

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВРАЩЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУРАХ И НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

В.И. Лившиц

ЗАО «Особое конструкторское бюро
систем автоматизированного проектирования»
Москва, Россия
e-mail: vl@okbsapr.ru

Выдвинута и обоснована гипотеза, согласно которой в распределенных индуктивно-емкостных структурах при протекании быстропеременных токов, в особенности сверхвысокой частоты (СВЧ), и при наличии соответствующих степеней свободы, происходит преобразование импульса и энергии электромагнитного поля в механические импульсы и энергию, проявляющееся как два вида вращений по двум взаимосвязанным физическим механизмам, имеющим в своей основе известные физические явления. Для первого вида – относительно слабого вращения структуры в целом (в режиме движителя) – электрическая конвекция, а для второго вида – относительно сильного вращения выделенной из структуры части (в режиме двигателя) – униполярная индукция. Данные эффекты, с одной стороны, логически следуют из законов электродинамики, с другой стороны – неожиданны, поскольку принято считать, что ни электрическая конвекция, ни униполярная индукция к технике переменных токов (тем более, к СВЧ-энергетике) отношения не имеют. Представлены аргументы против данной концепции, обоснована необходимость расширенного понимания этих явлений. Открытие указанных эффектов, условием которого является их экспериментальное подтверждение, может инициировать цепную реакцию научно-технического прогресса, став в итоге революционным. Поскольку СВЧ-энергетика позволяет сконцентрировать в минимальном объеме не только максимальную энергию, но и максимальный импульс электромагнитного поля, для электромеханики это будет означать возможность создания не только электроприводов с беспрецедентно высоким уровнем удельных энергетических показателей, но и новой продукции: движителей для космической техники, по внешним признакам – безопорных, но основанных на импульсе, циркулирующем внутри электромагнитного поля. В настоящей работе детально проработаны и представлены концептуальные решения данных промышленных продуктов.

Ключевые слова: инверторный электропривод, распределенная индуктивно-емкостная структура, СВЧ-энергетика, униполярная индукция, униполярный электродвигатель переменного тока, электромагнитный движитель, электромеханическое преобразование энергии, электрическая конвекция.

Для цитирования: Лившиц, В.И. Открытие электромагнитных вращений в распределенных индуктивно-емкостных структурах и новое направление в электромеханике // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2. С. 46-79.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_46

A DISCOVERY OF ELECTROMAGNETIC ROTATIONS IN DISTRIBUTED INDUCTIVE-CAPACITIVE STRUCTURES AND THE NEW DIRECTION IN ELECTROMECHANICS

V.I. Livshits

OKB SAPR JSC

Moscow, Russia

e-mail: vl@okbsapr.ru

Abstract. A hypothesis has been put forward and substantiated, according to which in distributed inductive-capacitive structures during the flow of fast-changing currents, in particular, microwave, and in the presence of appropriate degrees of freedom, the momentum and energy of the electromagnetic field are converted into mechanical momentum and energy, manifested as two types of rotations according to two interrelated physical mechanisms, which are based on known physical phenomena. Namely, for the first type – a relatively weak rotation of the structure as a whole (in the propulsion mode) – electrical convection, and for the second type – a relatively strong rotation of the part isolated from the structure (in the engine mode) – unipolar induction. Thus, these effects, on the one hand, logically following from the laws of electrodynamics, on the other hand, are unexpected: after all, it is believed that neither electrical convection nor unipolar induction have anything to do with the technology of alternating currents – especially, with microwave energy. Convincing arguments have been made that this is not the case, and the understanding of these phenomena needs to be expanded. It is all the more likely that if the discovery of these effects, the condition of which is experimental confirmation, takes place, then it will be revolutionary and initiate a chain reaction of scientific and technological progress. Since microwave energy makes it possible to concentrate in a minimum volume not only the maximum energy, but also the maximum pulse of the electromagnetic field, for electromechanics this will mean the possibility of creating not only electric drives with an unprecedentedly high level of specific energy indicators, but also new products: propulsion for space technology, by external signs - unsupported, but based on the pulse circulating inside the electromagnetic field. Conceptual solutions of such industrial products are worked out in detail and presented.

Key words: distributed inductive-capacitive structure, electromechanical energy conversion, electromagnetic propulsion, electric convection, unipolar induction, unipolar AC motor, inverter electric drive, microwave power engineering.

For citation: V.I. Livshits, “A discovery of electromagnetic rotations in distributed inductive-capacitive structures and the new direction in electromechanics”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 46-79, 2022.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_46

I. Введение

Интерес к электрической конвекции, активно изучавшейся в конце XIX – начале XX вв., в настоящее время почти полностью утрачен. В современной литературе при рассмотрении движения заряженных тел данное явление практически никогда не выделяют в отдельную физическую категорию. Это очевидно, например, при сравнении двух учебных пособий с одинаковым названием «Электричество», но изданных в разные годы: А. Эйхенвальда [1] и С. Калашникова [2]. В соответствующем разделе второго приведены те же иллюстрации, что и в первом, но совпадающие по смыслу тексты отличаются тем, что в них ни электрическая конвекция как таковая, ни токи конвекции не упоминаются. На понимании того, что движущиеся заряды независимо от их природы возбуждают магнитное поле, это не сказывается. Однако как быть, если требуется описать процессы во вращающейся обмотке распределенной LC -структуры, в которой концентрация свободных электронов – благодаря тому, что она является еще и электродом конденсатора – величина переменная, способная в обе стороны отличаться от равновесной, соответствующей электронейтральности?

Приведенный пример показывает, что движущееся тело для возбуждения магнитного поля не обязательно должно нести заряд постоянной величины и знака, что по умолчанию подразумевается в определении токов конвекции и считается достаточным: ведь ранее явление электрической конвекции изучалось лишь с целью экспериментального подтверждения факта возникновения магнитного поля при движении наэлектризованного тела. Согласно статье проф. А. Афанасьева (1878-1940) из энциклопедии Брокгауза и Ефрона [3], единственное, что для этого требовалось – привести в движение наэлектризованное тело и зарегистрировать его магнитное действие. Это и было успешно осуществлено Роуландом в 1876 г., а затем многократно перепроверено другими учеными. Наиболее информативными считаются опыты А. Эйхенвальда, подтвердившие также магнитное действие токов смещения, вопрос о существовании которых неразрывно связан с первым. Но лишь в одном из этих опытов, поставленном Кремье по предложению Пуанкаре в 1900 г. и затем успешно повторенном Пендером, вместо прямого – магнитного действия (отклонение магнитной стрелки) токов конвекции, изучалось их индукционное действие (возбуждение электрического тока), естественно, согласно закону электромагнитной индукции, при их изменении. Изменение токов конвекции осуществлялось ступенчато: включением/выключением, причем возбуждение тока изучалось не в том же

проводнике, который являлся подвижным наэлектризованным телом, что, в принципе, было бы не менее естественным, а в близко расположенном.

В дальнейшем это направление не получило развития: по-видимому, не только вследствие того, что задача исследований была решена, но и в связи с отсутствием в то время технических средств, позволяющих, усовершенствовав методику, расширить ее постановку. Между тем, интересно было бы изучить и обратную возможность: не переменным током конвекции возбуждать ток проводимости, а изменяющимся током проводимости возбуждать ток конвекции, приводя тем самым наэлектризованное тело в движение. Поскольку электрическое поле, возникающее при изменении тока проводимости, является вихревым, не имеющим начала и конца, то такое движение выглядело бы «безопорным», противореча закону сохранения момента импульса, однако отрицательный ответ на возможность его существования поставил бы под сомнение законы электродинамики. Налицо явный парадокс, каждый из которых, как известно, бывает в физике только кажущимся. Однако сведений о натуральных экспериментах, поставленных для его разрешения, нет. Считается, что они и не требуются: достаточно мысленного эксперимента с интерпретацией его результатов, предложенной лауреатом Нобелевской премии Р. Фейнманом [4] (рис. 1).

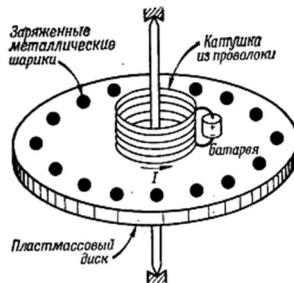


Рис. 1. Кажущийся электродинамический парадокс [4, рис. 17.5]

Fig. 1. Apparent electrodynamic paradox [4, fig. 17.5]

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. Очевидно, что это и будет случай возбуждения тока конвекции изменяющимся током проводимости. При этом Р. Фейнман не отрицает, что так и произойдет, и приводит эту модель для иллюстрации того, что законы сохранения в электродинамике действуют в системе «вещество

+ поле», а только для вещества или только для поля они могут не выполняться. Очевидно также, что эта модель унаследовала от описанного выше опыта Кремье-Пендера все присущие ему искусственные ограничения: наэлектризованное тело (шарики) несет постоянный заряд; изменение первичного тока (проводимости) ступенчатое, а возбуждение вторичного тока (конвекции) регистрируется не в носителе первичного тока (обмотке), а в отдалении, причем, судя по рис. 1, весьма значительном. Тот факт, что ток проводимости в принципе способен возбуждать ток конвекции, описанная модель доказывает. Но о каких практических применениях этого эффекта может идти речь, если возбуждаемый ток представляет собой не вращение, а краткий одиночный импульс, причем весьма слабый?

Заменим теперь систему «электронейтральная обмотка + заряженные шарики» распределенной LC -структурой, упомянутой еще выше. Ее пример показывает, что принимаемое по умолчанию понимание электрической конвекции как результат движения тел, несущих постоянный заряд, неполно, поскольку магнитное поле способно возбуждаться и движением тел, несущих осциллирующие по величине и знаку заряды, каковыми являются, в частности, обмотки распределенной LC -структуры (в теории электромагнитного поля под осциллирующим зарядом принято понимать заряд, совершающий осциллирующее движение; далее в тексте это уточнение опущено). Из этого следует, что их равномерное вращение тоже соответствует переменному току конвекции, который в известных опытах получался путем изменения скорости вращения постоянных зарядов. Это понимание, по видимому, является новым, иначе трудно объяснить, почему подобные эффекты не были предсказаны ранее. С учетом же того, что обмоткам распределенной LC -структуры присуще, наряду с емкостным, и индуктивное действие, причем наиболее сильное по отношению к самим себе (т.н. самоиндукция), становится очевидным, что для возбуждения в них токов конвекции (т.е. приведения во вращение) нет необходимости привлекать сторонние обмотки: значительно эффективнее это могут сделать токи проводимости, циркулирующие по ним же. Поэтому, определив переменный ток конвекции через равномерное движение осциллирующего заряда, резонно определить и две индуктивно связанные токовые моды – кондукционную (электрический ток) и конвекционную (механическое вращение) – способные сосуществовать в одной вращающейся обмотке и взаимно обмениваться энергией.

