

УДК533.6(075.8)

Н.Г.Куць

Луцкий национальный технический университет

## РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БАЗЫ НА ТРАНСПОРТЕ

*При разработке новых двигателей для транспорта и по мере совершенствования накопителей электрической энергии в виде большой емкости аккумуляторов и конденсаторов электрические моторы и генераторы будут вытеснять тепловые двигатели различных типов. Данные, полученные в результате физико-математического моделирования генератора, подтверждают возможность создания резонансного магнитодинамического моторгенератора переменного тока при вращении постоянных магнитов в резонансных RLC -контурах. Применение таких мото-генераторов на транспорте позволит существенно увеличить рабочий ресурс всех видов транспорта*

Ключевые слова: *Мотор-генератор, электрические машины, , индуктивно-емкостные машины, без топливные электрогенераторы*

**Введение.** В настоящее время в развитых странах мира - США, Франции, Англии, Германии, России - идут интенсивные разработки новых двигателей для транспорта как малой так и большой грузоподъемности, которые должны длительное время находиться в работе. В этой связи к бортовой энергетике транспорта предъявляются весьма жесткие требования, которые кратко сформулируем следующим образом: - двигатели тепловые или электрические должны быть достаточно мощными; - массогабаритные параметры должны быть минимальными; - транспорт (автомобильный, авиационный) должен обладать длительным ресурсом работы; - транспорт должен иметь собственную техническую диагностику и на этой основе принимать правильное решение о дальнейшей эксплуатации всего бортового энергоблока; - управление энергоблоком должно быть сведено к минимуму. Удовлетворить перечисленные требования в полной мере - очень трудная задача, которую необходимо решать.

**Цель работы.** Конкретно последовательно рассмотрим, каким образом и в каком направлении следует ожидать решения следующих задач:

1. На какой теоретической базе создаются тепловые двигатели и электрические моторы и генераторы.
2. Какая теоретическая база позволяет осуществить компьютерное моделирование принципа работы и условий эксплуатации того или иного двигателя на новых физических принципах.
3. На какой теоретической основе работают современные тепловые двигатели.
4. В каком направлении происходит совершенствование электрических моторов и генераторов.

**Основная часть.** В тепловых двигателях происходит превращение тепловой энергии в механическую работу. Разработаны и нашли практическое применение в автомобилестроении тепловые двигатели самых различных конструкций: тепловым двигателям с внешним сжиганием топлива относятся поршневые, Стирлинга, турбовинтовые, турбореактивные и большой класс роторных двигателей. К тепловым двигателям с внутренним сгоранием топлива относятся поршневые карбюраторные, работающие по циклу Отто или Дизеля, роторные Ванкеля и разные его модификации. Двигатели поршневого типа по коэффициенту полезного действия обладают принципиальными ограничениями по двум причинам:

1. Используется только одна степень свободы из всех возможных в процессе преобразования тепловой энергии в механическую работу при сравнительно малых температурах, когда вращательные и колебательные степени свободы не возбуждены, что принципиально не позволяет превысить коэффициент полезного действия более 33%.

2. Неполное сгорание топлива. В процессе горения топлива реализуются три стадии. *Первая стадия* - газификация жидких капель топлива с выделением горючих газов. *Вторая стадия*-, в процессе сгорания горючих газов повышается температура и происходит образование углеродной пленки на поверхности жидких капель, которая разрушается взрывообразно, поставляя в зону горения сажевые частицы. *Третья стадия*: горение сажевых частиц приводит к существенному разогреву горючей смеси, максимальная температура которой достигается после полного сгорания сажевых частиц. На реализацию каждой стадии горения требуется определенное время.

В настоящее время, когда техника аккумуляции электрической энергии и ее превращения в тепловой вид энергии не достаточно разработана, обращено внимание на индуктивно-емкостные электрические машины, в которых энергообменные процессы осуществляются потокосцеплением магнитных и электрических полей. Вся мировая электромашинная энергетика базируется на электрических машинах индуктивного типа и в меньшей мере - на емкостных, для которых разработана общая теория с применением уравнений Максвелла. Эта теория охватывает машины постоянного и переменного тока индуктивного и емкостного типа.

