. 8. Случай неподвижного диска и вращающегося витка с током

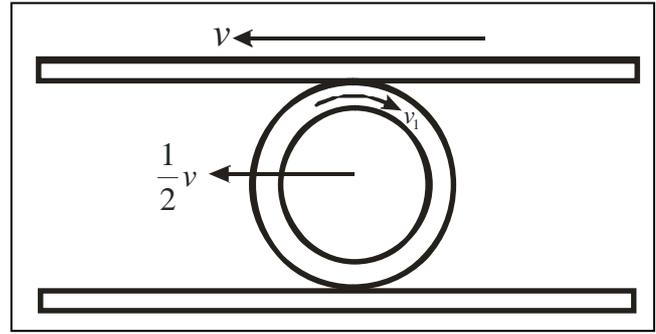


Рис. 9. Намагниченный ролик, катящийся между двумя параллельными плоскостями

зарядов решетки в этом участке относительно неподвижного наблюдателя будет равна v , а скорость электронов будет равна $v - v_1$. Эта ситуация соответствует случаю, изображенному на рисунке 2. Указанный участок, пролетая около неподвижного наблюдателя, находящегося вблизи верхней пластины, создаст напряженность электрического поля равную

$$E \cong \frac{g v_1 v}{2\pi\epsilon c^2 r}.$$

Длительность импульса электрического поля составит vdl .

Для регистрации такого однополярного импульса можно применить схему, представленную на рисунке 10. Данное рассмотрение демонстрирует лишь принцип получения импульса электрического поля при помощи катящегося витка. В действительности ситуация является более сложной. Все части катящегося витка, как и составляющие скорости зарядов, имеют различные составляющие скорости параллельные пластинам в зависимости от расстояния до верхней пластины. Поэтому для нахождения поля в заданной неподвижной точке вне ролика необходимо проинтегрировать составляющие всех электрических полей, создаваемых как движущимися зарядами, так и движущейся решеткой всех частей витка.

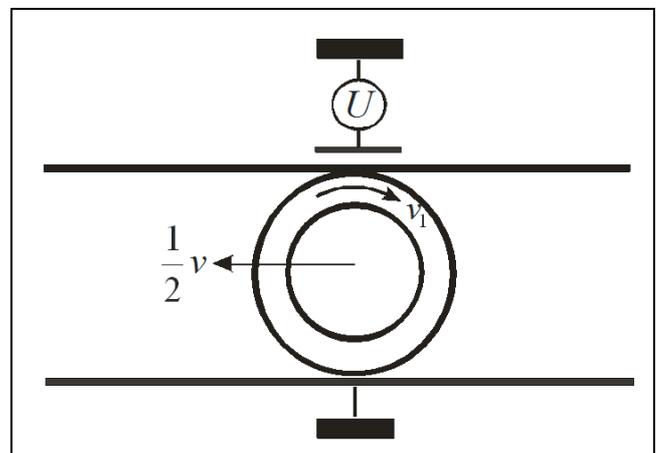


Рис. 10. Схема регистрации импульсов униполярной индукции

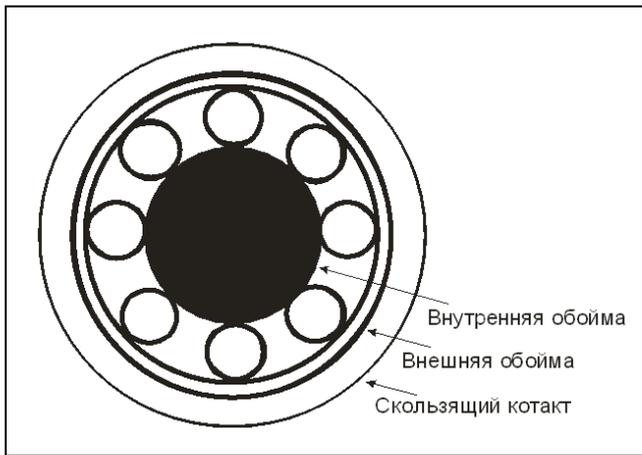


Рис. 11. Подшипник с намагниченными роликами

Схема, приведенная на рисунке 10 не является униполярным генератором, поскольку отсутствует гальванический контакт между нижней клеммой вольтметра и верхней точкой катящегося ролика. Для превращения этой схемы в униполярный генератор такой контакт нужно создать.