Во вращающейся обмотке возможна и третья токовая мода – инерционная – обусловленная тем, что свободные электроны обладают инертной массой (т.н. эффект Толмена-Стюарта). Однако в установившихся режимах вращения (при отсутствии углового ускорения) условий для ее проявления нет.

Следовательно, неисследованные в этом аспекте распределенные LC -структуры имеют огромный потенциал, заключающийся, по меньшей мере, в реальной возможности создания нового вида продукции – двигателей вращения на новом для электромеханики физическом принципе: электрической конвекции в ее расширенном понимании. Это представляется убедительной причиной для того, чтобы «реабилитировать» это явление как отдельную физическую категорию и вновь вернуться к его исследованию уже на новом научно-техническом уровне.

II. Электромагнитные двигатели на принципе электрической конвекции и их физическая модель

С примером конкретного исполнения такого двигателя можно ознакомиться в [5], содержащем ссылки на выложенные на сайте Роспатента заявки на изобретения, поэтому детально описывать его конструкцию и принцип действия нет смысла. Целесообразно рассмотреть новую концепцию – последовательного возбуждения – позволяющую не только радикально его упростить, но и построить наглядную физическую модель, на которой можно будет провести эксперименты, логическим продолжением поставленных более века назад хрестоматийные опыты А. Эйхенвальда.

Согласно [5], для внесения в обмотку распределенной LC -структуры заряда, осциллирующего синхронно с осцилляциями протекающего тока, необходим источник ЭДС, сторонний по отношению к токообразующему. Поскольку распределенная LC -структура содержит, по меньшей мере, две обмотки, то такой вариант независимого возбуждения при всей широте возможностей, сложен в реализации, поскольку требует питания от трех гальванически развязанных синхронизированных источников: двух намагничивающих и одного заряжающего.

Далее, удалось установить, что аналогичный результат может быть достигнут значительно проще и не менее эффективно. Этому способствовали конструктивные замечания, высказанные проф. В.Я. Гечей (НИИЭМ) при обсуждении данного варианта, в результате чего было предложено последовательное возбуждение, целесообразное для моторных применений. Оно обеспечивается подключением к двум обмоткам одного источника питания (токообразующего и заряжающего одновременно) – так, чтобы его ЭДС была приложена непараллельно токам, протекающим через обмотки. Продольная составляющая ЭДС обеспечивает прохождение тока по обмотке, а поперечная составляющая ее же, частично отклоняя поток свободных электронов в сторону и связывая их электрическим полем, заряжает обмотку. Перпендикулярность, предельный случай непараллельности, получается при включении обмоток асимметрично: через внешние выводы обмоток извне и распределенную емкость между обмотками изнутри LC -

структуры. Внутренние выводы обмоток свободны. В этом случае уменьшающиеся, благодаря боковым ответвлениям, вплоть до нуля на подходе к свободным внутренним выводам, токи через обмотки продвигаются электрическим полем, перпендикулярным обмоткам. Асимметричное подключение возможно по двум вариантам: 1) при расположении подключенных и свободных выводов разных обмоток на одних краях; 2) при расположении на каждом из краев подключенного вывода одной обмотки и свободного вывода другой.

С другой стороны, очевидно, что даже в витках обычных соленоидов при высокочастотном (ВЧ) питании не может быть строгой параллельности между током и ЭДС, поскольку существуют межвитковые и межслойные емкости, превращающие их по существу в распределенные LC -структуры. Поэтому не исключено, что и у них тоже должна быть тенденция к вращению, но, вероятнее всего, настолько слабая, что экспериментально ее зарегистрировать проблематично.

Физическая модель электромагнитного движителя на описанном принципе, позволяющая воспроизвести и экспериментально изучить первый вид электромагнитных вращений в распределенных LC -структурах, изображена на рис. 2, а ее укрупненный сегмент – на рис. 3. Поскольку предстоит регистрация весьма слабых вращающих моментов, модель помещена под прозрачный колпак, защищающий от движений окружающего воздуха, а ее движущаяся часть – каретка – подвешена на одной игольчатой опоре, расположенной выше центра тяжести. Сверху закреплены балансировочные грузики, регулировкой положения которых можно устранить биения каретки при ее вращении. Собственно движитель – распределенная LC -структура – представляет собой максимально отдаленный от оси восьмигранный обод, окружающий каретку. Между внутренней обмоткой 1 и внешней обмоткой 2 в виде зеркально симметричных спиралей помещен активный диэлектрик в виде основных брусков 3 призматического поперечного сечения, выполненных из материала, целесообразно – с повышенными значениями диэлектрической и/или магнитной проницаемостей (ϵ , μ), например, из феррита.

С внешней и внутренней сторон обмоток к ним примыкают вспомогательные бруски 4 и 5 из того же материала, назначение которых – замыкание внешних ветвей магнитных потоков, образуемых обмотками при пропускании тока. Их толщина выбрана меньше толщины брусков 3, поскольку по брускам 4 и 5 проходят лишь части магнитного потока, проходящего по брускам 3. Сверху внутри LC -структуры закреплен отбортованный несущий диск 6, а снаружи ее боковая поверхность стянута витым биндом 7, обеспечивающим жесткость конструкции.

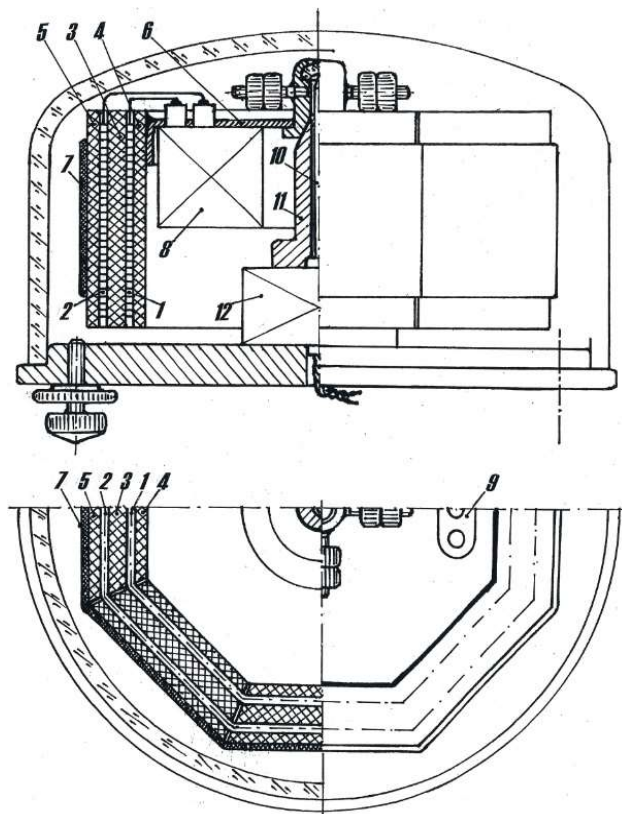


Рис. 2. Физическая модель электромагнитного движителя

Fig. 2. Physical model of the electromagnetic propulsion

Под несущим диском по центру закреплен кольцеобразный блок ВЧ генератора 8 с автономным источником питания, подключенный к обмоткам по первому из вышеуказанных вариантов – к двум обмоткам с одного (верхнего) края, а нижние точки обмоток свободны. Целесообразно, чтобы генератор обеспечивал резонансный режим работы распределенной LC -структуры, для чего последняя должна служить частотозадающим элементом его схемы. Генератор управляется через оптический порт 9, содержащий приемный фотодиод и индикаторный светодиод, отображающий состояние генератора. Направляя на него, без снятия колпака, инфракрасный пульт дистанционного управления (например, от TV), генератором можно управлять, не оказывая на каретку механического воздействия.

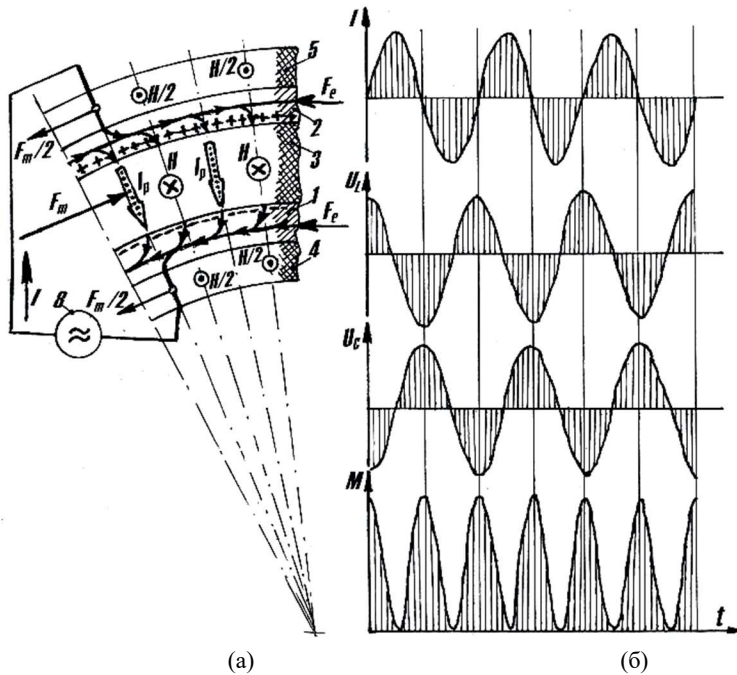


Рис. 3. Сегмент физической модели электромагнитного движителя (а) и физический принцип образования вращающего момента электрической природы (б)

Fig. 3. The segment of physical model of the electromagnetic propulsion (a) and the physical principle of the generation of the torque of an electric nature (b)

Опорная игла 10 каретки пропущена через центральное отверстие в стойке 11, установленной на блоке электромагнитного арретира и вибратора 12, провода управления которым выведены наружу. При арретировании опорная игла опускается вниз, благодаря чему каретка плотно сопрягается по коническим поверхностям со стойкой и выравнивается. Вибрированием поднятой иглы можно свести трение в опоре к нулю, если вибрация будет такой, что амплитудное значение ускорения превысит ускорение свободного падения. Левитирующий режим каретки позволяет смоделировать работу движителя в космических условиях, для которых он предназначен. Следует учитывать, что электромагнитный поворот каретки будет проявляться на фоне углового смещения неподвижных частей модели под действием суточного вращения Земли, подобно маятнику Фуко.