Развитие энергетической базы на транспорте направлено на более широкое использование электрических моторов и генераторов. По мере совершенствования накопителей электрической энергии в виде большой емкости аккумуляторов и конденсаторов электрические моторы и генераторы будут вытеснять тепловые двигатели различных типов. Очевидно, что будущее - за созданием не отдельных моторов и генераторов, а за созданием таких систем, в которых мотор и генератор реализуются в единой конструкции в виде мотор-генераторов.

Рассмотрим, в каком направлении такие конструкции могут быть реализованы. Такие электрические машины обладают колебательными свойствами и могут работать в резонансном режиме. В работе [1] показано, что резонансные системы преобразования энергии открытого типа обладают коэффициентом преобразования энергии больше единицы, т.е., такие системы преобразования энергии могут входить во взаимодействие с другими видами энергии и осуществлять энергообменный процесс с коэффициентом полезного действия, близким к единице.

В индуктивно-емкостных машинах преобразование энергии разных видов осуществляется магнитодинамическими и емкостными системами во взаимодействии, формируя электромагнитное поле [2]. Магнитодинамические системы преобразования механической энергии в электрическую реализуются в двух вариантах. В первом варианте вращается рамка в магнитном поле, во втором - вращается магнитное поле вокруг рамки. Коэффициент преобразования механической энергии в электрическую определяется постоянными и переменными потерями:

$$КП = \frac{N_{\text{мех.}} - \Delta N}{N_{\text{мех.}}} \quad (1)$$

где  $N_{\text{мех.}}$  - мощность, от источника механической энергии;  $\Delta N$  — мощность потерь равна:

$$\Delta N = K + Q \quad (2)$$

Здесь  $K$  - мощность постоянных потерь;  $Q$  - мощность переменных потерь.

Постоянные потери мощности реализуются: - в механической системе вследствие преодоления диссипативных сил; - в сердечниках электромагнитных компонент системы, т.е., на преодоление токов Фуко и потерь гистерезиса на нелинейных элементах, используемых в системе индуктивностей и электрических емкостей; - в системах вентиляции для улучшения конвективного теплообмена с окружающей средой.

Переменные потери обусловлены: - потерями на активном и реактивном сопротивлениях; - потерями на преодолении энергий активации; - потерями на переходных процессах.

Из анализа обоих видов потерь следует, что наиболее целесообразно использовать первый вариант магнитодинамического генератора. В этом случае коэффициент преобразования механической энергии в электрических системах может быть доведен до 90%.

В настоящее время наметились следующие пути совершенствования магнитодинамических электрогенераторов: - создание систем оптимального управления в процессе эксплуатации; - использование резонансного режима преобразования энергии; - применение в магнитодинамических генераторах второго варианта преобразования механической энергии в электрическую; - применение второго варианта в магнитодинамических генераторах резонансного типа с индуктивностями без ферромагнитных сердечников.

Создание систем оптимального управления в процессе эксплуатации позволило резко уменьшить потери, возникающие в переходных процессах, которые являются основными при преобразовании механической энергии в электрическую в случае первого варианта реализации магнитодинамического генератора. Резонансный режим, предложенный в [3], позволил также резко уменьшить постоянные и переменные потери в магнитодинамических генераторах первого варианта преобразования механической энергии в электрическую.

Магнитодинамический генератор во втором варианте преобразования механической энергии в электрическую не позволяет реализовать большие мощности, поэтому используется в высокооборотных электрических двигателях и генераторах. Применение магнитодинамических

генераторов второго варианта в резонансном режиме позволяет не только реализовать большие мощности, но и получать избыточную энергию за счет взаимодействия с окружающей средой [4] вследствие конвективного теплообмена по принципу работы теплового насоса.

Если говорить про авиационный транспорт, то в настоящее время широкая дискуссия ведется вокруг бестопливных электрогенераторов. Ясно одно: это открытая система с перекачкой переменной энергии магнитного поля в резонансном режиме от одной частоты в другую. Откуда берется избыточная энергия - неясно. В результате получается, что электродинамика, построенная на базе уравнений Максвелла, не позволяет понять, в чем существо работы бестопливных электрогенераторов. В этом плане электродинамика нуждается в серьезном переосмыслении. Может быть, подход обоснования электродинамики с более общих позиций с использованием комплексного пространства и реального времени, предложенного в [2], позволит вскрыть глубинные процессы, формирующие электродинамику. Так, в [5] на основе введения в электродинамику реального магнитного заряда предложено обоснование работы таких генераторов. Однако магнитные заряды в природе не существуют, и это вызывает недоверие к подобному подходу.

