

# Maxwellian electromechanics – the path to create a new type of electromechanical energy converters with unique capabilities

Vladimir Livshits  
OKB SAPR JSC  
Moscow, Russia  
[vl@okbsapr.ru](mailto:vl@okbsapr.ru)

**Abstract** — The relevance of the scientific and technical trend of electromechanics proposed for the opening is caused by the need of the production of inexpensive and reliable semiconductor devices of high power in radio frequency bands development. The trend is based on the physical principle of Maxwellian electrodynamics, which has not previously found electromechanical applications: the equivalence of the magnetic action of all forms of total current, including absorption currents and convection currents. A new path of electromechanical energy conversion – through an electromagnetic field oscillating at radio frequencies – is conceptually implemented in an electrodynamic unipolar system: a distributed inductive-capacitive structure, in which unipolar induction and convection currents are manifested when its parts rotating – periodically remagnetizable structure of armature from a dielectric and/or synchronously rechargeable windings.

**Keywords** - the law of total current, absorption and convection currents, unipolar induction, ponderomotive forces, energy conversion through an electromagnetic field.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Теория электромагнитного поля стала завершенной благодаря Максвеллу, сформулировавшему в качестве одного из уравнений электродинамики закон полного тока, согласно которому магнитное поле в равной мере индуцируют как токи проводимости, протекающие через металлы, так и токи смещения, в частности, поляризации, протекающие через диэлектрики и даже вакуум, а также токи механического происхождения (конвекции), обусловленные направленным движением носителей заряда вместе с вмещающими их телами.

Поскольку магнитное действие альтернативных, по отношению к току проводимости, форм полного тока – на частотах, представляющих, вплоть до последних лет, практический интерес – пренебрежимо мало, расширение Максвеллом понятия электрического тока фактически не повлияло на развитие электромеханики, продолжившей зиждется, в основном, на законе электромагнитной индукции Фарадея, принимаемом, по умолчанию, по отношению к токам проводимости, протекающим через металлические части – в частности, обмотки – электромеханических преобразователей.

Однако современный уровень развития электроники, позволяющий инвертировать постоянное напряжение в энергию ВЧ и СВЧ с не достижимой ранее эффективностью, может в корне изменить эту ситуацию, перенеся вектор развития электромеханики на новое ее направление – электромеханику максвелловскую [1] – которую предлагается наименовать так потому, что она зиждется на расширенном Максвеллом понимании электрического тока. На этом пути можно уверенно

прогнозировать создание электромеханических преобразователей энергии, в том числе для микросистем, возможности которых выходят далеко за рамки существующих. Современное состояние элементной базы, позволяющее выбрать радиочастотный сигнал в качестве энергоносителя для новых разработок, создает для этого необходимую предпосылку – но чтобы ею воспользоваться, необходимо преодолеть сложившуюся около века назад и прочно укоренившуюся узость представлений о двух электрофизических феноменах.

## II. ОЧЕВИДНОЕ, КАЗАВШЕЕСЯ НЕВЕРОЯТНЫМ

Эквивалентность магнитного действия токов смещения и конвекции току проводимости равной величины, постулированная Максвеллом, была опытным путем проверена российским ученым-электротехником А.А.Эйхенвальдом, наблюдавшим в своих описанных в учебниках опытах магнитное действие токов конвекции и токов смещения. Поскольку эти опыты проводились на рубеже XIX-XX веков, когда единственным средством детектирования магнитных полей была магнитная стрелка, не удивительно, что эти токи изучались как постоянные – обусловленные вращением дисковых электродов или диэлектрика заряженного конденсатора. Надо воздать должное экспериментальному мастерству А.А.Эйхенвальда, сумевшему получить стабильные постоянные значения даже для токов смещения (поляризации) – у края вращающегося диэлектрического диска на уровне зазора между полудисковыми электродами, несущими заряды противоположных знаков, где вектор электрической индукции меняет свое направление благодаря вращению диска, а не изменению полярности ЭДС, приложенной к электродам.

Однако эти виртуозные опыты, похоже, возымели и побочный эффект, заключающийся в том, что токи конвекции с тех пор принято связывать с движением только постоянных по величине и знаку зарядов – хотя очевидно, что движение тела, несущего переменный заряд (в частности, вращение вокруг оси обмотки, подключенной средней точкой к одному из полюсов источника переменной заряжающей ЭДС, сторонней по отношению к синхронной токообразующей ЭДС, приложенной к ее крайним точкам), соответствует переменному току конвекции, индуктивно связанному с током проводимости, протекающему по той же обмотке, – следовательно, могущему быть им индуцированным.

Таким образом, выпал из рассмотрения целый класс электромеханических преобразователей энергии – авторотативных (фактически, движителей вращения) – существование которых не противоречит законам сохранения (в т.ч., момента импульса), действующим в электродинамике в системе «вещество + поле».