Прохождение тока через обмотки происходит вследствие перезаряда распределенной емкости между обмотками, а значит, накопления в обмотках связанных зарядов, попадающих в то же самое вихревое электрическое поле, что и свободные заряды рис. 3(а). В то же время силы, действующие на связанные заряды обмоток со стороны первичного (токообразующего) поля, привязаны к их выводам, они являются внутренними и не могут противодействовать внешним силам со стороны вихревого поля, обладающего собственным импульсом. Поскольку и напряженность вихревого поля (пропорциональная ЭДС самоиндукции U_L), и связанный заряд (пропорциональный напряжению между обмотками U_C), в свою очередь, пропорциональны по модулю производной по времени от протекающего тока I , они оказываются осциллирующими в противофазе, обеспечивая возможность индуцирования конвекционной токовой моды кондукционной формированием сил электрической природы F_e .

Непрерывность вращения распределенной LC -структуры достигается тем же путем, что и у якоря коллекторного двигателя, питаемого переменным током: неизменностью результатов силового взаимодействия при синхронном изменении знаков обоих сомножителей, определяющих силы. Во втором случае это магнитодвижущие силы якоря и индуктора (природа движущих сил – магнитная), здесь же это связанные заряды обмоток и воздействующие на них вихревые поля (природа движущих сил – электрическая). Поскольку для разных обмоток противоположны знаки обоих сомножителей, их вращающие моменты одинаковы. В итоге суммарный момент M пульсирует с двойной частотой тока I и имеет огибающую, функции $y = \sin^2 x$, причем его пики приходятся на моменты прохождения тока через ноль, т.е. когда и связанные заряды обмоток, и напряженности вихревых полей достигают амплитудных значений (рис. 3, б).

Амплитудные значения токов, протекающих при работе ВЧ генератора через обмотки распределенной LC -структуры, в отличие от обмоток обычных соленоидов, непостоянны по длинам проводов, а изменяются от максимума в начальных участках до нуля в конечных. Однако, в связи с постоянством направления протекания, это обстоятельство сказывается на их индуктивном действии лишь количественно, ослабляя его, приблизительно, вдвое. Это может быть скомпенсировано уплотнением укладки проводов по мере приближения к концам – тем более что уменьшение там плотности тока позволяет уменьшить и их сечения. Но технологически это выполнимо лишь на печатных обмотках, рассматриваемых ниже.

Принципиальным является вопрос выбора оптимальной величины зазора между обмотками, задаваемого толщиной основных брусков из активного диэлектрика, с учетом значений ϵ и μ их материала – так, чтобы

связанные заряды каждой из обмоток попадали бы, в основном, в собственные вихревые поля, а не во встречно направленные поля смежных обмоток. Этот параметр оптимизируем, поскольку при крайних его значениях движитель теряет работоспособность: при чрезмерно малых – вследствие взаимоничтожения вихревых полей обмоток, а при чрезмерно больших – вследствие малости величин их зарядов.

Активный диэлектрик целесообразно выбирать с повышенными значениями как μ , так и ϵ для того, чтобы он успешно работал не только в качестве магнитного экрана, но и активной среды конденсатора. Наиболее рациональным выбором для первых опытов является ВЧ феррит, оптимальный же вариант – относительно новые материалы – мультиферроики, сочетающие свойства ферромагнетиков и сегнетоэлектриков: очень большие значения как μ , так и ϵ [6].

Таковы процессы, имеющие в своей основе электрическую конвекцию, протекающие внутри обмоток и обеспечивающие относительно слабое (в связи с электрической природой), но не требующее вещественной опоры, вращение распределенной LC -структуры как одного целого – в режиме движителя. Вращающие моменты, которые представляется возможным получить таким путем, при всей их малости, выглядят все же соизмеримыми с теми, которые обеспечивает одна из наиболее простых, экономичных, и надежных систем ориентации искусственных спутников Земли (ИСЗ) на орбите – созданием управляющих моментов путем взаимодействия обмоток-актуаторов, питаемых током от солнечных батарей, с геомагнитным полем [7]. Такие системы работоспособны лишь на низких орбитах, где геомагнитное поле достаточно сильное, а на высоких, в частности, геостационарных орбитах, как правило, используемых для размещения спутников связи, они неприменимы. Здесь же этих ограничений нет. Кроме того, установив, по меньшей мере, два электромагнитных движителя вне центра массы ИСЗ, можно не только управлять его ориентацией по углу, но и изменять высоту орбиты по составленной из сопряженных дуг окружности извилистой траектории, на которую не распространяется запрет на изменение положения центра массы замкнутой системы изнутри.

III. Униполярная индукция – явление, сопутствующее электрической конвекции в распределенной LC -структуре

Значительно более сильные (в связи с их магнитной природой) процессы, имеющие в своей основе униполярную индукцию, в распределенной LC -структуре протекают в зазоре между обмотками – в описанной модели внутри основных брусков из активного диэлектрика). Проявление в них униполярной индукции возможно потому, что эти бруски, с одной стороны, намагничены вдоль, с другой – поперек них проходит тот же самый непрерывный ток, который, проходя по обмоткам, намагнитил бруски. Причем

изменение внутри брусков формы тока – из тока проводимости I в ток поляризации I_p (рис. 3 а), – на его магнитном действии не сказывается, что также было опытным путем подтверждено А. Эйхенвальдом. Этот вид электромагнитных вращений, неразрывно связанный с первым, также заслуживает подробного рассмотрения в силу его потенциальной значимости.

Явление униполярной индукции состоит в том, что в намагниченном теле, движущемся непараллельно оси намагничивания, возникает ЭДС, направленная перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы магнитной индукции и скорости движения тела [8]. По этому принципу действуют униполярные генераторы. Униполярные двигатели используют его обратимость – ток, пропущенный через намагниченное тело непараллельно оси намагничивания, при необходимых условиях приводит его в движение перпендикулярно плоскости, в которой расположены векторы тока и магнитной индукции. Такая ситуация, как было показано выше, складывается в диэлектрических брусках модели. Вопрос лишь в том, складываются ли в них необходимые условия движения? Ответ, конечно, отрицательный, поскольку для движения необходимо как минимум наличие соответствующей степени свободы, отсутствующей в пределах каретки модели, ведь униполярная индукция подчиняется принципу относительности, согласно которому ЭДС в движущемся теле возникает лишь с точки зрения неподвижного наблюдателя, а в униполярных двигателях возможно лишь относительное вращение, т.е. при подведении тока с неподвижной позиции, способной воспринять реактивный вращающий момент.

Неожиданная параллель, которую можно провести между униполярной индукцией и электрической конвекцией, состоит в том, что в современной литературе предпочитают избегать этот термин, считая его неудачным. Представляется, что аналогичны и причины – ограниченное по умолчанию понимание этого явления как относящегося только к технике постоянного тока, использующей постоянные по направлению вектора магнитной индукции магниты. Постоянными принято считать магниты из заранее намагниченного магнитотвердого ферромагнетика, но в указанном смысле постоянным является и электромагнит с обмоткой, питаемой постоянным током. Различает же их то, что это ограничение для униполярной индукции – дань традиции. Объективные причины для отнесения униполярных машин к машинам постоянного тока отсутствуют, их отличает от универсальных по отношению к роду тока машин с чередующимися полюсами инвариантность поля по отношению к угловому перемещению ротора. Известно предложение считать таким отличием однородность поля в рабочем зазоре. Под эту формулировку подпадают и дисковые (торцевые) исполнения униполярных машин, силовое поле которых, будучи осесимметричным, неоднородно: его

индукция возрастает обратно пропорционально радиусу) силового (в частности, магнитного) поля. В действительности униполярные машины переменного тока были изобретены в СССР более 70 лет назад [9] и считались перспективным типом генераторов сверхнизких частот ($0,3 \div 1,1$ Гц) для электромагнитного перемешивания жидких металлов [10]. Их особенность в том, что генерируемая частота от скорости вращения ротора не зависит: они служат электромашинными усилителями мощности, подаваемой в цепь возбуждения. Известно, что отсутствие зависимости генерируемой частоты от скорости вращения ротора присуще и используемым в генераторном режиме универсальным коллекторным машинам. Трудности коммутации, однако, никогда не позволили бы получить токи тех же величин, которые способен пропустить непрерывным током униполярных генераторов. Поэтому в данном качестве до появления силовой полупроводниковой электроники они были вне конкуренции. Вторая уникальная особенность униполярных машин в том, что их безобмоточный ротор практически безындукционный и позволяет иначе воспользоваться первой особенностью: получать сколь угодно малые скорости вращения (вплоть до нулевых – в моментных двигателях) при беспрецедентно высоких для электромеханики частотах питания (вплоть до сверхвысокой частоты (СВЧ)), ограниченных только волновыми процессами в обмотках индуктора. Именно с этой, пока не нашедшей применения, особенностью униполярных машин связаны уникальные возможности, которые открываются при их исполнении в виде распределенных LC -структур, питаемых токами СВЧ. Эти особенности будут описаны далее.

Другим, распространенным не только среди дилетантов заблуждением в отношении униполярных машин, является то, что, по крайней мере, в некоторых из них третий закон Ньютона не соблюдается. Однако простой здравый смысл подсказывает, что столь аномальное поведение машин, которые применяются в течение долгого времени, не оставалось бы незамеченным. Несмотря на обилие убеждающих в этом публикаций, объективного подтверждения пока нет. Имеются демонстрации якобы аномального вращения ротора униполярных двигателей, у которых статор в привычном понимании, т.е. с закрепленными магнитами, отсутствует. Последовательное применение к ним законов электродинамики убеждает, что вращение магнитов вместе с ротором не препятствует выполнению третьего закона Ньютона. Покажем на модели (рис. 3, а), что относительно сильные проявления униполярной индукции не препятствуют слабым проявлениям электрической конвекции, обеспечивающим режим движителя вращения.

Ток I от источника \mathcal{E} , циркулируя по замкнутому контуру, на разных его участках меняет форму: переходит из тока проводимости, сосредоточенного в проводах обмоток и выводах, в равный ему по величине радиальный

ток поляризации I_p , распределенный по веществу активного диэлектрика внутренних брусков 3. Обмотки 1 и 2 формируют скрещенные с этими токами аксиальные магнитные потоки, полные в основном бруске 3 и половинные во вспомогательных брусках 4, 5, поскольку магнитный поток, замыкаясь через них, разделяется на две параллельные ветви. Следовательно, полная сила магнитной природы F_m , приложенная к основному бруску 3, компенсируется двумя аналогичными по природе половинными силами $F_m/2$, приложенными к выводам обмоток 1, 2, направленными навстречу первой потому, что сцепленные с этими токами магнитные поля напряженностью H и $H/2$ тоже встречные. Эти силы и создают момент, противодействующий моменту, стремящемуся привести в движение основные бруски из активного диэлектрика, тот самый реактивный момент, который обеспечивает выполнение третьего закона Ньютона. Но поскольку обмотки вместе со своими выводами скреплены с брусками, проявления униполярной индукции в этой модели латентны и приводят к внутренним механическим напряжениям сдвига, не переходящим во вращение в связи с отсутствием необходимой степени свободы. Чтобы их актуализировать, необходимо так трансформировать описанную модель, чтобы добавить ей внутреннюю степень свободы – относительного вращения. Для этого нужно выделить из нее часть, способную вращаться – ротор.

