

«Безопорное» движение как результат нескомпенсированной силы

Особенности реактивного движения. Электродинамические и фотонные безопорные двигатели.

Reactive jet and electrodynamic propulsions have been analyzed. It was shown that reactive forces are developed by non-compensated forces, not by jet reaction, which is even more obvious for electrodynamic (electromagnetic) thrusters. It is shown that some of electrodynamic thrusters using internal magnetic field can operate in reactionless manner. Also, it was shown that photonic propulsion engines and radio antennas having asymmetrical directional pattern can operate as reactionless thrusters too.

1. Введение

Несмотря на то, что официальная наука считает, что безопорного движения не бывает, так как это нарушает 3-й закон Ньютона, время от времени этот вопрос снова поднимается, что связано с появлением механических и электродинамических устройств, в работе которых ряд авторов усматривает элементы безопорного движения. Некоторые из них при более подробном рассмотрении оказываются вполне «опорными», а вот принципы работы других позволяют предположить, что на их основе можно сделать движители не образующие реактивной струи и не расходующие рабочего тела. К ним, в частности, можно отнести электроразрядный движитель постоянного тока и электродинамический конденсаторный движитель переменного тока, которые подробно рассмотрены в данной статье, а также фотонный двигатель.

Данная статья является исправленным и дополненным продолжением статьи [9].

2. Кратко о ракетных двигателях

Вначале определимся с формулировками. Двигатель состоит из источника силы (тяги) – движителя и источника энергии, питающего движитель. В некоторых случаях, как например, в ракетном двигателе, движитель и источник совмещены. В других случаях – это отдельные агрегаты. Например, в электроракетных двигателях они разделены и источником энергии может являться солнечная батарея, атомный реактор и т.п.

Кратко остановимся на классических представителях реактивного движения – ракетных двигателях {1, 2, 3}.

Как известно, тяга ракетных двигателей может быть определена двумя путями:

- из уравнения импульс силы – количества движения,
- из интеграла сил давления, приложенных к камере сгорания двигателя.

В первом случае берется уравнение импульса силы – количества движения в форме Эйлера:

$$dmV = Fdt \quad (2.1)$$

Отсюда следует, что сила тяги двигателя равна

$$F = V \frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

где V – скорость истечения газов, а $\frac{dm}{dt} = \dot{m}$ – массовый расход топлива. Эта формула справедлива для так называемого «рабочего режима», когда внешнее давление и давление газов на срезе сопла равны. В большинстве случаев, в частности, в вакууме, это условие не выполняется.

Во втором случае определяется интеграл сил давления, приложенных внутри и снаружи к камере сгорания. Возникновение тяги в данном случае можно проиллюстрировать следующим образом:

Предположим, что некий баллон находится под давлением. В этом случае силы давления приложены равномерно по всей внутренней поверхности баллона. Баллон растянут, силы, приложенные к противоположным стенкам баллона скомпенсированы и баллон неподвижен. Прделаем отверстие в баллоне. В результате получается нескомпенсированная сила, равная давлению (избыточному) в баллоне умноженному на площадь отверстия. В ракетной технике эта сила называется “основной составляющей тяги”.

Если давление в баллоне поддерживать каким-либо образом, то баллон будет работать как ракетный двигатель. Это рассуждение является, конечно, приближенным и не учитывает изменения статического давления газа за счет разгона потока, тяга, при этом, тяга получается больше чем “основная составляющая” примерно в 1,3 – 2 раза. Причем, тяга не зависит от топлива – это может быть все, что угодно: и горячие продукты горения и холодный сжатый газ, главное, чтобы поддерживалось давление в камере. То есть, выходит, что реактивная струя тут совсем не причем, она не создает тяги и тяга не является реакцией на движение струи. А вот поддержание давления требует непрерывной подачи топлива и его расход очень сильно зависит от его термодинамических характеристик, а термодинамические процессы расширения газа в свою очередь вызывают разгон струи. Это (и формула Мещерского-Циолковского $\Delta v = v_e \ln \left(\frac{M + P}{P} \right)$), в основном, относится к

ракета, несущим все компоненты топлива на борту. В ракетной технике используется комплексный параметр ракетного двигателя, определяющий его эффективность, который называется «удельным импульсом». Это отношение тяги двигателя (в Кг силы) к массовому расходу топлива (в кг

массы/сек): $\bar{P} = \frac{F}{\dot{m}}$, где \dot{m} - массовый расход, а F – тяга двигателя, которое у лучших двигателей достигает 450, но, если компоненты не везти на борту, а брать, например, снаружи, то удельный импульс очень существенно возрастает. Например, воздушно-реактивные двигатели, использующие заборный воздух как окислитель, имеют удельный импульс порядка 3000 (Кг тяги/кг массы израсходованного бортового топлива за секунду), в то время, как лучший результат для кислород-водородных ракетных двигателей не превышает 450 - 460. То есть, если каким-либо образом удастся дистанционно доставлять компоненты для ракетного двигателя или брать их снаружи, то его удельный импульс будет стремиться к бесконечности.

Таким образом, ракетные двигатели теоретически могут обеспечить космическому аппарату любую, ничем не ограниченную скорость, а формула Мещерского – Циолковского не является фундаментальной и применима только для случая, когда ракета везет все компоненты с собой.

В реактивном движении имеют место несколько парадоксов, которые подтверждают изложенные выше положения:

- Предположим, что ракета каким либо образом доставлена в некую точку над землей. После этого включается ракетный двигатель таким образом, что тяга была равна весу ракеты. Двигатель работает, а ракета не двигается с места. При этом ни кинетическая, ни потенциальная энергии ракеты не меняются (потенциальная даже уменьшается по мере выработки топлива), а, в то

же время, ракета расходует энергию на разгон струи ($E = \frac{MV^2}{2}$, где M – масса топлива, V – скорость

струи). Таким образом, ракета расходует энергию впустую! Ситуация становится понятной если считать, что тяга создается только **НЕСКОМПЕНСИРОВАННОЙ** силой. Что происходит со струей вне двигателя никак не отражается на движении ракеты. Если продукты сгорания недорасширены, то струя продолжает расширяться в атмосфере, создавая светящийся контур – идеальное продолжение сопла, которое сменяется светящимся контуром дозвуковой части сопла, затем, сверхзвуковой частью и так далее несколько раз («Бочки Маха»). Кроме того, одни из стартовых потерь ракеты, так называемые «гравитационные потери», действуют только во время работы двигателя.