В этой связи следует детально рассмотреть механизм преобразования механической энергии в электрическую, когда магнитодинамический генератор работает в резонансном режиме, и на этой основе провести оценку энергетической эффективности такого вида техники с обоснованием оптимальных условий работы подобных систем.

Принципиальная конструкция магнитодинамического генератора переменного тока изображена на рис. 1.

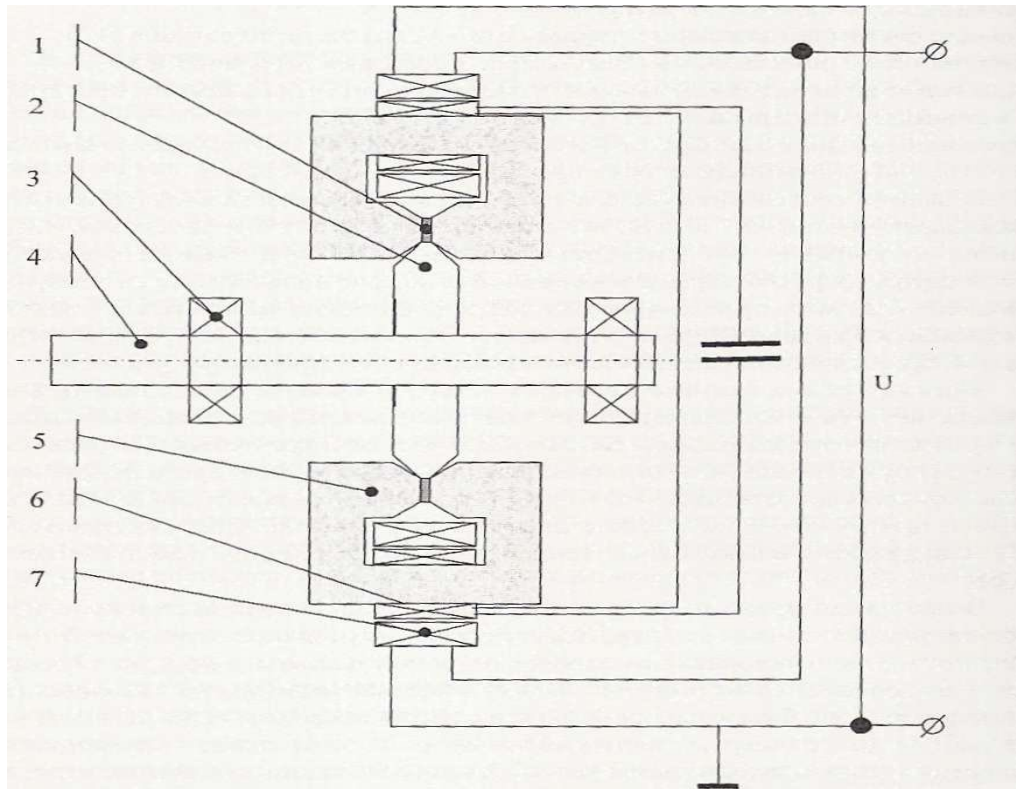


Рис. 1. Принципиальная схема резонансного магнитодинамического генератора переменного тока  
 1.- постоянный магнит; 2- металлический диск ротора; 3- радиальный шариковый подшипник; 4 – вал ротора; 5 – сердечник магнитной катушки; 6 – катушка индуктивности;  
 7 – обмотка выходного трансформатора.

Ротор такого преобразователя представляет собой металлический вал 4, на котором крепится металлический диск 2. На каждом металлическом диске по внешнему радиусу установлены плоские постоянные магниты 1. Форма и толщина плоского магнита может быть разной. В качестве первого варианта рассмотрим квадратную форму с минимально возможной толщиной. Число магнитов должно быть четным и определяется механической мощностью, которую необходимо преобразовать в электрическую энергию, когда такое устройство работает как генератор. Металлический диск с постоянными магнитами вращается по часовой или против

часовой стрелки, в результате в индуктивностях  $L$  наводится электродвижущая сила. Число индукционных катушек может быть меньшим или равным числу постоянных магнитов. Сердечники индукционных катушек 5 имеют зазор, почти равный толщине постоянных магнитов. Постоянные магниты расположены по окружности, которая по длине должна быть равной удвоенной длине всех используемых магнитов.