IV. Электродинамическая униполярная система (ЭУС) – основа практических конструкций электромеханических преобразователей энергии через инвариантное по отношению к угловому перемещению ротора электромагнитное поле, осциллирующее на СВЧ

Варианты реализации распределенной LC -структуры с двумя степенями свободы, которую предложено именовать ЭУС, а также некоторые конструкции электромеханических преобразователей энергии на ее основе для случая независимого возбуждения описаны в [5]. Поэтому в этом разделе целесообразно рассмотреть их тоже в плане новой концепции, концепции последовательного возбуждения, послужившей конкретным техническим решением задачи создания таких преобразователей, которая ранее фактически была лишь поставлена. В описанном цилиндрическом варианте конструктивного исполнения распределенной LC -структуры тоже можно выделить ротор: в виде помещенного с двойным радиальным зазором полого цилиндра из активного диэлектрика. Значительно более широкими функциональными возможностями обладает дисковый вариант, где обмотки выполнены в виде плоских спиралей (Архимеда), между которыми с двойным аксиальным зазором помещен радиально намагниченный диэлектрический диск. Этот вариант может также рассматриваться как результат ряда преобразований конструктивной схемы простейшей дисковой униполярной машины с вращающимся ротором-магнитом (рис. 4).

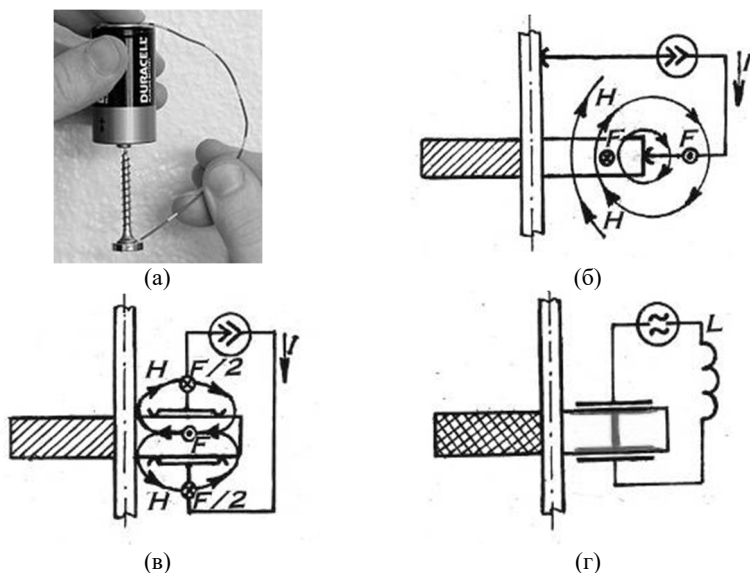


Рис. 4. Ряд преобразований простейшей дисковой униполярной машины

Fig. 4. A series of transformations of the simplest disk unipolar machine

Прототип, известный по легко повторяемому опыту (рис. 4, а), характеризуется конструктивной схемой (рис. 4, б), где показаны замкнутые силовые линии ротора (напряженности магнитного поля H), пересекаемые током I от источника дважды: в роторе и в подводящем проводнике, с образованием двух встречно направленных сил F : активной и реактивной. Под их действием ротор вращается согласно третьему закону Ньютона. В электромеханике корректно дуально-инверсное преобразование: токи и магнитные потоки можно менять местами без потери работоспособности машины. Применив его к прототипу, получим конструктивную схему (рис. 4, в), в которой ротор намагничен радиально, а ток, подводимый к ротору через развитые по площади скользящие контакты, проходит через него аксиально, по-прежнему сохраняя баланс активной и реактивной сил – только теперь реактивная сила, в результате разделения магнитного потока вне ротора на две параллельные ветви, складывается из двух половинных составляющих $F/2$. Поскольку в результате получились скользящие контакты максимально возможных площадей, появилась возможность эффективной замены их емкостными контактами с одновременной заменой источника постоянного

тока на источник переменного, а радиально намагниченного металлического ротора – на диэлектрический (рис. 4, з). Сквозь ротор могут быть пропущены электропроводные стержни, а на торцах расположены емкостные электроды, не образующие КЗ витков, что не обязательно, а на СВЧ вредно: магнитного действия привязанного к веществу активного диэлектрика тока поляризации достаточно [11]. Поскольку активных потерь в емкостных контактах через воздушные зазоры нет, они в принципе могут работать даже эффективней жидкометаллических в резонансном режиме, когда их емкостные сопротивления компенсируются индуктивным сопротивлением цепи циркуляции тока, условно сведенным на (рис. 4, з) к внешней индуктивности L . Оптимально, если резонансный режим обеспечивается индуктивностью обмоток распределенной LC -структуры, радиально намагничивающих ротор.

Различные модификации последнего варианта этой конструктивной схемы с детализацией до элементов распределенной LC -структуры – ЭУС, различающиеся по числу внешних выводов, изображены на рис. 5.

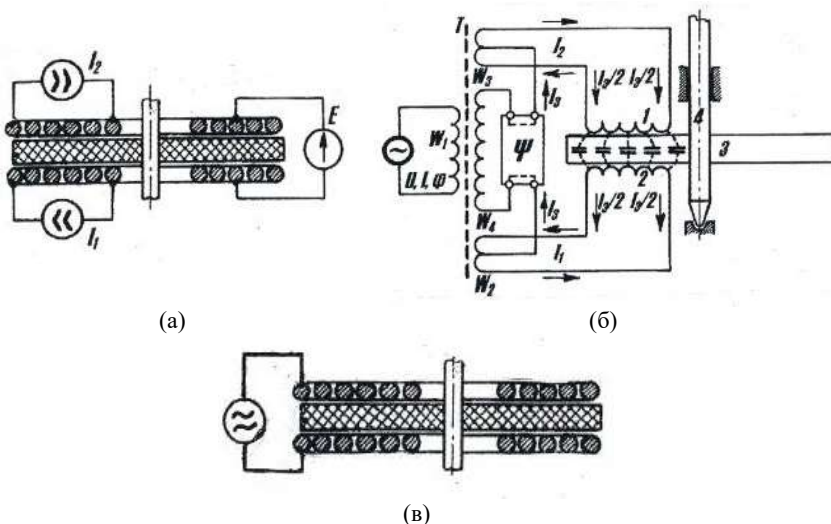


Рис. 5. Модификации ЭУС с различными вариантами обмоток индуктора: 3 вывода, min 4 слоя (а); 2 вывода, min 2 слоя (б); 1 вывод, min 1 слой (в)

Fig. 5. Modifications of EUS with different variants of inductor windings: 3 pins, min 4 layers (a); 2 pins, min 2 layers (b); 1 pin, min 1 layer (c)

Особенность ЭУС состоит в том, что в ней отдельные емкостные электроды отсутствуют, а обмотки, составляющие распределенную LC-структуру, образуют электромагнитный индуктор, радиально намагничивающий ротор и подающий аксиальный ток. Развязка его магнитного действия с электрическим (условие независимости возбуждения), при отсутствии отдельных емкостных электродов, достигается разделением аксиального тока на две параллельные ветви, магнитные поля которых компенсируются. В варианте 5 (а) это разделение происходит непосредственно в обмотках, подключенных к источнику заряжающей ЭДС E своими средними точками, а к источникам намагничивающих токов I_1 и I_2 крайними точками. В варианте 5 (б) вторичная обмотка W_4 согласующего трансформатора T , являющаяся источником заряжающей ЭДС, подключена к средним точкам вторичных обмоток W_2 и W_3 – источникам намагничивающих токов, подключенным к обмоткам индуктора крайними точками – фазоповоротную схему Ψ , задающую нужные фазовые соотношения [11].

Изображенные на рис. 5 модификации ЭУС – принципиальные схемы, эффективности которых для промышленного применения явно недостаточно из-за того, что их магнитная цепь разомкнута. Основу практических вариантов двигателей на базе ЭУС составляют пакетированные конструкции с замкнутой магнитной цепью, для которых критически важное значение имеют толщины обмоток индуктора, образующих немагнитные зазоры. Поскольку их внешние выводы могут располагаться снаружи (внутри проходит вал), трехвыводные обмотки (рис. 5, а), должны быть, как минимум, четырехслойными, а двухвыводные (рис. 5, б) – двухслойными.

Второй вариант не только существенно эффективней первого, но и гораздо технологичней, поскольку позволяет выполнять обмотки индуктора в виде тонких двусторонних печатных плат – статорных галет [12]. Однако очевидно, что он допускает возможность работы на ВЧ, но никак не на СВЧ (более 10^8 Гц), где двухслойные обмотки принципиально неприменимы из-за утечек тока через межслойные емкости. В этом плане переход на последовательное возбуждение ЭУС и одновыводные однослойные обмотки индуктора с крайне малыми паразитными емкостями (рис. 5, в) качественно меняет ситуацию, поскольку позволяет приблизиться к частоте внутреннего резонанса ЭУС, оптимальной по уровню удельных энергетических показателей. Субгигагерцевые ее значения определяются малостью как межобмоточных емкостей через двойной аксиальный зазор и диэлектрик ротора, так и собственных индуктивностей обмоток, которые, образуя немагнитные зазоры в магнитной цепи, не могут быть чрезмерно толстыми. В принципе, путем включения последовательно с ЭУС внешней индуктивности, резонансную частоту можно понизить до любой заданной величины – но если ее значение будет многократно превышать собственную индуктивность

ЭУС, то это окажется энергетически неэффективным.