Одна из возможных схем создания такого контакта одновременно со всеми роликами, находящимися в обоймах подшипника, показана на рисунке 11.

Подшипник состоит из внутренней неподвижной проводящей обоймы, внешней обоймы и скользящего кольцевого неподвижного контакта. Внутренняя обойма может быть как сплошной, как показано на рисунке, так и кольцевой, как в обычном подшипнике. Внешняя обойма может быть выполнена, как из проводника, так и из диэлектрика. Неподвижный скользящий контакт, выполненный в виде диска с отверстием, должен быть изготовлен так, чтобы по кромке его внутреннего кольцевого отверстия не катились, а скользили сразу всех роликов. Если внешнюю обойму привести во вращение, то каждый ролик, представляя унитарный униполярный генератор, будет генерировать в неподвижном скользящем

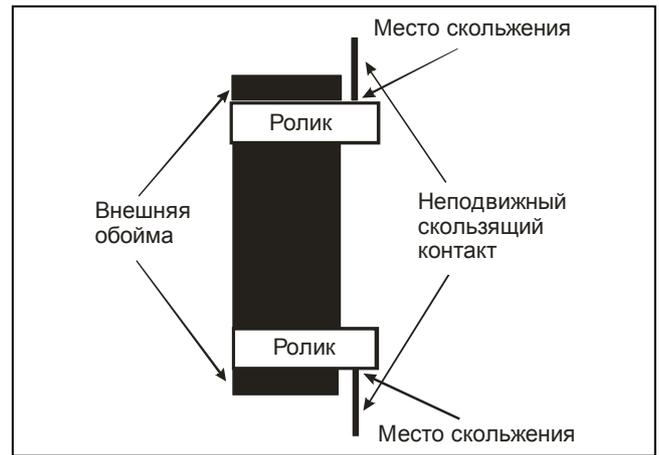


Рис. 12. Продольный разрез униполярного генератора с намагниченными роликами

контакте разность потенциалов относительно внутренней обоймы. Продольный вид одной из возможных конструкций такого генератора показан на рисунке 12.

Такая модель имеет только демонстрационное значение, т.к. очень трудно достичь такой точности изготовления, чтобы обеспечить надежный скользящий контакт между неподвижным кольцевым контактом и всеми скользящим по нему роликами.

Более рациональными являются конструкции, приведенные на рисунке 13.

В обеих конструкциях используются роликоподшипники с металлическими обоймами и намагниченными роликами, ЭДС в которых снимается при помощи щеток, скользящих по краю обойм. Тогда каждый ролик, оказываясь напротив скользящего контакта, будет генерировать однополярный импульс ЭДС между контактом и неподвижной частью генератора. В конструкции А внутренняя обойма и щетки, прикрепленные к ней на изолирующих втулках, являются неподвижными, а внешняя обойма вращается. Постоянное напряжение ЭДС при