На рис. 1 показан только один металлический диск с постоянными магнитами. Количество таких дисков определяется той механической мощностью, которую необходимо преобразовать в электрическую энергию. Один металлический диск с постоянными магнитами, пересекающий зазор в катушках индуктивности, представляет собой отдельный модуль. На рис. 1 показан только один модуль, размещенный на металлическом вале ротора. Таких модулей может быть несколько. Между собой они соединены параллельно или последовательно электрической цепью. Мощность преобразования энергии возрастает как в первом, так и во втором случаях. При параллельном включении выходное напряжение остается неизменным (как для одного модуля), а мощность возрастает прямо пропорционально числу установленных модулей.

При последовательном соединении модулей выходное напряжение возрастает пропорционально числу модулей. Соответственно мощность и активное сопротивление также возрастают прямопропорционально числу установленных модулей. Так как мощность пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна активному сопротивлению, то выходная мощность не зависит от типа электрической связи между модулями. Она возрастает прямопропорционально числу подключенных модулей. Мощность, выходное напряжение, и выходной электрический ток во внешней цепи в такой модульной конструкции зависят от количества используемых модулей, количества постоянных магнитов в роторе генератора, размеров используемого магнитного материала сердечника индуктивности, количества витков катушки индуктивности, скорости вращения ротора магнитного генератора и, наконец, от формы используемых постоянных магнитов.

Катушки индуктивности и вращающийся металлический диск представляют собой замкнутую резонансную энергетическую систему. Мощность, вырабатываемая генератором, снимается с резонансного контура с помощью понижающего трансформатора 7.

Таким образом, выходная электрическая мощность магнитодинамического генератора зависит от многих параметров, а именно:

$$W_{\text{вык}} = f(\varpi, L, \sigma, K, \mu, B_m, V) \quad (3)$$

Здесь  $\varpi$  - круговая частота вращения ротора генератора;  $L$  - индуктивность отдельной катушки в модуле;  $\sigma$  - число витков отдельной катушки модуля;  $K$  - число индуктивных катушек в модуле;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость сердечника;  $B_m$  - магнитная индукция вращающихся магнитов;  $V$  - размер сердечника.

Управлять такой многопараметрической системой и добиваться оптимальных условий ее эксплуатации достаточно сложно, поэтому некоторые параметры необходимо задавать предварительно. Например, материал постоянных магнитов выбирается в соответствии с номенклатурой выпускаемой продукции. Из всех возможных магнитных материалов следует выбирать такой, который имел бы максимально возможную величину остаточной намагниченности, а коэрцитивная сила не должна быть меньше величины напряженности поля, приводящей к насыщению магнитного материала сердечника катушки индуктивности. Чтобы удовлетворить такому условию целесообразно вообще отказаться от ферромагнитного сердечника в катушках индуктивности.

Частота вращения ротора связана с частотой выходного электрического тока и количеством катушек индуктивности в статоре отдельного модуля. Частота выходного электрического тока должна соответствовать общепринятой, т.е., 50 Гц. Выходная мощность определяется параметрами механического источника, которая также известна. Выходное напряжение энергии задается внешним потребителем и должно находиться в пределах  $220 \pm 3\%$  В.

В результате, по заданной выходной мощности и выходному напряжению следует оптимизировать работу магнитодинамического генератора путем выбора величины результирующей индуктивности, которая зависит от магнитных свойств сердечника, количества витков в намотке катушек индуктивности, количества магнитных катушек индуктивности и размеров сердечника. По этим данным определяются массогабаритные и эксплуатационные характеристики магнитодинамического генератора. Снизить постоянные и переменные потери в магнитодинамическом генераторе можно путем применения резонансного режима работы.