В приведенном примере такой обмотки (рис. 6) она представляет собой кольцевую двустороннюю печатную плату (в конструктивно-технологическом отношении, одновыводные печатные обмотки целесообразно выполнять двухслойными: состоящими из зеркально-симметричных плоских спиралей, расположенных с обеих сторон несущей диэлектрической мембраны. Поскольку обе спирали соединены в начальных точках, в электрическом отношении такие обмотки – далее называемые симметричными – однослойные) с основой – несущей мембраной – из тонкого диэлектрика, по диаметру которой расположены два выступа с отверстиями для прохождения стержней статора. Центральное отверстие предназначено для прохождения вала ротора. Проводниковые рисунки – плоские спирали, начинающиеся с правого по рис. 6 выступа – зеркально симметричны: первый рисунок совпадает с проекцией второго, и наоборот. Левый по рис. 6 выступ для прочности с обеих сторон металлизирован, но электрически со спиралями не связан.

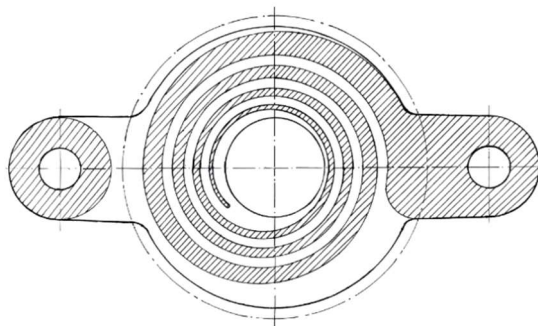


Рис. 6. Одновыводная симметричная обмотка СВЧ индуктора ЭУС (штрихпунктирная окружность – проекция края ротора)

Fig. 6. Single-contact symmetrical winding of the electrodynamic unipolar system SHF inductor (dash-dotted circle – projection of the rotor edge)

Неравномерная токовая нагрузка на проводник – убывающая от максимума в начале до минимума в конце – позволяет сделать ширину проводника и шаг спирали переменными: уменьшающимися по мере приближения к центру. Прогрессивная обмотка позволяет частично компенсировать потерю индуктивного действия, связанную с постепенным убыванием тока, текущего по ее виткам. Зазор же между витками, для уменьшения межвитковых емкостей, следует уменьшать в меньшей степени или сохранять по-

стоянным. С другой стороны, переменная ширина проводника обмотки влечет неравномерность его емкостного действия: максимальную у краев, где проводник шире, и минимальную у центра, где проводник уже. Если не принять специальных мер, то внутренняя часть обмотки будет работать неэффективно, поскольку ток до нее практически не дойдет, ответвившись, в основном, от крайних витков.

Мера, способная этому воспрепятствовать, очевидна – чечевицеобразное профилирование роторных дисков, в результате чего аксиальные зазоры между индукторами и роторами становятся клиновидными: плавно убывающими от краев к центру. Чечевицеобразные роторы целесообразны и по другим соображениям – в частности, механической прочности, поскольку они способны выдержать большие угловые скорости без разрушения под действием центробежных сил, чем плоские роторы.

В итоге требования к электромеханической части электроприводов на базе ЭУС, для которых можно прогнозировать достижение беспрецедентно высоких для электромеханики удельных энергетических показателей, следующие.

1. Пакетное построение, при котором весь активный диэлектрик сосредоточен в роторных дисках, окружающих каждую из обмоток индуктора с двух сторон. Благодаря этому, используются прямая и обратная ветви коллинеарного обмотке магнитного потока и обе составляющие ортогонального обмотке электрического поля – от каждой из сторон проводника. Это оптимальное по соотношению «поверхность рабочих зазоров / занимаемый объем» построение подобно многоступенчатым осевым турбинам, где роторные диски – аналоги рабочих колес, а обмотки индуктора – направляющих аппаратов. Учитывая инвариантность электромагнитного поля в зазорах, присущую униполярным системам, теоретический предел эффективности использования объема и массы активных материалов двигателя достигнут.

2. Симметричные одновыводные обмотки индукторов с прогрессивным шагом и переменной шириной проводника – убывающей к центру. При этом плотность тока в проводнике поддерживается на одном уровне на всех его участках.

3. Чечевицеобразные роторные диски и клиновидные рабочие зазоры, выравнивающие по длине погонную емкость и волновое сопротивление $[Z = (L/C)^{1/2}]$ печатных проводников разной ширины, обеспечивая центростремительное распространение энергии поля без отражений.

4. Питание током с частотой, приближающейся к частоте собственного резонанса ЭУС, которая, как показывают оценки, должна лежать вблизи нижней границы СВЧ диапазона в субгигагерцевой области.

Последний фактор, наряду с вышеупомянутыми, способствует достижению рекордно высоких удельных энергетических показателей двигателя, поскольку, чем выше частота осцилляций электромагнитного поля, тем, при прочих равных условиях, больше его плотность энергии – в этом и состоит первопричина преимуществ СВЧ-энергетики [13]. Однако единственное, что пока удается совершать при помощи СВЧ-энергии (кроме ее основных применений для целей радиолокации и связи) – нагревать тела и ускорять заряженные элементарные частицы в технике физического эксперимента. Техническое решение, впервые позволяющее распространить ее преимущества на электромеханику, рассмотрено далее.

V. Концепция интегрального инверторного электропривода

СВЧ-энергия не может столь же просто и эффективно, как обычный переменный ток, передаваться по проводам на дальние расстояния. Однако есть примеры систем, где таких проблем не существует, поскольку в них генератор и потребитель СВЧ энергии – промежуточной ступени преобразования энергии других видов – расположены вплотную. Таковы преобразователи постоянного напряжения (ППН), трансформация которого возможна только через промежуточную ступень переменного тока.

Поскольку массогабаритные показатели трансформатора тем лучше, чем выше его рабочая частота, естественно, что частоты переменных токов, используемых в промежуточных ступенях ППН со схемами на кремниевой элементной базе, гораздо выше промышленных и уже составляют десятки, а то и сотни кГц. Знаковым событием в этом плане стала разработка и освоение американской корпорацией *Efficient Power Conversion Corporation (EPC)* серийного выпуска мощных нитрид галлиевых (*GaN*) транзисторов с улучшенной структурой – *eGaN@FET*, а также интегральных сборок полумостовых схем на их основе, которые уже потеснили силовые кремниевые *MOSFET* в ряде приложений. Переводя промежуточную ступень преобразования энергии в СВЧ диапазон, применение этих приборов, в частности, в ППН, дает столь существенный выигрыш по многим показателям, как массогабаритным, так и термической и радиационной стойкости, что после их появления специалисты стали предсказывать скорый конец эры кремния в преобразовательной технике [14]. Имеются сведения и об аналогичных отечественных разработках [15].

В электромеханике аналогом ППН является один из самых распространенных типов электроприводов – инверторный, у которых между начальным видом энергии – электрическим, и конечным – механическим, имеется ступень переменного тока. Применяемые двигатели – как правило, синхронные машины переменного тока, скорость вращения которых определяется частотой. По этой причине инверторный электропривод отличается от ППН тем, что частота ступени переменного тока у него может быть

выбрана только на основе требуемой скорости вращения, и потому на практике получается на много порядков ниже, чем у ППН, со всеми вытекающими негативными последствиями.

Использование в инверторном электроприводе двигателя ЭУС, скорость вращения которого от частоты не зависит (более того, чем эта частота выше – с учетом рассматриваемых далее ограничений со стороны волновых процессов в ЭУС, не позволяющих повышать ее беспрестанно – тем лучше), позволяет создать электропривод принципиально нового типа: инверторный и интегральный одновременно. F^2Drive является интегральным потому, что у него электромеханическая часть – преобразователь – не является пассивной нагрузкой инвертора, а интегрирована в состав его электронной схемы в качестве частото задающего резонансного элемента.

F^2Drive , таким образом, оказывается аналогом наиболее совершенного вида ППН – резонансных LLC преобразователей, отличающихся возможностью получения высококого КПД, малых габаритов и массы при высоких частотах переключения. Важно, что LLC конфигурация, содержащая две индуктивности (LL), включенные последовательно с одной емкостью (C), исключительно благоприятна в данном случае, поскольку в нем основная L – собственная индуктивность пакетированной ЭУС, уменьшена относительно одной секции пропорционально числу параллельно соединенных секций, а основная C – собственная емкость, напротив, увеличена пропорционально числу секций. Поэтому возможность увеличения индуктивности резонансного LC -контура, где C – собственная емкость пакетированной ЭУС, подключением к нему, по меньшей мере, одной добавочной индуктивности, позволяет компенсировать уменьшение индуктивности вследствие параллельного соединения секций.

Инвертор F^2Drive (рис. 7, вверху) может быть построен, например, на двух интегральных сборках $eGaN@FET$ общего назначения типа $EPC2103$ или $EPC2104$ [14], представляющих собой полумосты, работающие в субгигагерцевом диапазоне (сотни МГц), и позволяющие коммутировать токи порядка 20 А при напряжениях до 100 В, на которых можно построить силовую часть мостовой схемы инвертора ППН типа LLC , применив имеющийся отечественный опыт [16].

Добавочную индуктивность, обеспечивающую резонансный режим, по конструктивным соображениям можно составить из двух симметричных секций L , выполненных в виде спиралей или меандров, начинающихся от кольцевых контактных площадок вокруг крепежных отверстий в печатной плате инвертора, через которые пропущены стержни статора.

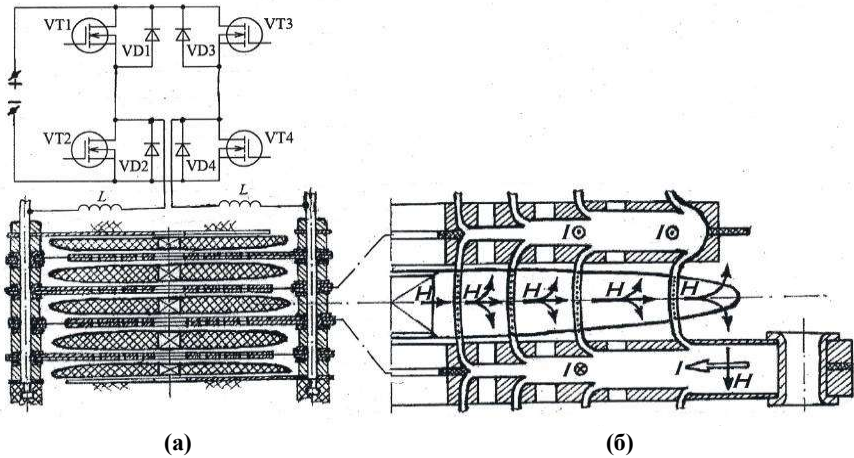


Рис. 7. Интегральный инверторный электропривод на базе ЭУС (I^2Drive): продольный разрез со схемой силовой части СВЧ инвертора на GaN-полумостах: VT1+VT2+VD1+VD2 и VT3+VT4+VD3+VD4 (a); ½ (a): магнитные поля H (напряженности) и токи I (диаграммы) (б)

Fig. 7. Integral inverter electric drive based on electrodynamic unipolar system (I^2Drive): longitudinal section with the scheme of the power part of SHF inverter on GaN-half-bridges: VT1+VT2+VD1+VD2 и VT3+VT4+VD3+VD4 (a); ½ (a): magnetic fields H (tenseness) and currents I (diagrams) (b)

В пакетированной ЭУС I^2Drive (a), в частности, 4-х секционной, снизу вверх чередуются: 1-й поляризационный электрод, 1-й роторный диск, 1-я обмотка индуктора, 2-й роторный диск, 2-я обмотка индуктора, 3-й роторный диск, 3-я обмотка индуктора, 4-й роторный диск, 4-я обмотка индуктора, 5-й роторный диск, 2-й поляризационный электрод. Печатные обмотки индуктора (подобные, в частности, изображенной на рис. 6), через отверстия в выступах надеты на стержни статора, чередуясь на них с проставочными втулками, обеспечивающими соединение выводов обмоток и заданные зазоры. Каждая из последующих обмоток надета с поворотом на 180° относительно предыдущей, но без переворота, с целью задания встречных направлений токов, протекающих по виткам смежных обмоток. Профилированные роторные диски из активного диэлектрика надеты на вал, например, квадратного сечения (условно не показан), причем профили крайних дисков могут отличаться от профилей средних (как показано), поскольку через них замыкаются магнитные потоки только от одной обмотки.