Похожая ситуация сложилась и с явлением униполярной индукции, лежащим в основе работы всех униполярных машин. Оно состоит, как известно, в возникновении в намагниченном теле, движущемся непараллельно оси намагничивания, ЭДС, направленной перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы магнитной индукции и скорости движения тела. Здесь тоже, по умолчанию, движущееся тело считается намагниченным постоянно (как сердечник электромагнита с обмоткой, питаемой постоянным током, или электропроводный постоянный магнит) – хотя очевидно, что если движущееся тело будет намагничено переменным (в частности, как сердечник электромагнита с обмоткой, питаемой переменным током), то принципиально ничего не изменится – только индуцируемая при его движении ЭДС окажется переменной. В этой связи – причем без объективных на то причин – униполярные машины были отнесены к технике постоянных токов, и потому считаются невозможными без скользящих контактов.

Таким образом, выпал из рассмотрения целый класс униполярных машин – переменного тока – обладающих возможностью бесконтактного исполнения. Она связана с тем, что непрерывность переменного тока, который на отдельных участках последовательной цепи, согласно закону полного тока, может быть представлен равным по величине и эквивалентным по магнитному действию током смещения, не нарушают дистанционные контакты через электрическое поле – емкостные.

### III. БЕСКОНТАКТНЫЕ МАШИНЫ ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

С другой стороны, известно, что на современном уровне техники бесконтактные электрические машины, как правило, строятся с дистанционными контактами через магнитное поле – индуктивными. На это есть объективная причина: относительно небольшие воздушные зазоры в магнитных цепях с железными сердечниками, как правило, не препятствуют созданию эффективных связей на переменном токе промышленной частоты. Учитывая, что емкости, достижимые в зазорах электрических машин средних размеров, не превышают нескольких сотен пикофард, а в микромашинах – и того меньше, частоты переменных токов, необходимые для пропускания через них достаточных мощностей, должны на много порядков превышать промышленные, находясь в радиочастотном диапазоне – вплоть до СВЧ.

Поэтому теперь, когда радиочастотная генерация осуществляется только электронными средствами, бесконтактные электрические машины с емкостными связями отсутствуют. Но на рубеже XIX-XX веков, когда для целей радиосвязи строились мощные машинные генераторы очень высоких частот, в качестве одной из возможных систем таковых рассматривалась и такая оригинальная система, как коллекторный генератор, работающий на емкость. Поскольку на ВЧ искрение и нагревание щеток – трудности коммутации – проявляются весьма интенсивно, рассматривался и такой их бесконтактный вариант:

«Трудности коммутации различные авторы и, в том числе М.Леблан, пытались парализовать путем применения, вместо трущихся контактов в виде щеток, коммутирующего устройства, при котором прохождение тока совершается через емкость между коммутируемой частью якоря и собирающей частью, заменяющей

щетку. Однако для тех частот, которые могут быть получены от описанного вида генератора, поверхности, необходимые для получения нужных емкостей, получаются таких размеров, которые не могут быть осуществлены на практике» [2, с.8]. Поэтому подобные системы ранее реализовать не удалось – но ясно, что если будет выбран другой тип генератора, в принципе, позволяющий получить на порядки более высокие частоты, чем обычный коллекторный, то размеры поверхностей, необходимые для получения нужных емкостей, могут оказаться вполне приемлемыми.

Препятствием для генерации по описанному принципу частот, достаточно высоких, чтобы емкостной контакт приемлемых размеров был бы эффективен, является большая величина индуктивности обмоток коллекторных машин, прежде всего, якорных. Его нет у униполярных машин – также, в соответствии с вышеизложенным, возможных бесконтактными – однако безобмоточный якорь которых на этом фоне можно считать практически безындукционным. Кроме того, их непрерывный токосъем не сопровождается пульсациями, от которых не свободна даже емкостная коммутация.

Взгляд под новым углом зрения на униполярные машины показывает, что они – как это ни парадоксально, в связи с их промышленным применением в технике больших мощностей – целесообразны и для маломощной техники, включая микросистемную. Известно, что даже одной паре магнитных полюсов на микроскопических длинах рабочего зазора становится тесно, поскольку разнести их на достаточные расстояния не удастся. Это вынуждает применять в этих случаях емкостные преобразователи, требующие энергоносителя с крайне ограниченными возможностями – постоянного напряжения. Работающие от СВЧ энергии униполярные микромашины, рабочий зазор которых равномерно использован полностью, были бы гораздо эффективнее. Поэтому вектор развития бесконтактных машин, вполне вероятно, завтра вновь вернется к исторически первым униполярным машинам – в соответствии с законом диалектики, утверждающим, что эволюционное развитие даже в области техники совершается по спирали.

### IV. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ УНИПОЛЯРНАЯ СИСТЕМА

Эквивалентность для переменного тока дистанционного электрического контакта скользящему механическому контакту сводит задачу создания бесконтактной униполярной машины к выбору наиболее эффективной ее конструкции. Целесообразно принять за основу машины, у которых рабочий зазор – двойной (по числу скользящих контактов) – в частности, дисковые униполярные машины с двойным аксиальным зазором. Однако отодвигание токоснимателей от ротора в классической конструкции дисковой униполярной машины проблему не решит, поскольку боковые зоны их прилегания, определяющие величину емкости, обладают малой поверхностью. Поэтому следует, в соответствии с принципами дуально-инверсной электродинамики, произвести замену тока и магнитного потока – и тогда окажется, что ток (теперь – аксиальный) надо будет вводить в ротор через рабочие зазоры, доли торцевых поверхностей которых в полной поверхности ротора максимальны. Для замены же аксиального направления магнитного потока в роторе на радиальное достаточно

иначе подключить обмотки индуктора – так, чтобы протекающие через них токи были встречными (рис. 1).