- Кроме того, известно, что ракета может развивать скорость больше, чем скорость истечения струи. Выходит, что ракета тащит струю за собой? Ситуация, опять же, становится

понятной если предположить, что тяга создается нескомпенсированной силой и процессы, происходящие со струей вне двигателя на него никак не влияют.

• Другим примером того, что тяга создается нескомпенсированной силой является «тепловая камера сгорания» (точнее, «полутепловая»), представляющая собой трубу со сверхзвуковым соплом ($\frac{F_{ch}}{F_{cr}} = 1$). В ней разгон потока до звуковой скорости происходит за счет подвода тепла, а сверхзвуковой разгон – за счет расширения струи в сопле. Скорость истечения струи в таком двигателе такая же, как в двигателях с дозвуковым конфузурным соплом ($\frac{F_{ch}}{F_{cr}} > 3$), но тяга получается меньше, так как в дозвуковой части присутствует только «основная составляющая тяги».

Таким образом, получение тяги ракетным двигателем и разгон струи – это совершенно разные процессы в которых сила приложена к двум разным объектам.

Это особенно очевидно в случае электродинамических двигателей, основанных на силе Лоренца.

3. Электродинамические движители

3. 1. Электродинамические движители постоянного тока с проводящей средой и постоянным магнитным полем

Электродинамические ракетные двигатели известны уже несколько десятилетий [4] и используются в космических аппаратах для ускорения и стабилизации орбиты, но, хотя их теория, расчет и конструкция известны, не все особенности их работы были достаточно проанализированы. Предметом данной статьи является электродинамические ракетные двигатели использующие силу Лоренца, которые могут быть преобразованы в безопорные, не потребляющие и не разгоняющие никакого рабочего тела (за исключением, возможно, эфира).

Рассмотрим силы, приложенные к замкнутому контуру с током, находящемуся в однородном магнитном поле (полем, создаваемым контуром пренебрегаем).

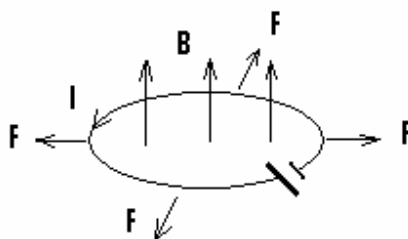


Рис. 1

В таком контуре течет ток равный $I = \frac{U}{R_{ext} + R_{int}}$ (3.1.1)

где R_{ext} - сопротивление контура, R_{int} - внутренне сопротивление источника. Очевидно, что в данном случае контур равномерно растянут, силы скомпенсированы и, следовательно, контур неподвижен. При этом сила, приложенная к элементу проводника dl определяется по формуле [5, 6]:

$$dF = Bldl \quad (3.1.2)$$

(при $\vec{B} \perp d\vec{L}$, магнитным полем самого контура пренебрегаем).

Поменяем направление внешнего магнитного поля – контур будет равномерно сжат и, все равно, останется неподвижен.

Теперь, обрежем часть контура. Сопротивление возрастает до бесконечности и ток, соответственно, становится равным нулю. Поместим разомкнутые концы контура в проводящую жидкость или газ.

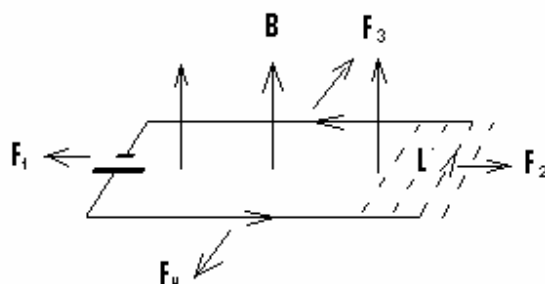


Рис. 2

Теперь контур снова замкнут, но через проводящую среду, никак механически не связанную с контуром. Ток, текущий в контуре определяется по той же формуле (3.1.1) $I = \frac{U}{R_{ext} + R_{int}}$, где R_{ext} зависит от сопротивления проводящей среды.

Очевидно, что силы F_3 и F_4 , приложенные к боковым проводникам компенсируют друг друга. В то же время, силы F_1 и F_2 , равные по величине, приложены в противоположных направлениях к переднему проводнику и к проводящей жидкости. Так как проводящая жидкость или газ механически не связаны с контуром, то эти силы не скомпенсированы – сила F_1 приложена к контуру, а сила F_2 – к жидкости (газу). Таким образом, контур разгоняется в одном направлении, а жидкость (газ) в противоположном. Силы F_1 и F_2 определяются по формуле:

$$F_1 = F_2 = BIL \quad (3.1.3)$$

где L – длина пути тока в жидкости (газе).

Все это выглядит как реактивное движение и на этом принципе работают электроракетные двигатели на лоренцевой силе. Но, если в случае газодинамического ракетного двигателя газ непосредственно контактирует с оболочкой камеры сгорания, обеспечивая тягу, то в данном случае механический контакт отсутствует и проводящая среда нужна только для пропускания тока (замыкания контура) и ее разгон никак не сказывается на силе, приложенной к контуру. В то же время, проводящая среда разгоняется и безвозвратно улетает в противоположном направлении. Достать и сохранить ее не представляется возможным, так как в таком случае ее количество движения будет вычитаться из количества движения контура и в пределе (когда вся проводящая среда возвращается назад) система остановится.

Таким образом, тягу в электроракетных двигателях создает не реактивная струя, а нескомпенсированная сила, приложенная к внутреннему электрическому контуру двигателя. Точно такая же сила приложена к проводящей среде и, таким образом, количества движения контура и разогнанной среды оказываются равны, что формально выглядит как реактивное движение.

Точно также работает униполярный мотор, крутящий и линейный.

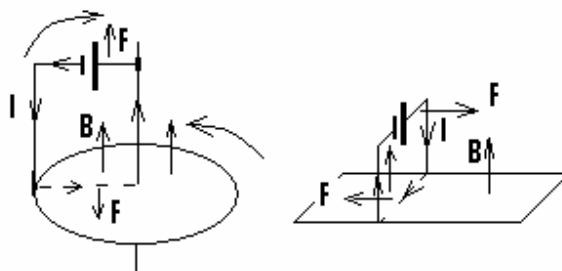


Рис. 3

В данном случае проводящей средой, не связанной механически с контуром, является диск или пластина и одинаковые силы приложены и к диску (пластине) и к внешнему контуру, но в противоположных направлениях. Таким образом, диск вращается в одну сторону, а контур – в другую. Если закрепить контур, то будет вращаться один диск, а если закрепить диск то вращаться будет контур, что и подтверждено экспериментами.