Поляризационные электроды в виде шайб с радиальными разрезами, выполненными напротив статорных стержней (во избежание образования КЗ витков) – емкостные заместители отсутствующих обмоток – расположены перед первым и за последним роторными дисками для вовлечения их в работу. Пакет завершен печатной платой инвертора (условно не показана), соединенной с выводами обмоток через стержни статора.

Ток I от схемы инвертора (рис. 7, б) вводится через обмотку индуктора, изображенную внизу и начинающуюся с правого выступа. В его отверстие, с целью соединения симметричных сторон обмотки и повышения механической прочности (выступы воспринимают реактивные моменты), установлена трубчатая заклепка. Первоначально ток I , следуя к виткам обмотки по металлизации выступа, весь представлен в форме тока проводимости и максимален (наибольшая ширина полоски на диаграмме). Далее, продвигаясь к центру, ток I попадает под емкостное действие соединенных с другим выводом инвертора смежных обмоток индуктора (нижняя обмотка условно не показана), и от него в обе стороны – уже в форме токов смещения – идут ответвления (сужение полосок на диаграмме). Это соответствует накоплению на поверхностях обмоток связанных зарядов, порождающему сопутствующий эффект второго порядка – слабое самовращение (авторотация) I^2Drive как единого целого по механизму электрической конвекции.

Емкостные промежутки между смежными обмотками индуктора резко неоднородны: они по центру заполнены веществом активного диэлектрика роторных дисков, а по краям расположены аксиальные зазоры. Поэтому на уровне роторных дисков ответвляющиеся в аксиальном направлении токи смещения по большей (кратной ϵ) части меняют форму – становятся токами поляризации молекул активного диэлектрика (условно показанных точками), приобретая тем самым жесткую привязку к его веществу. Ответвляющиеся токи изображены на диаграмме полосками одной ширины, соответствующей близким их значениям. Очевидно, что если бы аксиальные зазоры не были клиновидными, то такое было бы невозможно, поскольку токи поляризации сконцентрировались бы, в основном, по краям обмоток, где их проводники наиболее широки, а внутренние части обмоток практически не работали бы.

При этом через роторные диски проходят радиальные магнитные потоки напряженностью H , порожденные встречно направленными токами проводимости I , проходящими по виткам прилегающих обмоток. В результате взаимодействия скрещенных и синхронно осциллирующих магнитных потоков и токов поляризации, к молекулам активного диэлектрика прилагаются тангенциальные пондеромоторные силы, которые и образуют вращающий момент.

Образование реактивного момента, приложенного к статору, показано скрещенными векторами I и H , изображенными на токоподводящем выступе обмотки. Поскольку через него протекает радиальный ток проводимости и замыкаются в аксиальном направлении радиальные магнитные потоки смежных роторных дисков, образуется сила Ампера, противодействующая моменту ротора. Очевидно, что замыкание магнитных потоков смежных роторных дисков, в основном, по краям – через токоподводящие выступы обмоток – возможно лишь при очень высоких значениях μ активного диэлектрика. Но поскольку ферриты для работы на СВЧ имеют очень невысокие значения μ , аксиальное замыкание радиальных магнитных потоков роторных дисков будет происходить и на внутренних их частях, что изображено на рис. 7 ответвлениями от векторов H в обе стороны. Не исключено даже, что окажется целесообразным использование для роторных дисков немагнитных, но обладающих низкими потерями на СВЧ и прочных диэлектриков с повышенным ϵ , например, аллюминоксидной керамики.

Следовательно, обмотки индуктора будут пронизывать ортогональные магнитные потоки существенной величины не только по краям, но и везде. Также на всей их поверхности имеет место радиальная составляющая тока проводимости, обусловленная тем, что витки обмоток сходятся к центру. Поэтому описанный механизм образования реактивного момента не ограничивается токоподводящими выступами, а распространяется и внутрь обмоток. В итоге оказывается, что силовые электромагнитные взаимодействия в ЭУС F^2Drive имеют сложный распределенный характер и требуют учета множества разнообразных факторов, в первую очередь – волновой природы процессов. Это делает их исключительно сложным предметом для математического моделирования, возможно, требующего применения суперкомпьютерной техники. Поэтому и была предложена низкочастотная физическая модель F^2Drive , волновыми процессами в которой можно пренебречь, и которую проще описать и исследовать.

VI. К постановке задачи учета волновых процессов в ЭУС

Волновые процессы при передаче электромагнитной энергии существенно проявляются и требуют учета на расстояниях, соизмеримых с длиной волны λ распространяющегося сигнала (как правило, от $0,1\lambda$). При этом под λ понимается длина волны в среде ее распространения, которая может быть много меньше длины волны в свободном пространстве, особенно в т.н. замедляющих линиях, погонные индуктивность и/или емкость которых искусственно увеличены. Учитывая, что обмотки распределенных LC -структур, лежащих в основе ЭУС, именно таковыми и являются, учет волновых процессов в них – не только функциональных, как в электромагнитном двигателе, но и паразитных, способных исказить до неузнаваемости все выше-

приведенные умозрительные построения, необходим. Очевидно, что на месте тангенциальных векторов пондеромоторных сил в роторе униполярного двигателя, в электромагнитном движителе оказываются векторы Пойнтинга поперечной электромагнитной (ТЕМ) волны, циркулирующей в активном диэлектрике между обмотками. Однако отсутствие прямых аналогий между ЭУС и всеми изученными на этот предмет электромагнитными функциональными элементами, в т.ч., из областей радиолокации и связи – основной сферы применения в настоящее время энергии СВЧ – превращает даже постановку такой задачи в серьезную научную проблему, вынуждая пока ограничиться следующими очевидными соображениями:

- рабочая частота ЭУС может быть тем выше, чем меньше размеры ЭУС, по-видимому, достигая сверхвысоких в традиционном понимании значений – более 10^8 Гц – лишь в малых, в особенности, в микромашинах;
- любой электромеханический преобразователь может найти применение при допустимом уровне потерь энергии, которые в ЭУС, наряду с обычными – тепловыми, включают новую для электромеханики составляющую – потери энергии на излучение в окружающее пространство. Очевидно, что они были бы неприемлемыми – если бы не независимое для линейных сред от λ явление полного внутреннего отражения – единственный, пожалуй, безоговорочно полезный волновой процесс, способный локализовать криволинейно распространяющуюся ТЕМ волну;
- аналогично тому, как было введено понятие кондукционной и конвекционной токовой моды в обмотке распределенной LC-структуры, резонно ввести понятия первичной и вторичной (появляющейся в результате вращения) ТЕМ мод во вращающемся диэлектрическом кольце – в т.ч., в роторе двигателя – которые интерферируют и обеспечивают режимы бегущей волны (БВ) при потреблении активно-реактивной энергии, и стоячей волны (СВ) при потреблении чисто реактивной энергии ($\cos\varphi = 0$), т.е. при отсутствии нагрузки на валу или выработке статического момента;
- несмотря на то, что при последовательном возбуждении металл обмоток индуктора и диэлектрик ротора являют собой разные участки одной электрической цепи, по которой протекает непрерывный ток, точной син- или противофазности тока поляризации и магнитной индукцией в роторе может и не быть. Однако, при чрезмерно большом их рассогласовании, выбором параметров обмоток можно довести его величину до допустимой – кратной 180° ;
- сложный распределенный характер силовых электромагнитных взаимодействий в ЭУС *F²Drive*, ключевой особенностью которого является инвариантность электромагнитного поля в рабочем зазоре по отноше-

нию к угловому перемещению ротора, предполагает, что при этом в радиальном направлении, т.е. при переходе от витка к витку к центру обмоток, поле может быть переменным: имеющим характер БВ, переносящей энергию от периферии ротора, где обмотки подключены к источнику энергии, к его центру, при наличии ненулевой доли СВ. Кратность 180° сдвига фаз между током поляризации и магнитной индукцией в роторе выдерживается в ближних зонах – в пределах каждого из узких кольцевых участков ротора.

VII. Гибридная униполярная система – основа бесконтактного униполярного двигателя, работающего на относительно низких частотах

Рассматривая задачу создания I^2Drive в описанном виде как программу-максимум, ведущую к революционному прорыву в электромеханике, но требующую высоких материальных и временных затрат, целесообразно в качестве программы-минимум как первого этапа проблемно-ориентированных исследований изучить компромиссный вариант двигателя на основе распределенных LC -структур, обладающий более скромными возможностями, но сохраняющий ключевые отличительные особенности I^2Drive : бесконтактность и инвариантность электромагнитного поля в рабочих зазорах. Такую униполярную систему, названную гибридной в связи с заимствованием у классических униполярных машин ротора, армированного токоведущими стержнями, и статора, участвующего в замыкании магнитной цепи, можно рассматривать не только как физическую модель I^2Drive , позволяющую, абстрагируясь от волновых процессов, доказать на макетном образце, работающем на относительно низких частотах, работоспособность подобных систем, но и как основу практических конструкций униполярных двигателей, обладающих не столь явными преимуществами перед известными, как I^2Drive , но все же существенными.