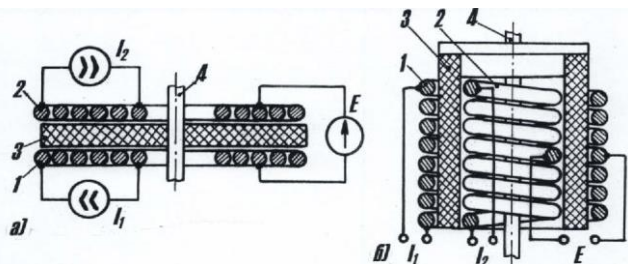


Рис.1. Дисковый (а) и цилиндрический (б) варианты электродинамической униполярной системы: 1, 2 – обмотки индуктора, 3 – ротор, 4 – вал.

Обмотки индуктора здесь условно показаны подключенными к источникам постоянных токов и ЭДС – то есть в некий фиксированный момент времени. Это позволило наглядно отобразить их особенности: для источников, подключенных к крайним точкам каждой из обмоток – работу в противофазе как источников тока (в режиме, близком к короткому замыканию), а для источника, подключенного к средним точкам обеих обмоток – работу как источника ЭДС (в режиме, близком к холостому ходу).

Поскольку скользящие токосниматели оказались на уровне обмоток индуктора, отпала необходимость отдельных емкостных электродов, поскольку ближайшие к ротору обмотки могут исполнять их функции. Для этого достаточно обеспечить независимость их подключения по продольным токам и поперечному напряжению – в частности, подключив источник переменной ЭДС  $E$ , образующей ток через ротор, к отводам от средних точек обмоток, подключенных своими крайними точками к двум синхронизированным источникам переменного тока  $I_1$  и  $I_2$ , индуцирующим магнитное поле возбуждения.

Полученный электромеханический преобразователь [3] – инверсный по отношению к классическим униполярным машинам – при всей своей простоте обладает таким набором новых качеств, что ему предлагается присвоить специальное наименование – электродинамическая униполярная система (ЭУС). В ее состав входит индуктор, состоящий из двух соосных обмоток возбуждения в виде спиралей, и помещенная в зазор между ними униполярная якорная структура – в частности, диэлектрический ротор. ЭУС, таким образом – распределенная индуктивно-емкостная (LC) структура с электродами в виде обмоток, связь между которыми по максимуму емкостная и по минимуму индуктивная. Это условие выполняется, если материал ротора – диэлектрик с по возможности повышенными значениями диэлектрической и/или магнитной проницаемостей – в частности, ВЧ феррит, исполняющий в ЭУС функцию не только диэлектрика, определяющего величину емкости, но и магнитного экрана, обеспечивающего необходимый уровень индуктивной развязки обмоток.

Работа ЭУС осуществляется следующим образом.

Противофазная работа источников тока  $I_1$  и  $I_2$ , подключенных к крайним точкам обмоток, приводит к тому, что в каждый момент времени через них протекают встречно направленные токи. Но поскольку

обмотки расположены не вплотную, а между ними имеется зазор, в который помещен ротор, магнитные поля обмоток складываются в зазоре, в результате чего ротор оказывается намагниченным радиально, то есть вектор магнитной индукции каждой его частицы лежит в плоскости, перпендикулярной оси. Поэтому вращение ротора, при котором вектор скорости каждой его частицы лежит в той же плоскости, создает идеальные условия для проявления в нем униполярной индукции, в результате которой возникает электрическое поле, соответствующее заряженному состоянию конденсатора с неподвижными электродами в виде обмоток. В связи с тем, что магнитное поле в роторе, индуцируемое переменными токами, осциллирует, то конденсатор, образованный обмотками, перезаряжается. Поэтому очевидно, что если вместо источника ЭДС к обмоткам был бы подключен вольтметр, то он показал бы напряжение – работа ЭУС в генераторном режиме. Необходимым условием двигательного режима работы ЭУС – согласно принципу обратимости – является соблюдение такого же фазового соотношения между токами в обмотках индуктора, и ЭДС, приложенной между средними точками, что и в генераторном режиме.

Принципиальное отличие ЭУС от обычной униполярной машины состоит, таким образом, в том, что индуктор является не магнитным, а электромагнитным: индуцирующим в роторе не только магнитное, но и скрещенное с ним электрическое поле. Другое – не менее существенное – ее отличие состоит в том, что ток, протекающий через ее ротор, имеет иную физическую природу: ток смещения, состоящий, в основном, из тока поляризации жестко связанных с веществом ротора молекул, и, в значительно меньшей степени, из вакуумной составляющей, связанной с вмещающим пространством. Это обстоятельство требует отдельного рассмотрения.

Переменный ток – как в форме тока проводимости в металле, так и в форме тока поляризации в диэлектрике – состоит, как известно, не в однонаправленном, а в колебательном движении носителей заряда. Поэтому, приняв во внимание среднюю скорость свободных электронов в металле при нормальных плотностях тока ( $\sim 1$  мм/с), можно прийти к выводу, что при частоте 1 МГц амплитуда их колебаний составляет всего  $\sim 1$  нм: размер атомно-молекулярного масштаба – того же порядка, на который происходит смещение центров зарядов фиксированных полярных молекул диэлектрика.