Следовательно, проводящая среда только замыкает контур, создавая условия для протекания в нем тока, и только нескомпенсированная сила приложенная к части контура, создает тягу!

В частности, этот принцип используется в движителях по программе “Electrodynamic Tether Propulsion” (TSS), где контур (20 км кабель) движется на орбите спутника в магнитном поле Земли, а проводящей средой является ионосфера. При протекании в контуре тока от внешнего источника, Tether разгоняет спутник, а, при замыкании контура на нагрузку, ЭДС, наведенная в контуре, вызывает ток, тормозящий спутник. Так как магнитное поле Земли – слабое (порядка 0.7 Гс), то и ощутимая сила достигается при ширине зазора в десятки километров. Экспериментально эта конструкция была опробована в 1996 году на шаттле “Колумбия” (STS 75).

3. 1. 1. Безопорные движители с разрядником

В принципе, контур может быть замкнут разрядным промежутком, в частности электрической дугой или вакуумным разрядником с горячей (термоэлектронной) или холодной (электростатической) эмиссией. Схема приведена на рис. 4.

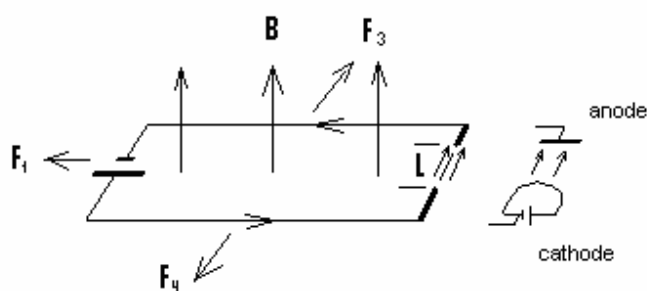


Рис. 4

Вообще-то дуговой разряд происходит в газовой среде. В частности, известны термические дуговые ракетные двигатели, где дуговой разряд нагревает газ, который далее расширяется в сопле и создает тягу. Очевидно, что они фактически являются классическими реактивными двигателями и не являются безопорными.

Но замкнуть контур возможно также и вакуумным разрядом, используя для этого, например, вакуумный диод с нагреваемым или холодным катодом. В этом случае электронный поток от катода к аноду замыкает контур.

Ток диода до насыщения описывается законом 3/2: $I = g \times U_{a-c}^{3/2}$. В режиме насыщения ток диода описывается законом Ричардсона – Дешмана:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right), \text{ где } A = 120 \left[\frac{A}{\text{cm}^2 \text{K}^2} \right] \quad (3.1.1.1),$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана. Работа выхода для щелочных катодов примерно равна 1,5 эВ или $e\varphi = 2.4 \times 10^{-19}$ Дж (для вольфрама она равна 4.5 эВ). Предположим, что катод нагрет до 2000 К. Можно оценить плотность тока насыщения, которая будет примерно равна

$j = 120 \times 4 \times 10^6 \exp\left(-\frac{2.4 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 2 \times 10^3}\right) = 4.8 \times 10^8 \times 6 \times 10^3 = 2.8 \times 10^{11}$ А/см² для щелочных катодов, а для вольфрама она составит примерно $j = 8.6 \times 10^9$ А/см².

Таким образом, даже небольшие по площади катоды позволяют передать большой ток.

При движении заряда (электрона) в магнитном поле, траектория искривляется и для попадания электронов на анод необходимо, чтобы размер анода превышал величину отклонения электронов в магнитном поле.

В частности, в случае постоянной скорости электронов, их траектория закручивается в окружность и радиус траектории заряда (Ларморовский радиус) определяется по формуле:

$$r = \frac{mV}{qB} \quad (3.1.1.2),$$

где m и q - соответственно масса и заряд частицы, V и B – ее скорость и индукция магнитного поля. В скрещенных же электрическом и магнитном полях траектория электронов представляет собой трохойду (разновидность циклоиды).

Предположим, что индукция магнитного поля равна $B = 0.18$ Тл (неодимовый магнит), расстояние между катодом и анодом равно 10 см и напряжение между катодом и анодом равно 100 В. Энергия электрона при подлете к аноду будет порядка 100 эВ. Тогда скорость электрона при подлете

к аноду определяется по формуле $V = \sqrt{\frac{2E}{m_e}} = \sqrt{\frac{200 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-28}}} = \sqrt{3.5 \times 10^{10}} = 1.9 \times 10^5$ м/сек, а

ларморовский радиус у анода составит $r = \frac{m_e V}{e B} = \frac{9.1 \times 10^{-28}}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{1.9 \times 10^5}{0.18} = 6 \times 10^{-3}$ м или 6 мм.

В то же время, в данном контуре к электрону приложены скрещенные электрическое и магнитное поля. Электроны в диоде ускоряются электрическим полем и, соответственно, их скорость V не одинакова по длине зазора. Скорость электрона в электрическом поле определяется по формуле:

$$V_{\uparrow} = a_{\uparrow} t = \frac{F_q}{m_e} t = \frac{e}{m_e} Et \quad (3.1.1.3),$$

где E – напряженность электрического поля, t – время полета электрона в поле.

Сила Лоренца, действующая перпендикулярно вектору скорости электрона, определяется по формуле: $F_L = e \left[\vec{V}_{\uparrow} \times \vec{B} \right]$, скорость электрона в перпендикулярном направлении будет равна

$$V_{\rightarrow} = \int \frac{e^2}{m_e^2} EBt dt \text{ или } V_{\rightarrow} = \frac{e^2}{2m_e^2} EBt^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-28}} \right)^2 \times 0.1 \times 0.18 \times (1 \times 10^{-6})^2 = 270 \text{ м/сек} \quad (3.1.1.4).$$

Под действием скрещенных электрического и магнитного полей траектория электронов представляет собой трохойду, отклонение огибающей которой (отклонение электронов в плоскости

контура за счет силы Лоренца) будет примерно равно $\delta = \frac{e^2}{2m_e^2} EB \int_0^{t_k} t^2 dt = \left[\frac{e^2}{6m_e^2} EBt^3 \right]_0^{t_k} = 3.6 \times 10^{-5} \text{ м}$ (3.1.1.5),

где t_k - время пролета электроном расстояния между катодом и анодом, которое равно $t_k = \frac{2L}{V_k} = \frac{0.2}{1.9 \times 10^5} = 1 \times 10^{-6} \text{ сек.}$ (при расстоянии между катодом и анодом 10 см и напряжении 100 В – см. выше).