На рис. 8 двигатель гибридной униполярной системы (ГУС) представлен под изображением обычной цилиндрической униполярной машины [17], чтобы продемонстрировать его аналогию заведомо работоспособному конструктивному прототипу, с учетом преобразования цилиндрического конструктивного исполнения в торцевое и эквивалентной на переменном токе замены скользящих гальванических контактов емкостными.

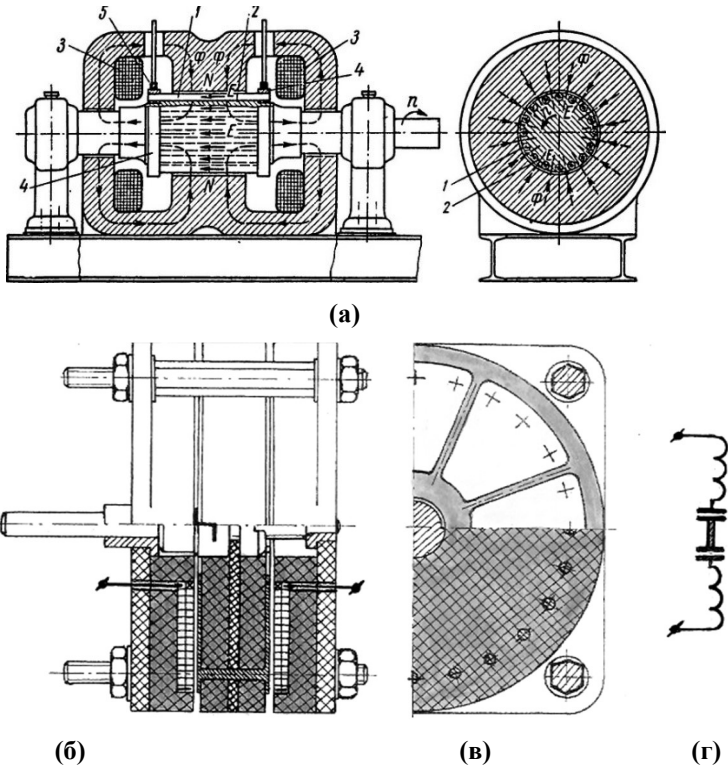


Рис. 8. Цилиндрическая униполярная машина (а) и результат преобразования конструктивного исполнения в торцевое – двигатель ГУС в разрезах: продольном (б); поперечном (в); его схема замещения (г)

Fig. 8. Cylindrical unipolar machine (a) and the result of the transformation of its structural design into a disk one – the hybrid unipolar system motor in sections: longitudinal (b); transverse (c); its replacement scheme (d)

Цель подобной «гибридизации» ЭУС с обычной униполярной машиной – максимально возможное увеличение реактивных параметров (C и L) распределенной LC -структуры для эффективной работы на относительно низких частотах ($10^4 \div 10^6$ Гц), достигается за счет того, что:

- из трех диэлектрических промежутков, определяющих емкость – двух воздушных зазоров и роторного диэлектрического диска – оставлены только первые два, поскольку активные токи в роторе ГУС имеют форму не токов смещения, а, подобно обычным униполярным машинам, токов проводимости, протекающих по металлическим стержням,

пронизывающим ротор. Для этого на поверхности ротора, прилегающие к обмоткам, нанесены емкостные электроды в виде, по меньшей мере, двух секторов, соединенных со стержнями;

- замыкание магнитной цепи в ГУС, в отличие от ЭУС, осуществляется не через обмотки индуктора, образующие немагнитные зазоры, а в обход их. Для этого обмотки помещены в чашеобразные ферритовые сердечники, высота бортов которых равна толщине обмоток. Это снимает ограничения на их толщину, позволяя выполнить обмотки, по меньшей мере, двухсекционными – содержащими, наряду с асимметрично подключенными основными секциями, прилегающими к секторам ротора, расположенные за ними вспомогательные секции, повышающие индуктивность обмоток. В двигателе, изображенном на рис. 7, две таких однослойных секции. Основные подключены к вспомогательным на краях и имеют свободные концы у центра, а вспомогательные, соединяясь на краях с основными, выведены из статора у центра.

Результаты компьютерного моделирования магнитных полей (проведено к.т.н. А.К. Надкиным (НИИЭМ)) в двигателе ГУС приведены на рис. 9 и 10. Очевидно, имеет место подобие структур магнитных полей в ГУС и цилиндрической униполярной машине (рис. 8, а): в обоих случаях магнитные потоки, возбуждаемые протекающими через обмотки индуктора встречно направленными токами, образуют две независимые параллельные ветви, каждая из которых замыкается по краям ротора без захода в его среднюю часть.

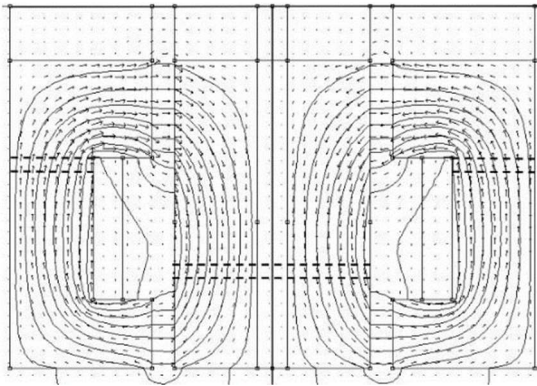


Рис. 9. Магнитные силовые линии ГУС в $\frac{1}{2}$ продольного разреза

Fig. 9. Magnetic lines of force of the hybrid unipolar system in $\frac{1}{2}$ of the longitudinal section

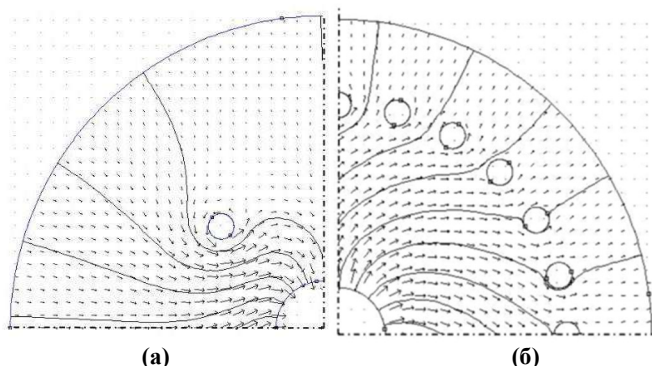


Рис. 10. Магнитные силовые линии ГУС в $\frac{1}{4}$ поперечных разрезав: по статору (а); по ротору (б)

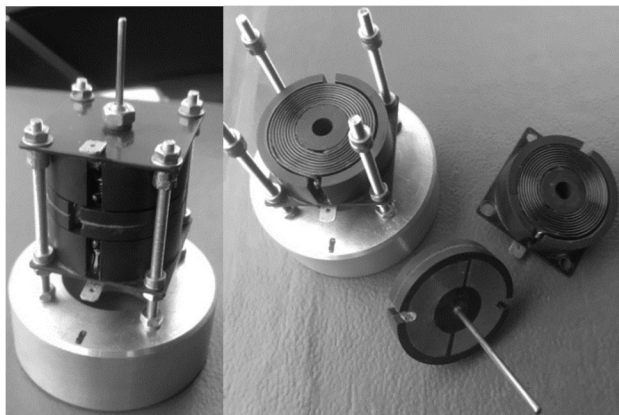
Fig. 10. Magnetic lines of force of the hybrid unipolar system in $\frac{1}{4}$ of the transverse sections: along the stator (a); along the rotor (b)

Это позволяет составить ротор ГУС из трех дисков, из которых активные (ферромагнитные) только крайние, а средний – конструктивный, например, стеклотекстолитовый, служащий для соединения его частей и закрепления ротора на валу.

Рис. 10 показывает образование в двигателе ГУС вращающего момента согласно третьему закону Ньютона. Действующие силы, приложенные к ротору, и противодействующие силы, приложенные к статору, образуются по единому физическому механизму: асимметричной деформации (отклонения в противоположные стороны) магнитных силовых линий вокруг отверстий в ферромагнетике, через которые пропущены проводники с током: в статоре – внешние выводы, в роторе – токонесущие стержни. При этом действующий и противодействующий моменты оказываются равными при любом числе стержней в роторе и радиусе расположения отверстий в статоре, поскольку ток, протекающий через выводы статора, равен сумме токов, протекающих через стержни, а изменение плеч приложения сил, связанное с различием радиусов расположения отверстий, компенсируется изменением величин этих сил при тех же токах, обусловленным неоднородностью осесимметричного поля – обратной зависимостью величины магнитной индукции от радиуса.

По описанной конструктивной схеме был построен макетный образец двигателя ГУС, фото которого приведено на рис. 11. Для его изготовления использовались: сердечник ферритовый Ч48 М2000НМ ПЯ0.707.402ТУ – 4 шт. (2 – в состоянии поставки, 2 – со срезанными бортами), провод обмоточный ПЭТВ-2-1,0 мм, и клемма ножевая 6,3 мм *RM 250 (SG 57643 A)* –

2 шт. Число стержней в роторе по сравнению с рис. 6 уменьшено до двух, причем желобковые стержни – так же, как и выводы статора – размещены в штатных пазах под выводы, выполненных в сердечниках. Вспомогательные секции обмоток, напротив, увеличены до заполнения имеющихся объемов и спаяны с основными секциями на краях.



**Рис. 11. Макетный образец двигателя ГУС:
слева – в собранном виде, справа – поэлементно**

**Fig. 11. Modeling sample of the hybrid unipolar system:
on the left – in assembly, on the right – element by element**

Запланированную программу экспериментов возможно провести после изготовления лабораторного стенда, основу которого должен составлять перестраиваемый в пределах $10^4 \div 10^6$ Гц электронный генератор частоты, мощность которого соизмерима с мощностью, присущей установкам для термообработки металлов ТВЧ. Это позволит довести токи в обмотках до величин, соответствующих их заметному, вплоть до разрушения изоляции, нагреву, что, учитывая полученное значение емкости ~ 10 Пф, – непростая техническая задача. Таково условие, без выполнения которого отсутствие вращения ротора у простейшего в изготовлении неоптимального макета, нельзя считать убедительным отрицательным результатом и делать на этом основании какие-либо заключения. Пока же, к сожалению, непосредственным подключением к нему лабораторного генератора ГЗ-109 с диапазоном частот 20 Гц \div 200 кГц, привести ротор во вращение не удалось – однако и никаких видимых признаков прохождения тока не наблюдалось, что оставляет этот вопрос открытым.