С другой стороны, нельзя констатировать и тождественность физической природы тангенциальных сил, приводящих в движение электропроводный и диэлектрический роторы обычной униполярной машины и ЭУС. Однако прецедент есть – за одной и той же по физической природе силой, действующей в магнитном поле на носитель электрического тока, уже закреплены два разных, в зависимости от формы тока, термина: сила Лоренца (если ток представлен движущейся заряженной частицей), и сила Ампера (если ток представлен участком электропроводного контура). Здесь же в аналогичном взаимодействии участвует третья форма тока – ток поляризации. Поэтому представляется уместным применять по отношению к силам, связанным с ним, третий термин: пондеромоторная сила, обычно применяемый к силам, действующим на заряд в

осциллирующем электромагнитном поле. Это и происходит с частицами (молекулами) диэлектрического ротора: заряд – осциллирующий электрический диполь, поле – осциллирующий магнитный поток возбуждения.

Так как импеданс диэлектрического ротора ЭУС, имеющий, в основном, емкостную составляющую, значительно превышает чисто омическое сопротивление роторов обычных униполярных машин, его необходимо скомпенсировать последовательной индуктивностью в цепи источника ЭДС. А поскольку компенсация реактивных сопротивлений происходит только на одной (резонансной) частоте, то этим и определяется оптимальная рабочая частота: та, которая, с учетом всех внешних и внутренних реактивностей ЭУС, обеспечивает резонансный режим работы.

## V. ПАКЕТИРОВАННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭУС

Из двух представленных на рис. 1 вариантов ЭУС дисковый, как правило, предпочтителен, поскольку он позволяет строить наиболее эффективные конструкции преобразователей – пакетированные (галетные). Поэтому изображенную на рис. 1 (а) структуру следует рассматривать как ячейку (секцию) практического преобразователя на основе ЭУС, на примере которой можно пояснить его работу. Достижимый в ней уровень удельных энергетических показателей – из-за малой величины индукции в разомкнутой магнитной цепи – небольшой. Поэтому целесообразно разместить еще по роторному диску, прилегающему к противоположным сторонам обмоток возбуждения, затем – еще по одной противофазно питаемой обмотке и диску и т.д.

Синергизм в такой периодической структуре получается двойной: использованными оказываются не только прямая и обратная ветви магнитного потока возбуждения, но и два направления распространения электрического поля, образующего ток через ротор – в обе стороны от каждой из обмоток. Дополнительно целесообразно ввести поляризационные электроды – концевые заместители обмоток, помещенные в пакет перед первым и за последним дисками. Их назначение – включить в работу крайние диски, за которыми обмоток индуктора нет, путем формирования в них такого же электрического поля, как если бы они были.

Однако простой пакетированный преобразователь с обмотками индуктора, имеющими отводы от средних точек, обладает недостатком, связанным с тем, что все внешние выводы, для оставления внутри индуктора свободного пространства под ротор, могут располагаться лишь на краях обмоток. Поэтому трехвыводные обмотки достаточно тонкими и технологичными быть не могут, поскольку должны состоять не менее чем из четырех слоев. Более толстые, по сравнению с двухвыводными, обмотки уменьшают магнитную проводимость цепи магнитного потока возбуждения, где они образуют немагнитные зазоры. Это уменьшает индукцию в роторе при том же токе возбуждения, что негативно сказывается на достижимом уровне энергетических показателей.

Подключение источника заряжающей ЭДС к отводам от средних точек обмоток индуктора, как было описано выше – простейший, но не единственный способ обеспечения безындукционности его подключения, необходимой, чтобы магнитный поток возбуждения зависел бы только от первых составляющих токов,

протекающих по обмоткам: намагничивающих токов, образованных источниками, подключенными к крайним точкам. Вторые же составляющие токов, образованные источником ЭДС – параллельные ветви заряжающего тока – магнитным действием, искажающим поле возбуждения, обладать не должны. При подключении источника заряжающей ЭДС к отводам от средних точек обмоток это и происходит, поскольку параллельные ветви заряжающего тока направлены противоположно.

Способ безындукционного подключения обмоток индуктора к источнику заряжающей ЭДС через крайние точки имеет решение на следующем конструктивном уровне объекта применения: электроприводе – агрегате, в который преобразователь энергии входит как первый элемент, а вторым элементом является блок питания и управления (БПУ), обеспечивающий его работу [4].

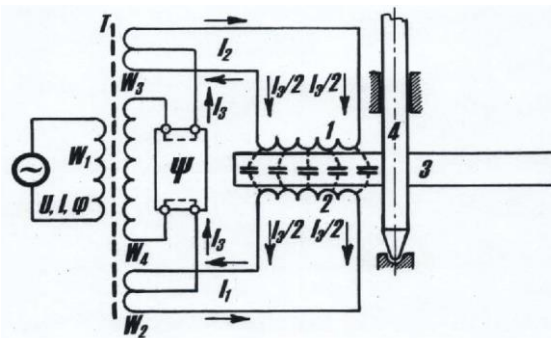


Рис.2. Схема электропривода ЭУС с указанием контуров циркуляции намагничивающих токов ( $I_1$ ,  $I_2$ ), и заряжающего тока ( $I_3$ ): 1, 2 – обмотки индуктора, 3 – ротор, 4 – вал.