Следовательно, на размере анода (при условии замыкания контура) это не сказывается.

Таким образом:

- эмиссия катода позволяет предавать большие токи,
- размер анода в данном случае не критичен,

Следовательно, ток в контуре ограничивается только возможностями источника питания.

Космические аппараты имеют солнечные батареи мощностью порядка 1 кВт. В этом случае ток в контуре может достигать порядка 10 А.

Тогда сила, приложенная к участку проводника, противоположному разрядному промежутку будет примерно равна $F = BIL$ (формула 3.1.3) во внешнем магнитном поле. Для случая, когда индукция поля $B = 0.12 - 0.18 \text{ Тл}$ (неодимовый магнит) и длина разрядного промежутка равна 0.1 м, сила тяги будет равна $F = BIL = 0.12 \times 10 \times 0.1 = 0.12 \text{ Н}$. При этом размер остальных частей контура не имеет значения.

Здесь может возникнуть вопрос: “А как же так? Выходит, что движитель тянет неодимовый магнит за собой?”. Вообще-то, здесь нет ничего особенного. В классических электродинамических движителях магнитное поле тоже “свое” и летит вместе с ракетой. Тем не менее, этот вопрос не такой простой и требует подробного рассмотрения.

Рассмотрим силовое взаимодействие двух замкнутых контуров с током, которое аналогично взаимодействию контура с постоянным магнитом или двух магнитов, так как постоянные магниты можно заменить эквивалентными контурами с током, полностью определяющими их силовое взаимодействие [8]. В частности, эквивалентный контур намагниченного по толщине прямоугольного или дискового магнита проходит по середине его боковых поверхностей (рис. 5).

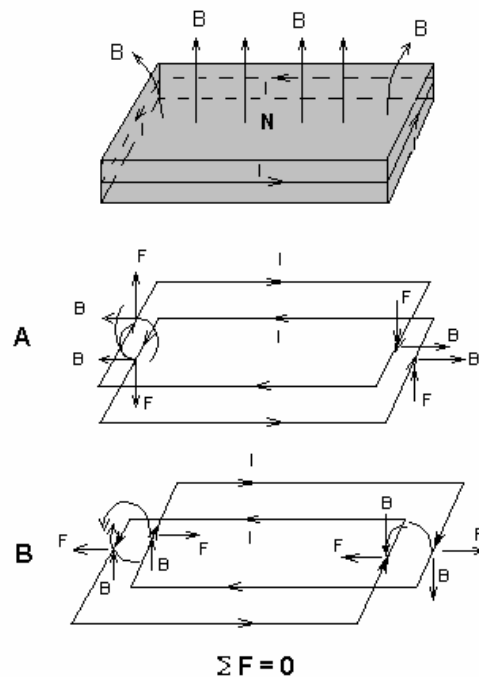


Рис. 5

Предположим, что два одинаковых контура с током помещены непосредственно друг над другом (рис. 5 А). Можно видеть, что в противоположных проводниках создаются одинаковые, но противоположно направленные силы. Если эти контура механически не связаны, то они стремятся разлететься в противоположные стороны по вертикали. Если же они жестко скреплены друг с другом, то суммарная сила, приложенная к этой сцепке, равна нулю и она никуда не движется.

Теперь сдвинем контура относительно друг друга в горизонтальной плоскости (рис. 5 В). Считаем, что расстояние по вертикали между ними мало. В этом случае появляются горизонтальные силы, стремящиеся раздвинуть контура относительно друг друга, но, если контура жестко скреплены, то суммарная сила опять равна нулю.

Это относится к любому другому взаимному расположению контуров (или постоянных магнитов) и, таким образом получается, что **невозможно сделать самодвижущееся или самовращающееся механическое устройство на комбинации постоянных магнитов.**

Теперь обрежем один из боковых проводников (АС на рис. 6) и замкнем его электрическим разрядником (рис. 4).

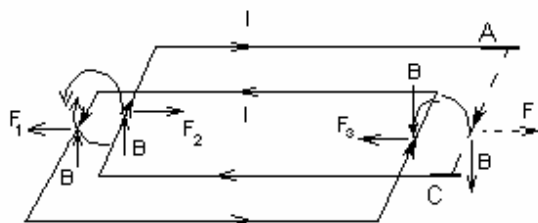


Рис. 6

В данном случае сила F_4 отсутствует, а точнее, приложена к потоку электронов, механически никак не связанному с контуром. Таким образом, если $F_1 = F_2 = F_3$ и $F_4 = 0$, то $F_1 + F_3 - F_2 = F_3$ и **остается нескомпенсированная сила F_3 , которая будет приложена ко всей связке контуров, жестко скрепленных между собой.** Тогда выходит, что контур тянет магнит (нижний контур) с собой.

Это объясняет, в частности, работу электродинамических движителей с проводящей средой (см. раздел 3.1) и электроразрядных движителей, описанных в данном разделе.

В случае же магнитного поля, созданного самим контуром (см. параграф 3.2.2.), сила тяги будет значительно меньше из-за меньшей индукции поля и составит порядка $F \approx 1 \times 10^{-4}$ Н при токе 10 А.

Таким образом получается, что электроразрядные движители могут обеспечить существенно большую тягу, чем электродинамические. При увеличении мощности бортового источника до 10 кВт тяга возрастет до 1.2 Н при тех же параметрах и токе в 100 А. В случае использования перспективных бортовых источников с мощностью до 1 МВт (“Транспортно-разгонный блок”), тяга может достигать 120 Н при токе в 10.000 А, который вполне достижим для, например, вольфрамового катода относительно небольших размеров (см. выше).

Здесь могут возразить, что замыкающиеся на аноде электроны несут количество движения, направленное в сторону, противоположную основной тяге.

Оценим возникающую в этом случае противотягу.

Поток электронов можно определить из выражения $I_e = \frac{dq}{dt} = \frac{I}{e} = \frac{100}{1.6 \times 10^{-19}} = 6.2 \times 10^{20}$ эл/сек

при токе 100 А.

При этом массовый расход электронов составит:

$$\dot{m} = I_e \times m_e = 6.2 \times 10^{20} \times 9.1 \times 10^{-28} = 5.6 \times 10^{-7} \text{ Кг/сек.}$$

Тогда сила противодействия (противотяга) будет равна

$$F_{\leftarrow} = \dot{m}V_{\rightarrow} = 5.6 \times 10^{-7} \times 2.7 \times 10^2 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ Н или } 0.15 \text{ мН.}$$

Это величина пренебрежимо мала по сравнению с силой тяги движителя за счет нескомпенсированной силы, которая равна 1.2 Н (при токе в 100А).