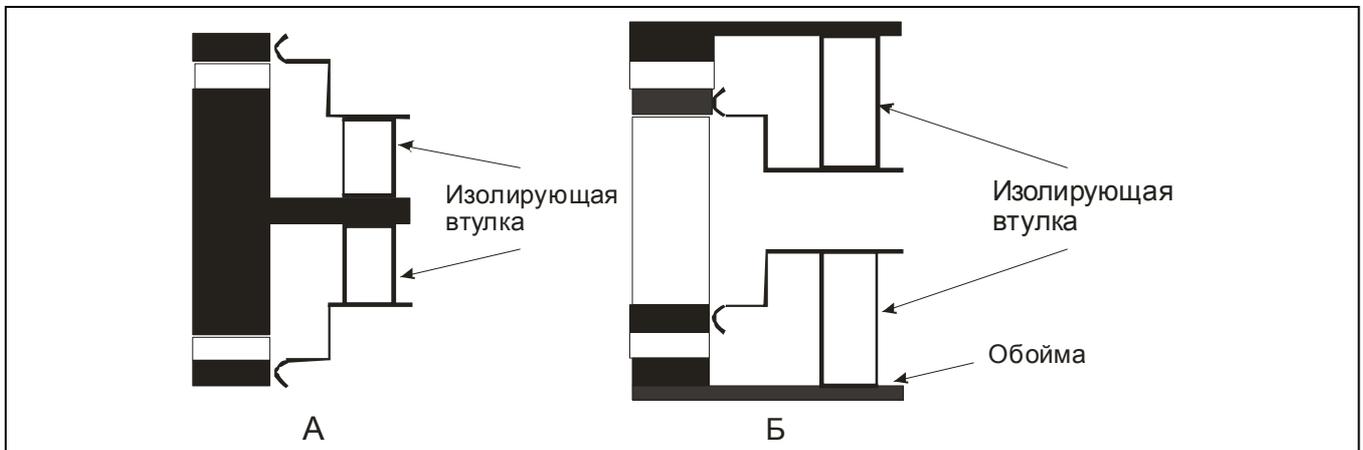


Рис. 13. Конструкции униполярного генератора с скользящими щетками

этом возникает между центральной обоймой и щетками. В конструкции Б, наоборот, вращается внутренняя обойма, а внешняя обойма с прикрепленными к ней щетками, остается неподвижной. ЭДС при этом возникает между металлической обоймой, в которую запрессован подшипник и щетками. Для увеличения тока, который могут обеспечить такие генераторы следует увеличить количество роликов и скользящих контактов, расположив их эквидистантно по периметру обоймы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менде Ф.Ф. *К вопросу об уточнении уравнений электромагнитной индукции*. Харьков, депонирована в ВИНТИ, №774-B88 Деп. 1988. 32 с.
2. Менде Ф.Ф. *Существуют ли ошибки в современной физике*. Харьков, Константа, 2003. 72 с.
3. Mende F.F. On refinement of certain laws of classical electrodynamics, arXiv, physics/0402084.
4. Менде Ф.Ф. *Новая электродинамика. Революция в современной физике*. Харьков, НТМТ, 2012, 172 с.
5. Менде Ф.Ф. Новые подходы в современной классической электродинамике. Часть II // *Инженерная физика*. 2013. № 2.
6. Менде Ф.Ф. *Проблемы современной физики и пути их решения*. Palmarium academic publishing, 2013, 272 с.

REFERENCE

1. Mende F.F. *K voprosu ob utochnenii uravneniy elektromagnitnoy induksii* [To the specification of equations electromagnetic induction]. Kharkov, deposited at VINITI, № 774-B88. Dep., 1988. 32 p.
2. Mende F.F. *Sushchestvuiut li oshibki v sovremennoi fizike* [Are there any errors in modern physics]. Kharkov: Konstanta [Kharkov: Publishing house «Constant»], 2003. 72 p.
3. Mende F.F. On refinement of certain laws of classical electrodynamics. arXiv, physics/0402084.
4. Менде F.F. *Novaya elektrodinamika. Revolyutsiya v sovremennoy fizike* [New electrodynamics. Revolution in the modern physics]. Kharkov: NTMT [Kharkov: Publishing house «NTMT»], 2012.
5. Менде F.F. *Novie podchodi v sovremennoi klassicheskoi elektrodinamike*. [New approaches in the contemporary classical electrodynamics. Part II]. *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics]. 2013. № 2.
6. Mende F.F. *Problemi sovremennoi fiziki i puti ich resheij* [The problem of contemporary physics and method of their solution]. Palmarium academic publishing, 2013, 272 p.

Сведения об авторе

Федор Федорович Менде, доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник, директор

E-mail: mende_fedor@mail.ru

НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины

61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47

Information about author

Fedor Fedorovich Mende, Doctor of Techn. Sciences, Senior Research Assistant, Director

E-mail: mende_fedor@mail.ru

Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering NAS Ukraine

61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47.