В электроприводе, принципиальная схема которого приведена на рис. 2, в состав БПУ входит трансформатор  $T$  с одной первичной обмоткой  $W_1$  и тремя вторичными обмотками. Из них первая и вторая обмотки –  $W_2$  и  $W_3$  (источники намагничивающих токов) – выполнены одинаковыми, относительно силовыми и имеющими по два вывода и одному отводу – от крайних и средних точек. Обмотки индуктора преобразователя 1 и 2 имеют выводы только от своих крайних точек. Они соединены с выводами от крайних точек обмоток  $W_2$  и  $W_3$  трансформатора  $T$ . Третья же, его относительно высоковольтная вторичная обмотка –  $W_4$  (источник заряжающей ЭДС) – соединена с отводами от средних точек его силовых вторичных обмоток  $W_2$  и  $W_3$ .

Несложно убедиться, что, при таком соединении всех обмоток индуктивная развязка намагничивающих и заряжающих токов обеспечивается полная – причем как в  $T$ , так и в преобразователе. В них заряжающие токи разделяются на две параллельные ветви, магнитные поля, индуцируемые которыми, компенсируются, причем в обратном, по отношению к описанному выше, порядке: при растекании токов по обмоткам индуктора – в процессе перезаряда конденсатора, образованного ими – от краев обмоток к серединам, а не от середин обмоток к краям. Обмотка  $W_4$  соединена с отводами от средних точек обмоток  $W_2$  и  $W_3$  через фазоворотную схему  $\Psi$ , обеспечивающую заданные фазовые соотношения между их токами и напряжением на выводах обмотки  $W_4$  и/или поворот фазы на  $180^\circ$  для реверсирования. В качестве нее можно использовать ряд П- или Т-образных LC-звеньев. Эта мера позволяет управлять фазовыми соотношениями, определяющими пондеромоторные

силы. Оптимальным случаем является их синфазность или противофазность, а при сдвиге фаз  $\pm 90^\circ$  между магнитной индукцией в роторе и током поляризации его материала пондеромоторные силы обнуляются.

Практическая конструкция электромеханического преобразователя ЭУС, целесообразного к применению в электроприводе (галетного электродвигателя) – на рис. 3, а схема электромагнитных взаимодействий – на рис. 4.

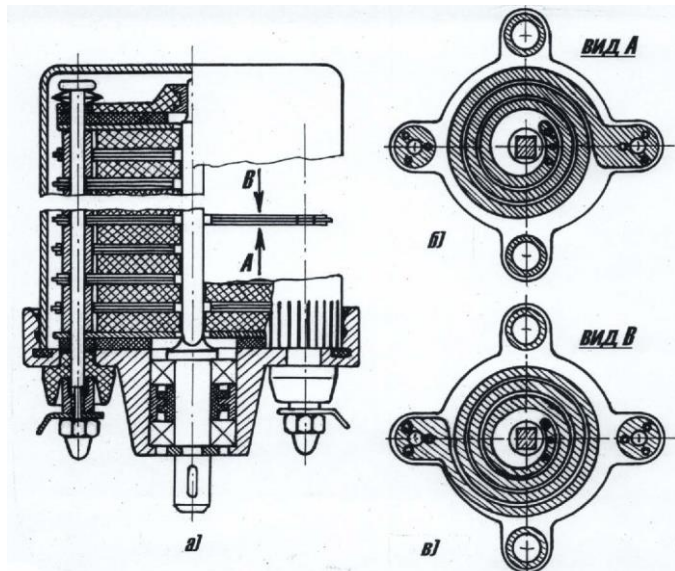


Рис.3. Галетный электродвигатель: поперечный разрез (а) и виды сторон галет с печатными обмотками (б, в).

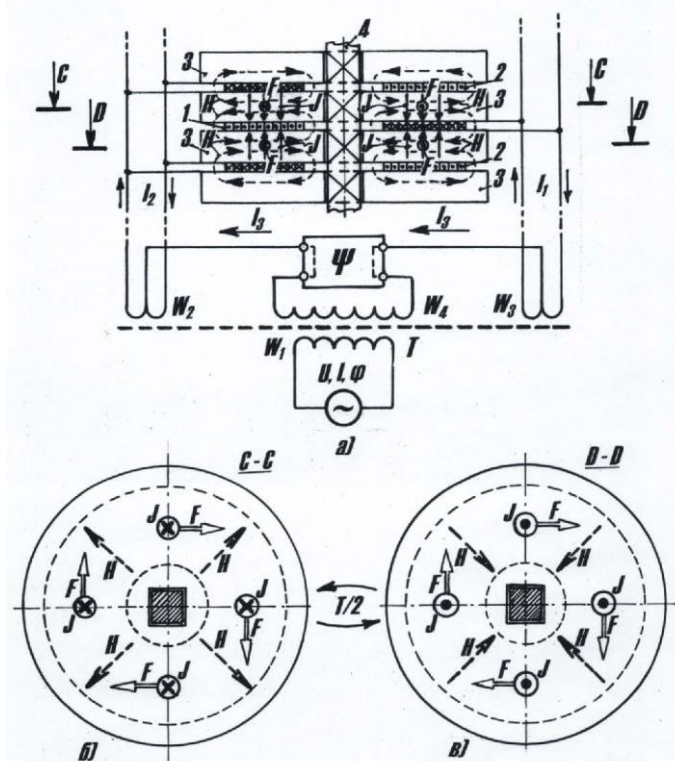


Рис.4. Электромагнитные взаимодействия в галетном электродвигателе: продольный (а) и поперечные разрезы (б, в) по смежным роторным дискам