Таким образом, данный движитель является безопорным, так как пучок электронов, механически никак не связанный с контуром, замыкается на анод и ничего из такого движителя не вылетает.

3. 2. Безопорные электродинамические движители переменного тока

3. 2. 1. Движители с внешним магнитным полем

Как было отмечено выше, проводящая среда нужна только для замыкания контура.

В контурах двигателей, приведенных в предыдущем разделе, течет постоянный ток, который создает постоянную тягу. Если же пустить переменный ток, то контур будет двигаться взад и вперед с частотой тока, оставаясь на месте.

В то же время, у переменного тока есть преимущество – он проходит через диэлектрики (за счет токов смещения), одним из которых является вакуум. Таким образом, в контуре, приведенном на Рис. 7 будет течь переменный ток.

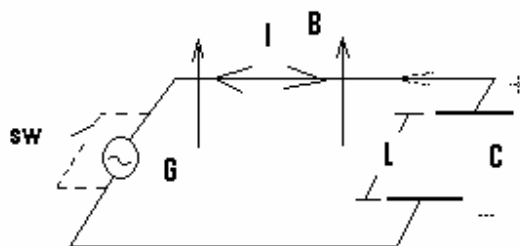


Рис. 7

В данном случае (конденсатор С – вакуумный, поле внешнее) переменный ток будет создавать переменную тягу с направлением, поочередно меняющимся на противоположное. В итоге, контур будет стоять на месте.

Теперь зарядим конденсатор С постоянным током и поставим вместо генератора G переключатель sw. Теперь замкнем переключатель. Конденсатор будет разряжаться, в контуре потечет постоянный ток, который вызовет импульс силы направленный в одну сторону. При этом сила будет пропорциональна расстоянию между пластинами конденсатора L. За счет этого контур начнет двигаться.

Теперь зарядим конденсатор. При зарядке конденсатора потечет постоянный ток, но направленный в противоположную сторону. Следовательно, при полном цикле зарядки-разрядки контур останется на месте. В то же время, если внешнее магнитное поле будет меняться одновременно с направлением тока, то такой движитель будет работать, создавая тягу, направленную в одну сторону.

Такой движитель, использующий внутреннее магнитное поле описан ниже.

3. 2. 2. Движители с внутренним магнитным полем

Во всех приведенных случаях предполагалось, что контур находится в некоем внешнем магнитном поле, а внутренне магнитное поле, вызванное протеканием тока в контуре мало, по сравнению с внешним.

Теперь уберем внешний источник магнитного поля и рассмотрим силы, действующие на замкнутый контур с протекающим в нем переменным током (рис. 8).

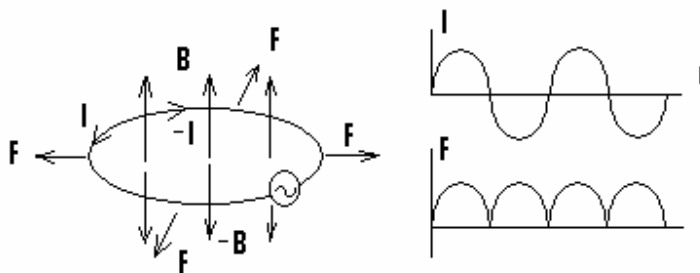


Рис. 8

В этом случае при перемене направления тока одновременно меняется направление вектора индукции B и, таким образом, силы (сила Ампера), приложенные к контуру НЕ МЕНЯЮТ НАПРАВЛЕНИЯ.

Таким образом, катушка с протекающим в ней переменным током всегда радиально растянута. Практика полностью это подтверждает. В частности, в экспериментах по получению сильного импульсного магнитного поля на соленоид подается мощный импульс тока. В результате, в течении короткого времени наводится сильное магнитное поле, а соленоид, фактически, взрывается - разрывается возникшими силами Ампера.

Возникающая в этом случае сила растяжения является переменной, с удвоенной частотой по сравнению с частотой тока.

Теперь установим в контуре воздушный (вакуумный) конденсатор.

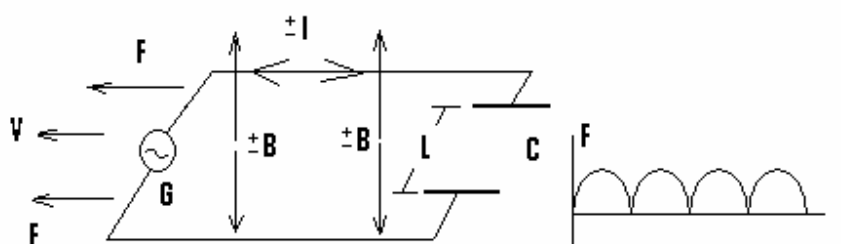


Рис. 9

Очевидно, что в этом случае на контур будет действовать нескомпенсированная сила, ПРИЛОЖЕННАЯ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ. А как же реактивное движение? В случае с проводящей средой она формально образует "реактивную струю". А что образует "реактивную струю" в данном случае? Вакуум? Это что, выходит, что конденсатор разгоняет вакуум или эфир?

Известно, что проводимость конденсатора обусловлена токами смещения в вакууме (эфире). Токи эти вполне реальные, создающие, в частности, магнитные поля. Что именно поляризуется в вакууме, современной физике не известно. В дорелятивистские же времена считали, что поляризуется эфир. Максвеллом была разработана модель эфира с деформируемыми вихрями, на основе которой он вывел свои уравнения (об этом современная физика старается не вспоминать). Так или иначе, вакуум (эфир) поляризуется и на этом основана вся электротехника, электроника и радиотехника..

Таким образом, устройство, приведенное на рис. 9 будет работать как безопорный двигатель, не тратящий на движение рабочее тело. Сила Лоренца, приложенная к элементу контура определяется по уравнению [5, 6]:

$$d\vec{F} = I (\vec{B} \times d\vec{L}) \quad (3.2.2.1)$$

В первом приближении в случае однородного поля сила, приложенная к контуру будет равна

$$F = IBL \quad (3.2.2.2)$$

где L – расстояние между пластинами конденсатора, I – ток в контуре, B – магнитная индукция – следствие протекания тока в контуре. Величина магнитной индукции может быть определена интегрированием уравнения Био-Савара, при этом магнитное поле определяется согласно принципу суперпозиции полей всеми проводниками, входящими в контур, включая боковые. Ток, протекающий в контуре, зависит от напряжения источника переменного тока и сопротивления конденсатора, определяемого по формуле: $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$, где f – частота тока. Очевидно, что эффективность (тяги) двигателя возрастает с частотой, но в случае, когда длина волны в проводнике ($\lambda \approx \frac{c}{f}$, где c – скорость света) соизмерима с размером контура, эффективность двигателя может меняться в зависимости от числа $\frac{\lambda}{4}$, укладывающихся в контур (как в радиоантенне).