Последнее, тем не менее, не дает повода считать, что данная публикация преждевременна в связи с тем, что, на первый взгляд, важнейший вопрос – опытное подтверждение одного из следствий выдвинутой гипотезы, опровергающего предубеждение о невозможности создания бесконтактного униполярного двигателя – остался открытым. На самом деле, в истории науки и техники имеются примеры успешно решенных подобных сложных комплексных проблем. Они требуют подключения к ним на разных этапах специалистов разных компетенций. Это было бы невозможным при отсутствии доступной научно-техническому сообществу информации о проблеме как таковой, о том, какие задачи были поставлены и что уже сделано для их решения.

Придерживаясь порядка подачи материала согласно его потенциальной научно-практической значимости, единственное из следствий выдвинутой гипотезы, которое, благодаря ряду упрощений, относительно просто проверяется опытным путем – бесконтактный униполярный двигатель – рассмотрено последним. На наш взгляд, даже если практика покажет, что он – в силу неясных пока причин – неработоспособен, то из этого вовсе не будет следовать отсутствие, по крайней мере, научного интереса у предмета статьи, выходящего за рамки прикладной электромеханики и имеющего фундаментально-научный аспект – в части, касающейся теоретических основ электротехники. Если же, что более вероятно, окажется, что выдвинутая гипотеза истинна во всех своих аспектах, то это будет означать наступление в электромеханике новой эпохи – максвелловской – характеризующейся включением в процесс электромеханического преобразования энергии, наряду с током проводимости, других составляющих полного, в максвелловском понимании, тока – токов смещения (поляризации) и конвекции [11].

VIII. Заключение

У максвелловской электромеханики, в силу ее уникальных возможностей, есть все шансы инициировать очередной виток эволюции вращающихся электрических машин [18]. Его особенностью будет использование в их составе не якоря и индуктора с сосредоточенными реактивными параметрами (как правило – L , реже – C), как теперь, а распределенных LC -структур. Поскольку отказ от реактивных элементов с сосредоточенными параметрами в пользу распределенных присущ технике СВЧ, ясно, что этот путь открывает новые горизонты, впервые позволяя распространить известные преимущества СВЧ энергетики на электромеханику.

Кроме того, интерес вызывает удивительная простота питаемых СВЧ энергией вращающихся машин на базе ЭУС: судя по всему, конструктивная схема, изображенная на рис. 5, в – простейшая из всех принципиально воз-

возможных бесконтактных систем, в которых складываются условия для непрерывного электромеханического преобразования. Это является еще одним доводом в пользу того, что если открытие указанных эффектов состоится, то его влияние на дальнейший ход развития электромеханики действительно может стать революционизирующим.

Автор считает своим долгом выразить искреннюю признательность проф., д.т.н. В.А. Конявскому (ОКБ САПР, МФТИ), без поддержки которого эта работа не могла бы быть выполнена, а также к.ф.-м.н. Н.Е. Невескому (ИПМ РАН) (1946–2010), проф., д.т.н. В.Я. Гече и к.т.н. А.К. Надкину (НИИЭМ).

© Лившиц В.И., 2022

Поступила в редакцию 22.04.2022

Received 22.04.2022

Библиографический список

- [1] Эйхенвальд А.А. Электричество. 6-е изд. М.-Л.: ГИЗ, 1931. – 737 с.
- [2] Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004. – 624 с.
- [3] Афанасьев А.П. Электрическая конвекция / Энциклопедия Брокгауза и Ефрона. [Электронный ресурс]. URL: <https://slovar.cc/enc/brokhhaus-efron/1688749.html> (дата обращения 24.03.2022).
- [4] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. М.: Мир, 1966. – 528 с.
- [5] Livshits V. Maxwellian electromechanics – the path to create a new type of electromechanical energy converters with unique capabilities // proc. 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Apr. 27-28, 2021, Prague, Czech. [Электронный ресурс]. URL: http://sed.diag.ru/uploads/swfupload_sbornik_SED/papers/e05.pdf (Дата обращения 24.03.2022).
- [6] Мультиферроики / Википедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мультиферроики> (дата обращения 10.02.2022).
- [7] Овчинников М.Ю., Пеньков В.И., Кирюшкин И.Ю. [и др.]. Опыт разработки, создания и эксплуатации магнитных систем ориентации малых спутников. М.: ИПМ, 2002. – 32 с.
- [8] Ишлинский А.Ю. Униполярная индукция // Большой энциклопедический словарь. Политехнический. М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 656 с.
- [9] Ходоров Т.Я. Униполярная машина переменного тока, Авторское свидетельство СССР № 67095, заявл. 14.08.43; опубл. 01.01.46. – Бюл. № 9.
- [10] Дробинин Я.И., Дробинина Т.Я. Униполярные генераторы сверхнизкой частоты для электромагнитного перемешивания жидких металлов // Труды УПИ. Вып. 156. 1967.
- [11] Лившиц В.И. Введение в максвелловскую электромеханику // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2019. № 21. С. 33-49.

- [12] Лившиц В.И. Электропривод электродинамической униполярной системы и галетный электродвигатель, Заявка на изобретение 2019125007 RU, заявл. 07.08.19; опубл. 08.02.21. – Бюл. № 4.
- [13] Диденко А.Н. СВЧ энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2003. – 446 с.
- [14] Мощные нитрид-галлиевые (GaN) транзисторы от EPC – конец эры кремния? АО «Компэл». 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/71931> (дата обращения 24.03.2022).
- [15] ОПК создала мощные СВЧ транзисторы. [Электронный ресурс]. URL: <https://zonatex.ru/blog/komputeri/3781.html> (дата обращения 10.02.2022).
- [16] Белов Г.А., Малинин Г.В. Расчет характеристик установившегося режима резонансных преобразователей типа LLC // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2021. № 23. С. 7-15.
- [17] Основные конструктивные исполнения электрических машин. [Электронный ресурс]. URL: <https://mydocx.ru/12-39843.html> (дата обращения 24.03.2022).
- [18] Матвеев А.В. Движущие силы и направления эволюции вращающихся электрических машин. Ч. 1 // Электричество. 2021. № 1. С. 44-54. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-1-44-54

References

- [1] A.A. Eichenwald, *Elektrichestvo [Electricity]*, 6th ed. Moscow-Leningrad: GIZ, 1931 (in Russian).
- [2] S.G. Kalashnikov, *Elektrichestvo [Electricity]*. Moscow: Fizmatlit, 2004 (in Russian).
- [3] A.P. Afanasyev, “Elektricheskaya konvekciya [Electric convection]”, in *Enciklopediya Brokgauza i Efrona [Encyclopedia of Brockhaus and Efron]*. [Online]. Available at: <https://slovar.cc/enc/brokhhaus-efron/1688749.html> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [4] R. Feynman, R. Leighton and M. Sands, *Fejnmanovskie lekcii po fizike. Tom 6 [Feynman Lectures on Physics. Vol. 6]*. Moscow: Mir, 1966 (in Russian).
- [5] V. Livshits, “Maxwellian electromechanics – the path to create a new type of electromechanical energy converters with unique capabilities”, in proc. *2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Apr. 27-28, 2021, Prague, Czech. [Online]. Available at: http://sed.diag.ru/uploads/swfupload/_sbornik_SED/papers/e05.pdf [Accessed: Mar. 24, 2022).
- [6] Multiferroics. [Online]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Мультиферроики> [Accessed: Oct. 2, 2022].
- [7] M.Yu. Ovchinnikov, V.I. Pen'kov, I.Yu. Kiryushkin, R.B. Nemuchinsky, A.A. Ilyin, and E.E. Nokhrina, *Experience in the development, building and usage of a magnetic attitude control system for small satellites*. Moscow: IPM, 2002.
- [8] “Unipolyarnaya indukciya [Unipolar induction]”, in *Bol'shoj enciklopedicheskij slovar'. Politekhničeskij [Big encyclopedic dictionary. Polytechnic]*, A.Yu. Ishlinskiy. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2000 (in Russian).
- [9] T.Ya. Hodorov, “Unipolyarnaya mashina peremennogo toka [Unipolar AC machine]”, Pat. USSR 67095, Jan. 01, 1946 (in Russian).
- [10] Ya.I. Drobinin and T.Ya. Drobinina, “Unipolyarnye generatory sverhnikzkoj chastoty

- dlya elektromagnitnogo peremeshvaniya zhidkih metallov [Unipolar ultra-low frequency generators for electromagnetic mixing of liquid metals], *Trudy UPI [Proceedings of the UPI]*, vol. 156, 1967 (in Russian).
- [11] V.I. Livshits, "Vvedenie v maksvellovskuyu elektromekhaniku [Introduction to Maxwellian electromechanics]", *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF [Proceedings of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation]*, no. 21, pp. 33-49, Dec. 2019 (in Russian).
- [12] V.I. Livshits, "Elektroprivod elektrodinamicheskoy unipolyarnoy sistemy i galetnyj elektrodvigatel [The electric drive of an electrodynamic unipolar system and a one-year electric motor]", Application for invention RU 2019125007, Feb. 08, 2021 (in Russian).
- [13] A.N. Didenko, *SVCH energetika: teoriya i praktika [Microwave energy: theory and practice]*. Moscow: Nauka, 2003 (in Russian).
- [14] Moshchnye nitrid-gallievye (GaN) tranzistory ot EPC – konec ery kremniya? [Powerful gallium nitride (GaN) transistors from EPC – the end of the silicon era?], AO "Compel", Aug. 2015. [Online]. Available at: <https://www.compel.ru/lib/71931> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [15] OPK sozdala moshchnye SVCH tranzistory [OPK has created powerful microwave transistors]. [Online]. Available at: <https://zonatex.ru/blog/komputeri/3781.html> [Accessed: Feb. 10, 2022] (in Russian).
- [16] G.A. Belov and G.V. Malinin, "Raschet harakteristik ustanovivshegosya rezhima rezo-nansnyh preobrazovatelej tipa LLC [Calculation of the characteristics of the steady state of resonant converters of LLC type]", *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF [Proceedings of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation]*, no. 23, pp. 7-15, July 2021 (in Russian).
- [17] Osnovnye konstruktivnye ispolneniya elektricheskikh mashin [Basic designs of electrical machines]. [Online]. Available at: <https://mydocx.ru/12-39843.html> [Accessed: Mar. 24, 2022] (in Russian).
- [18] A.V. Matveev, "Driving forces and lines of the evolution of rotating electrical machines. Part 1", *Electricity*, no. 1, pp. 44-54, 2021. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-1-44-54 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Лившиц Владимир Иосифович, кандидат технических наук, руководитель группы патентования ЗАО «ОКБ САПР», г. Москва, Российская Федерация.

Vladimir I. Livshits, Cand. Sci. (Eng.), head of the patenting department of the OKB SAPR JSC, Moscow, Russian Federation.