Изображены векторы плотностей токов поляризации  $J$  в роторных дисках, напряженностей магнитных полей  $H$ , и образующихся в результате их взаимодействия

пондеромоторных сил  $F$ . Минимизация толщин обмоток, обеспечиваемая галетным исполнением, позволила оптимизировать соотношение толщин слоев: сделать токонесущие слои (галеты) – немагнитные зазоры – тоньше роторов, пропускающих магнитный поток.

Обмотки индуктора 1 и 2 для наглядности показаны подключенными к обмоткам трансформатора  $W_2$  и  $W_3$  в плоскости изображения (слева и справа от пакета), а не в перпендикулярных плоскостях, как в действительности (рис. 3). Параллельное соединение обмоток, как правило, целесообразно, поскольку снижает индуктивность индуктора приблизительно (без учета взаимной индукции обмоток) в  $n/2$  раз, где  $n$  – общее число галет в пакете. Это позволяет повысить рабочую частоту – вплоть до перехода в СВЧ диапазон. На схеме показано, что одновременное обращение векторов  $H$  и  $J$ , не влияющее на направления сил  $F$ , имеет место как в пространстве – при переходе к каждому следующему диску – так и во времени – через полупериод  $T/2$  синхронных осцилляций всех токов с частотой питания. Это указано стрелками, обозначающими перемену мест фигур разрезов (б) и (в).

## VI. АТОРОТАТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ЭУС

Поскольку энергия, импульс и момент импульса сохраняются в электродинамике для полной системы – вещество + поле – а для отдельных компонент – только для поля или только для вещества – законы сохранения могут не выполняться, возможны мнимо парадоксальные (но на самом деле не являющиеся таковыми) системы, в которых, на первый взгляд, происходит нарушение законов сохранения – в частности, момента импульса, проявляющееся в их «самовращении» (авторотации). Такой пример (т.н. «парадокс Фейнмана») – на модели, описанной в [5] – изображен на рис. 5.

Иллюстрируемый этой моделью кажущийся парадокс состоит в том, что неподвижный диск с заряженными шариками, после разрыва цепи обмотки, должен – будто бы в нарушение закона сохранения момента импульса – начать вращаться вследствие попадания шариков в вихревое электрическое поле с концентрическими силовыми линиями, образующееся при прекращении тока. И так действительно произойдет – но при этом никакие законы сохранения, по вышеуказанной причине, не нарушатся.

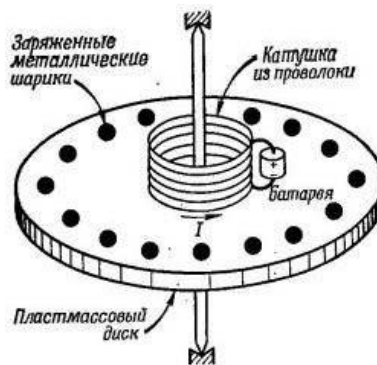


Рис.5. Кажущийся электродинамический парадокс (воспроизведено по фиг. 17.5 из [5]).

В этой модели, однако, имеются некоторые детали и особенности, ослабляющие этот эффект. Вихревое поле, циркулирующее по окружностям с центрами на оси

диска, будет сильнее всего внутри обмотки, а не далеко извне, где показаны заряженные шарики. Поэтому «парадоксальный» эффект проявится сильнее, если шарики исключить, зарядив при этом обмотку целиком, в частности, сделав ее электродом конденсатора – преобразовав обмотку в распределенную LC структуру.

Если заряд обмотки положителен, то аналогия получится полной – в связи с тем, что носителями заряда окажутся фиксированные, подобно шарикам на диске, узлы ионной кристаллической решетки металла. Однако резонно, по соображениям симметрии, предположить, что так же будет действовать и отрицательный заряд, носителями которого являются свободные электроны. Отсюда следует возможность создания авторотативного двигателя (точнее, движителя) вращения – аналога силового гироскопа (гиродина), только без движущихся частей (квазистатического). Это ранее предложенное автором устройство – синхродин [6] – как это теперь стало ясно – частный случай ЭУС – авторотативной.

Способ получения непрерывного вращения в системе, проявляющей в исходном варианте лишь одиночный импульс, состоит в том, что вместо одной обмотки используют, по меньшей мере, две, образующие распределенную LC структуру, в которой емкостную связь между обмотками максимально усиливают, а индуктивную связь, напротив, максимально ослабляют. Через обмотки пропускают в противофазе переменные токи от гальванически развязанных источников, а также прикладывают между ними переменное напряжение той же частоты, непрерывно перезаряжая обмотки зарядами противоположных знаков, осциллирующими синхронно с осцилляциями токов (рис. 6).