Оценим тягу, создаваемую таким двигателем в случае кругового витка (Рис. 10).

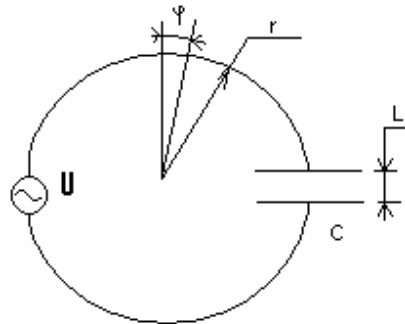


Рис. 10

Магнитная индукция, наведенная кольцевым витком в элементах витка определяется интегрированием уравнения Био-Савара [5, 6]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \int_0^{\pi - \frac{\pi}{500}} \frac{d\varphi_0}{\cos \frac{\varphi_0}{2}} \quad (3.2.2.3)$$

где $I = 2\pi fCU$ – ток, текущий в контуре, I – ток в катушке, r – радиус контура (0.5 метра), φ_0 – центральный угол. То есть, интегрируется полукольцо (от 0 до π) и результат удваивается. Но верхний предел интегрирования не может быть равен π (как для случая бесконечно тонкого провода), так как тогда $B \rightarrow \infty$. Тогда верхний предел определяется углом, при котором элемент проводника, который участвует в наведении индукции, остается на поверхности проводника (это особенно очевидно для прямоугольного витка). Для провода диаметром 1 мм этот предел примерно составляет $\pi - \pi/500$.

Тогда выражение для магнитной индукции в любой точке одиночного витка будет

$$B \approx \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \ln \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{1000} \right)}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4}} \approx \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \ln \frac{318}{1} \quad (3.2.2.4)$$

При этом, магнитное поле, приложенное к контуру, создается током, текущим в самом контуре (в первом приближении магнитное поле, создаваемое токами смещения в зазоре конденсатора C не учитываются, хотя оно также присутствует).

Сила, растягивающая виток определяется по формуле: $F = 2BIr$ (3.2.2.5)

Тогда сила, растягивающая виток будет равна $F \approx 1 \times 10^{-4}$ Н (для катушки, состоящей из одного витка диаметром 1 метр при токе в 10 А). Соответственно, если зазор конденсатора L равен диаметру витка $2r$, то сила тяги также будет равна $F \approx 1 \times 10^{-4}$ Н.

Емкость воздушного конденсатора, приведенного на рис. 7, составит порядка 90 пФ, и его емкостное сопротивление составит порядка 200 Ом на частоте 10 МГц. То есть, для получения тока в 10 А, напряжение источника переменного тока должно быть порядка 2000 В.

Напряжение питания можно уменьшить, если частота источника – резонансная. Для этого можно применить конденсатор с диэлектриком. Так как диэлектрик механически связан с конденсатором, то создавать некомпенсированную силу будет только вакуумная составляющая диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1$). При этом общий ток по контуру будет определяться полной емкостью конденсатора, но только часть его ($1/\epsilon$) будет создавать некомпенсированную силу. Остальная же часть тока будет создавать силу, приложенную к скрепленному с конденсатором диэлектрику. Таким образом, увеличить силу тяги за счет диэлектрика не получится, но контур может быть при меньшей частоте питающего напряжения введен в последовательный резонанс, при котором сопротивление становится чисто активным, общий ток увеличивается и увеличивается также его часть, создающая некомпенсированную силу.

Приведенный расчет является грубым, оценочным, но тем не менее он позволяет оценить параметры такого движителя, которые оказываются близкими к параметрам электроракетных двигателей.

Кроме того, необходимо напомнить, что движитель, это только половина силового агрегата – двигателя, в который обязательно входит источник энергии. В химических двигателях топливо (продукты сгорания) является и источником энергии и обеспечивает движение, в то время, как у электроракетных двигателей эти функции разделены.

3. 2. 3. Безопорный движитель переменного тока с внутренним магнитным полем и подмагничиванием

Движитель, описанный в параграфе 3.2.1 можно усовершенствовать, существенно увеличив тягу за счет подмагничивания.

Схема такого движителя и его эквивалентная электрическая схема приведены на Рис. 11.

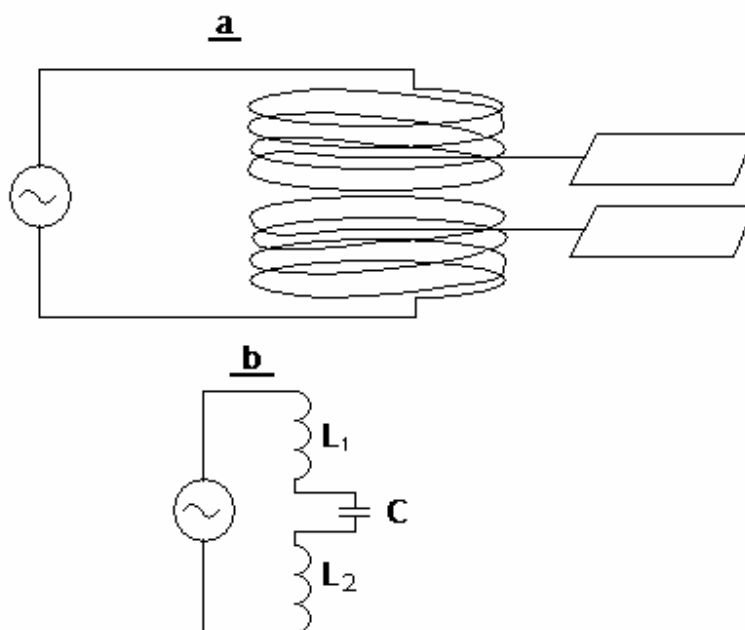


Рис. 11

Принцип движителя аналогичен приведенному в параграфе 2.2.1, то есть из одного витка вырезается часть и туда вставляется вакуумный конденсатор. В то же время, сам контур является многовитковым и эти витки пропорционально (в первом приближении) увеличивают магнитную индукцию в месте расположения «обрезанного» витка. При частоте генератора, равной резонансной частоте контура LC (последовательный резонанс), сопротивление контура определяется только его активным сопротивлением.