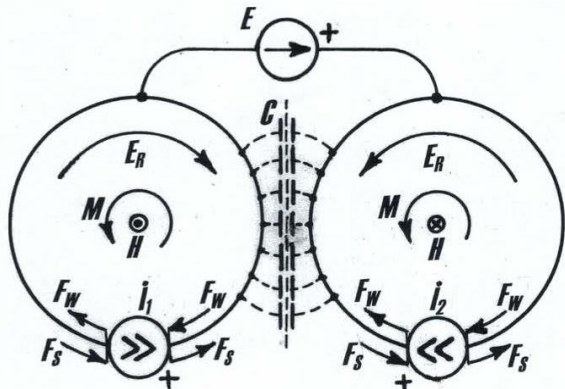


Рис.6. Авторотативный электромеханический преобразователь ЭУС. Схематическое изображение в плане с условно разнесенными обмотками: E - источник заряжающей ЭДС; I1, I2 - источники намагничивающих токов

Авторотативный преобразователь действует по тому же принципу получения однонаправленного вращения, что и в универсальном коллекторном двигателе, питаемом переменным током: неизменности результатов силового взаимодействия при синхронном обращении обоих сил. В последнем случае это – МДС якоря и индуктора (природа движущих сил – магнитная), здесь же – знак внесенного в обмотку заряда и направление вихревого электрического поля, действующего на внесенный заряд (природа движущих сил – электрическая). Не смотря на то, что заряды, внесенные в каждую из обмоток, находятся под влиянием двух электрических полей – первичного (токообразующего), связанного с источниками тока, включенными в разрывы

обмоток, и вторичного (вихревого), направленного согласно правилу Ленца и действующего на обмотки в целом, в формировании вращающих моментов, приложенных к замкнутой системе, состоящей из периодически перезаряжаемых обмоток и источников, участвует только второе, поскольку силы, связанные с первым, являются внутренними. Это показано в нижней части рис. 6, где изображены силы  $F_W$  и  $F_S$ , приложенные к заряженным обмоткам со стороны источников, и к источникам со стороны заряженных обмоток, которые уравниваются согласно третьему закону Ньютона.

В момент времени, фиксированный на рис. 6, в левую обмотку источником E внесен отрицательный заряд, а в правую обмотку – положительный. В то же время, благодаря работе источника  $I_1$ , включенного в разрыв левой обмотки, формируется магнитное поле  $H$ , индуцирующее вихревое электрическое поле  $E_R$ , направленное навстречу  $dI_1/dt$ , например – по часовой стрелке. Поскольку внесенный заряд – отрицательный, сила, приложенная к левой обмотке, стремится повернуть ее навстречу действию поля, формируя вращающий момент  $M$ , направленный против часовой стрелки. При этом в правой обмотке, в которую источником E внесен положительный заряд, а источник  $I_2$  работает в противофазе по отношению к источнику  $I_1$ , процессы приводят к противоположным результатам, и ее поле  $E_R$  оказывается направленным навстречу полю  $E_R$  левой обмотки – против часовой стрелки. Но, поскольку внесенный в правую обмотку заряд – противоположного знака, сила, приложенная к ней, стремится повернуть правую обмотку по действию поля, формируя свой вращающий момент  $M$ , складывающийся с моментом  $M$  левой обмотки. Через полупериод осцилляций поля левой и правой обмоток обращаются.

Приведенный пример показывает, как в одном проводнике могут сосуществовать две индуктивно связанные, вследствие единства магнитного действия, формы полного, в максвелловском понимании, тока: ток проводимости, зависящий от электрического поля, приложенного к проводнику, и ток конвекции, зависящий от величины заряда, внесенного в проводник, и скорости его движения.

В подвижной заряженной обмотке, таким образом, возможна вторая токовая мода – конвекционная, индуктивно связанная с первой токовой модой – кондукционной, и феномен авторотации – это не что иное, как индуцирование конвекционной токовой моды кондукционной. Его проявление в замкнутой системе ничуть не противоречит здравому смыслу: вращательное движение, в отличие от поступательного – абсолютное, а не относительное, поскольку детектируется изнутри по полю центростремительных сил. Следовательно, нет причин, исключающих возможность существования и обратного воздействия – инициирующего вращение.

В ЭУС, в которой в качестве эффекта первого порядка проявляется вращение диэлектрического ротора под действием другой альтернативной, по отношению к току проводимости, составляющей полного тока – тока смещения – условия для проявления авторотации, как эффекта второго порядка, исключительно благоприятны.

Это связано с тем, что оба вращающих момента – ожидаемо сильный и слабый, магнитной и

электрической природы (ротора по отношению к статору и авторотации) – находятся в прямой зависимости от величин диэлектрической и магнитной проницаемостей материала LC структуры. При перезаряде конденсатора с электродами в виде обмоток образуется пара противоположных по знаку осциллирующих зарядов – поэтому важно не только, чтобы они были максимальной величины, но и чтобы каждый заряд попадал в электрическое поле самоиндукции, и в меньшей степени во встречно направленное поле, индуцированное другой обмоткой. Следовательно, в обоих случаях требуется диэлектрик с повышенным значением диэлектрической и магнитной проницаемости (например, ВЧ феррит), который во втором случае будет исполнять в LC структуре функцию не ротора, а магнитного экрана. Авторотативные преобразователи также целесообразно выполнять секционированными – в частности, на основе цилиндрического варианта ЭУС согласно рис. 1 (б).