Можно оценить тягу, создаваемую таким движителем.

Предположим, что цилиндрическая катушка диаметром 1 метр имеет 1000 витков провода диаметром 1 мм и вакуумный конденсатор (см. параграф 2.2.1) подключен в разрыв катушки в ее середине и его зазор (расстояние между пластинами) равно диаметру витка. Очевидно, что в данном случае нескомпенсированная сила приложена к половине одного витка (вне зависимости, сколько витков в контуре), а магнитная индукция будет определяться количеством витков в катушке. Фактически получается, что тяга такого движителя больше тяги движителя с одним витком в N раз, где N – число витков.

Резонансная частота (последовательный резонанс) контура на рис. 8b составит порядка 11 МГц, а активное сопротивление катушки будет порядка 60 Ом. Так как сопротивление контура на частоте последовательного резонанса является чисто активным и равным активному сопротивлению катушки, то мощность, потребляемая таким контуром, будет равна $P = I^2 R$, где R – сопротивление катушки.

Магнитная индукция, наведенная кольцевым витком в элементах витка определяется интегрированием уравнения Био-Савара [5, 6] по формулам 3.2.2.3, 3.2.2.4 и 3.2.2.5 приведенным в разделе 3.2.2.

Тогда сила, растягивающая виток будет равна 0.1 Н (или 10 Г) для катушки, состоящей из 1000 витков при том же токе в 10 А (см. раздел 3.2.2) и расстоянии между пластинами конденсатора, равному диаметру витка. В этом случае нескомпенсированная сила, опять же, приложена к половине ОДНОГО витка, но индукция определяется всеми 1000 витками, которые фактически осуществляют подмагничивание. В данной конструкции можно, опять же, применить конденсатор с диэлектриком. Увеличения тяги за счет этого не будет, но частоту питающего напряжения можно существенно уменьшить.

Мощность, потребляемая таким движителем, составит порядка 6кВт, что соответствует мощности, потребляемой классическими электроракетными двигателями, питаемыми солнечными батареями космических аппаратов.

Такой же результат можно достигнуть используя отдельную катушку подмагничивания L , которая создает переменное магнитное поле, синхронизированное с частотой тока протекающего в основной катушке. В этом случае основная катушка может состоять из одного витка (рис. 12).

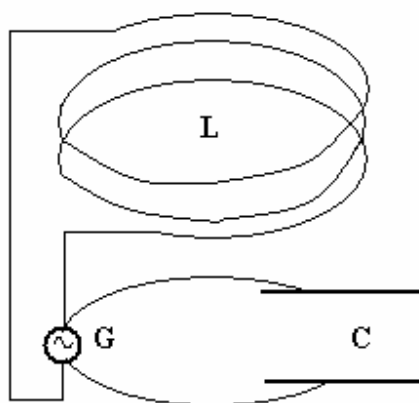


Рис. 12

Таким образом, тяга таких двигателей является примерно такой же, как у традиционных электроракетных двигателей, использующих рабочее тело, при том же энергопотреблении, но, такие двигатели не расходуют рабочее тело. Такие двигатели, также как и традиционные, требуют отдельного источника питания, а их тяга получается пропорциональной потребляемой мощности в соответствии с принципом сохранения энергии.

Кроме того, нужно учитывать, что такой двигатель будет работать как радиантенна и, соответственно, будет создавать мощное электромагнитное излучение.

Электроразрядный же двигатель, описанный в разделе 3.1.1, создавать побочных эффектов не должен.

4. Фотонный двигатель - безопорный движитель

Для наглядности представим, что в фокусе некоего параболического зеркала установлена лампа, излучающая в сферу (см. Рис. 13).

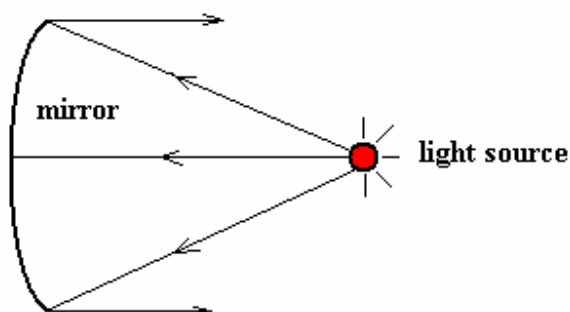


Рис. 13

Согласно любой модели (корпускулярной, фотонной и электродинамической) сила, действующая на такую лампу, скомпенсирована.

Часть излучения лампы перехватывается зеркалом, отражается и создает тягу.

Корпускулярную теорию не рассматриваем, так как она является устаревшей и, к тому же, неверной.

Согласно «фотонной теории» (так как фотоны сейчас официально признаны «безмассовыми частицами», не имеющими ни массы покоя ни «релятивистской массы») излучатель (лампа) не расходует рабочее тело и тяга происходит без «отброса массы».

Согласно электродинамическому объяснению светового давления, оно создается токами, наведенными в металле (диэлектрике) вектором E электромагнитной волны. Этот ток взаимодействует с магнитным полем волны (вектор B), создавая силу – силу светового давления [6]. При смене фазы волны, фазы векторов E и B меняются на противоположные одновременно, так что сила (так же, как и вектор Пойнтинга) остается направленной вдоль вектора скорости волны (сила получается пульсирующей с удвоенной частотой волны). В этом случае тем более очевидно, что никакой «отброс массы» в создании тяги фотонного двигателя не участвует. Таким образом, фотонный двигатель является классическим представителем безопорных движителей. В частности, это отмечено в [1] (TABLE 1-1, page 2).

Кроме того, анализ показывает, что безопорными двигателями также являются радиантенны с ассиметричной диаграммой направленности [7], в частности, зеркальная антенна (рис. 14) с дипольным возбуждением.

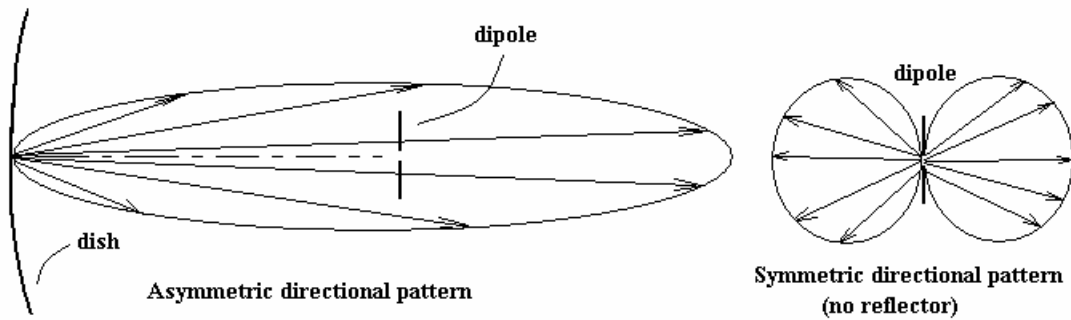


Рис. 14

Из рис. 14 видно, что такая антенна работает в точности как фотонный двигатель, изображенный на рис. 12, только диполь здесь используется вместо лампы. Сам же диполь тяги не дает, так как его диаграмма симметрична.