Авторотация как эффект второго порядка, очевидно, имеет место и в диэлектрическом роторе, где она накладывается на основной вращающий момент (магнитной природы) по отношению к статору. Это связано с макроскопическим дипольным моментом поляризованного диэлектрика, эквивалентным наличию заряженных пластин на его границах. Вряд ли, однако, его вклад во вращающий момент будет соизмерим с действием пондеромоторных сил, проявляющихся в полном объеме вещества ротора.

Применения авторотации могут быть двух видов: во-первых, прямые – например, на борту геостационарных спутников связи для периодической коррекции их орбиты без расходования ограниченного ресурса рабочего тела, и, во-вторых – обратные, обусловленные обратимостью этого физического механизма, а именно, индуцированию кондукционной токовой моды конвекционной. На этом принципе могут быть построены датчики угловой скорости без подвижных частей, заменяющие механические гироскопы.

## VII. ОТКРЫТИЕ, КОТОРОЕ РЯДОМ

В заключение, рассмотрим свободную замкнутую систему, раскрученную относительно центра авторотации, смещенного относительно центра массы. Очевидно, что после отключения авторотации такая система, обладая степенью свободы вращения, не остановится, а продолжит по инерции вращаться – но уже относительно центра массы, двинувшегося – подобно камню, выпущенному из пращи – по касательной к окружности, описываемой им при включенной авторотации. Затем центр массы продолжит двигаться по инерции в том же направлении. Следовательно, поместив на свободную – например, находящуюся в невесомости или на плаву – платформу, по меньшей мере, две авторотирующие обмотки, расположенные по разные стороны от центра массы, можно, управляя ими изнутри, двигаться в нужном направлении. В принципе, этот же эффект можно получить, управляя одной смещенной авторотирующей обмоткой – если каждый раз дожидаться, когда ее центр, вращаясь относительно центра массы, сам займет нужную позицию, но вряд ли это целесообразно из-за неизбежного дисбаланса.

Этот неизвестный ранее способ перемещения в пространстве, который нельзя отнести ни к активным – требующим взаимодействия с другими телами, ни к реактивным – требующим расходования собственной массы (рабочего тела) и/или излучения энергии – можно считать предполагаемым открытием, поскольку впервые предложен физический принцип получения движения, не требующий взаимодействия с окружающим миром. В этом, однако, состоит не отрицание, а уточнение границ корректного применения запрета на иницированное изнутри замкнутой системы изменение положения ее центра массы: только – по прямолинейной траектории. Но поскольку вращательное движение является не относительным, а абсолютным, и феномен авторотации позволяет иницировать его изнутри, причем без привязки к центру массы системы, то на его перемещение по извилистой траектории, составленной из сопряженных дуг окружности и прямых (активных и пассивных участков траектории), этот запрет, судя по всему, не распространяется.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен новый физический принцип электромеханического преобразования энергии, основанный на расширенном Максвеллом понимании электрического тока путем включения в него альтернативных, по отношению к току проводимости, форм – токов смещения и конвекции.

2. Концептуальная реализация этого принципа в предложенном устройстве – ЭУС – убедительно свидетельствует, что на этом пути возможно создание настолько многообразных преобразователей энергии с уникальными возможностями, что его целесообразно принять за основу нового направления в электромеханике – максвелловской электромеханики.

## ССЫЛКИ

- [1] Лившиц В.И. Введение в максвелловскую электромеханику. – Известия Академии электротехнических наук, 21, 2019, с.33-49.
- [2] Вологдин В.П., Спицын М.А. Генераторы высокой частоты. – М.-Л.: ОНТИ, 1935.
- [3] Лившиц В.И. Электромеханический преобразователь электродинамической униполярной системы. Заявка на изобретение RU 2019110893, опубликована 12.10.2020, бюл. № 29.
- [4] Лившиц В.И. Электропривод электродинамической униполярной системы и галетный электродвигатель. Заявка на изобретение RU 2019125007, опубликована 08.02.2021, бюл. № 4.
- [5] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, том 6. – М.: Мир, 1966.
- [6] Лившиц В.И. Квазистатический электродинамический аппарат «синхродин». Заявка на изобретение RU 2005108969, опубликована 10.09.2006.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Лившиц Владимир Иосифович – к.т.н., доктор электротехники, чл.-корр. Академии электротехнических наук РФ. Адрес для переписки – 105318, г. Москва, Измайловское ш., д. 13, кв. 4, тел. +7(915)201-75-08. Руководитель группы патентования закрытого акционерного общества «Особое конструкторское бюро систем автоматизированного проектирования». Активный изобретатель, автор ряда изобретений, в т.ч. пионерных, запатентованных в России и ряде зарубежных стран в т.ч. США, Англии и Франции. Области научных интересов – электротехника и электроника.