Кроме того, такие антенны как рупорная и волноводная (рис. 15) также могут работать как фотонные безопорные двигатели, причем их тяга зависит от остроты диаграммы направленности (от коэффициента усиления антенны).

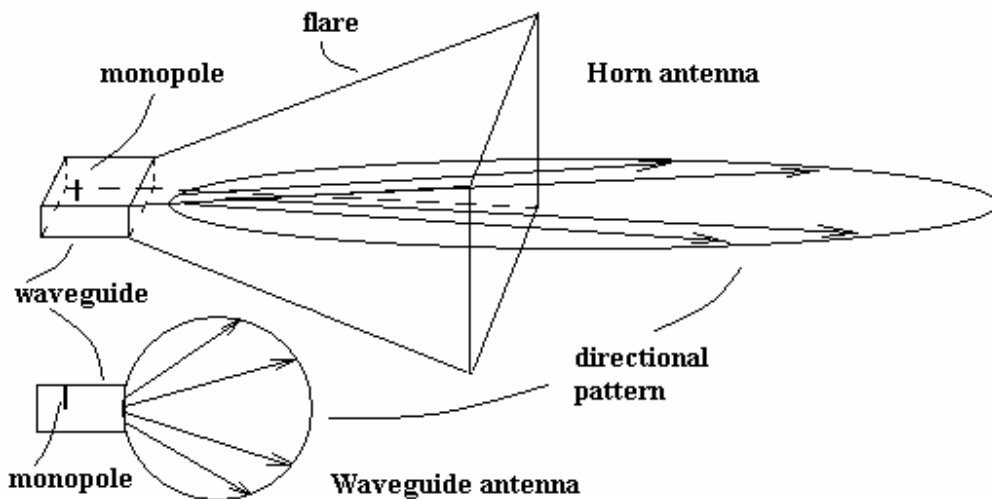


Рис. 15

В этом случае излучение отражается от передней стенки волновода.

Можно оценить тягу таких фотонных двигателей.

Световое давление на зеркальную поверхность определяется по формуле [6]:

$$p = \frac{w}{C}(1+R) \quad (4.1)$$

где w – плотность мощности излучения (Вт/м²), C – скорость света (м/сек), $R = 1$ для зеркала и $R = 0$ для черной поверхности. Тогда сила тяги будет определяться по формуле:

$$F = pS = \frac{wS}{C}(1+R) = \frac{W}{C}(1+R) \quad (4.2)$$

где W – мощность источника излучения, S – площадь отражателя.

При мощности излучения в 10 кВт (зеркальный отражатель) сила тяги будет порядка 0.6×10^{-4} Н, что соответствует величине тяги, развиваемой одновитковым контуром с конденсатором,

описанном в параграфе 3.2.2. Причем получается, что сила тяги не зависит от размера зеркала (если тот же телесный угол перехватывается зеркалом).

Это свидетельствует о том, что **фотонный и конденсаторный двигатели используют один и тот же принцип** – взаимодействие токов (наведенных электрической составляющей эл.маг. волны в случае фотонного двигателя) с магнитным полем (магнитным полем эл.маг. волны – для фотонного двигателя). То есть, конденсаторный двигатель фактически является близким родственником фотонного.

В то же время, подмагничивание переменным внешним полем позволит существенно увеличить силу тяги таких двигателей.

К сожалению, подмагничивание может работать только для конденсаторных двигателей, питаемых относительно низкочастотными источниками (радиочастоты), а для фотонных двигателей подмагничивание очень трудно реализовать.

5. Заключение

Многие случаи, являющиеся классическими примерами реактивного движения, на самом деле являются только видимостью реактивного движения. В этих случаях тяга создается нескомпенсированной силой, приложенной к оболочке двигателя или к электрическому контуру. Особенно это очевидно в случае фотонного двигателя, являющегося по сути безопорным, и электроракетных двигателей, где проводящая среда нужна только для замыкания электрического контура. Разновидностью такого двигателя является электроразрядный двигатель постоянного тока с внешним магнитным полем и вакуумный конденсаторный двигатель переменного тока с собственным магнитным полем, где замыкание электрического контура достигается за счет токов смещения в вакууме. Такой двигатель (движитель) может считаться безопорным, не создающим реактивной струи с нулевым расходом рабочего тела. Характеристики таких двигателей (тяга и энергопотребление) близки к характеристикам современных электроракетных двигателей.

6. Список литературы

1. George P. Sutton, Oscar Biblarz, *Rocket propulsion elements*, A Wiley-Interscience Publication, 7-th ed., NY, 2001
2. Алемасов В.Е., Дерегалин А.Ф., Тишин А.П. *Теория ракетных двигателей*, М.: Машиностроение, 1980
3. *Теория ракетных двигателей*, Курс лекций, МВТУ 1971-1974
4. Л.А. Квасников, Л.А. Латышев и др. *Теория и расчёт энергосиловых установок космических летательных аппаратов*. - М.: МАИ, 2001
5. Edward M. Purcell, David J. Morin, *Electricity and Magnetism*, 3d ed., Harvard University, Massachusetts, 2013
6. Б.М Яворский, А.А. Детлаф, *Справочник по физике*, М., Наука, 1964
7. John D. Kraus, *Antennas*, Second Edition,
8. Г. Ивченко, «Специфика силового и индукционного взаимодействия постоянных магнитов с проводниками, токами и зарядами. Эквивалентные схемы постоянных магнитов. Униполярные и тангенциальные электромашины. Законы электромагнетизма. Физическая природа магнитного поля», <http://new-idea.kulichki.net/?mode=physics>

Дополнительный список

9. Андре Анго, *Математика для электро-и радиоинженеров*, М, Наука, 1967
10. Г. Ивченко, *Реактивное и “безопорное” движение. Электродинамические безопорные двигатели.*, <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9265.html>
11. *Физические величины*, Справочник, Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. , М, Энергоатомиздат, 1991