### Физико-математическая модель формирования резонансного режима работы

При пересечении постоянными магнитами зазора магнитопровода каждой катушки индуктивности в модуле возникает ЭДС самоиндукции. Этот процесс возникновения ЭДС следует рассматривать в качестве внешнего источника возбуждения переменным током. Если параллельно к каждому модулю подключить электрическую емкость, то такую систему можно представить принципиальной электрической схемой, которая изображена на рис. 2. В этом случае ЭДС - контур по отношению к внешнему источнику переменного напряжения есть открытой системой

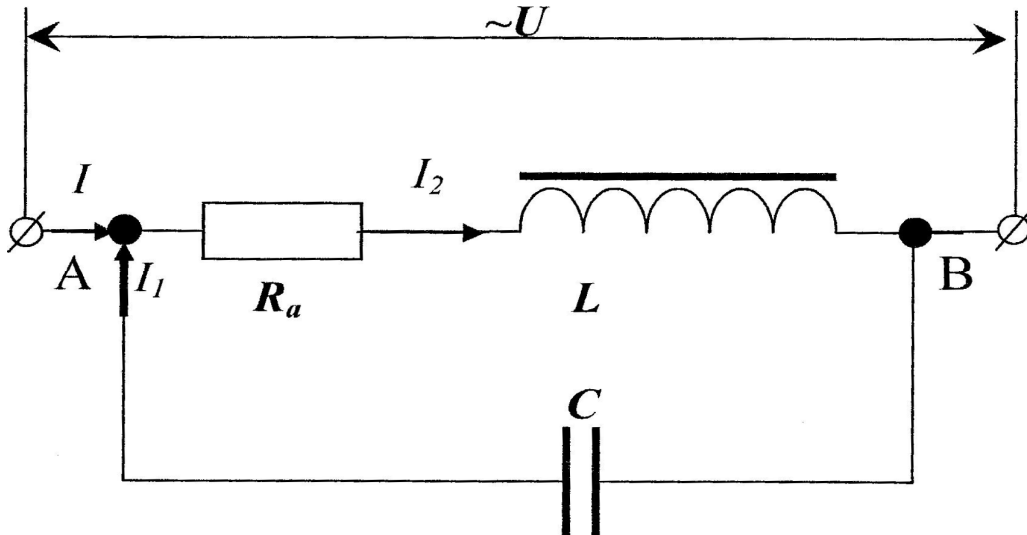


Рис..2. Принципиальная электрическая схема параллельного RLC- контура, питаемого переменным напряжением U

По существу реализуется параллельный RLC - контур, включенный во внешнюю цепь переменного напряжения. В такой цепи возникают колебания электрического заряда. При наличии в контуре активного сопротивления энергия электрического поля будет переходить в энергию магнитного поля и частично расходоваться на ленаджоулево тепло, и в соответствии с законом сохранения энергии:

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} + \int_0^1 R_a I^2 \cdot dt = const \quad (4)$$

Возьмем производную от правой и левой частей полученного равенства по времени t. Производная от интеграла с переменным верхним пределом по верхнему пределу равна подинтегральной функции. Учитывая это, будем иметь:

$$\frac{q}{c} \cdot \frac{dq}{dt} + LI \frac{dl}{dt} + R_a I^2 = 0 \quad (5)$$

Так как  $I = \frac{dq}{dt}$ , а  $dl = \frac{d^2q}{dt^2}$ , то после сокращения на  $\frac{dq}{dt}$  получим:

$$\frac{q}{C} + L \frac{d^2q}{dt^2} + R_a \frac{dq}{dt} = 0 \quad (6)$$

Правая часть равенства представляет собой падение напряжения на конденсаторе, падение напряжения на сопротивлении и ЭДС самоиндукции.

$$L \ddot{q} + R_a \dot{q} + \frac{1}{c} q = 0 \quad (7)$$

После деления на L уравнение приобретает вид:

$$\ddot{q} + \frac{R_a}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0 \quad (8)$$

Решение данного уравнения представляется функцией [2]:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (9)$$

где  $A = q_0 e^{-\beta t}$  - амплитуда колебаний зарядов в параллельном RLC- контуре:  $\beta = \frac{R_a}{2L}$  -

коэффициент затухания колебаний зарядов;  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - частота вынужденных колебаний заряда

внутри параллельного RLC- контура. В уравнении (9) амплитуда колебаний при воздействии внешней вынуждающей силы уменьшается со временем по экспоненте. Графически зависимость амплитуды со временем приведена на рис.3.

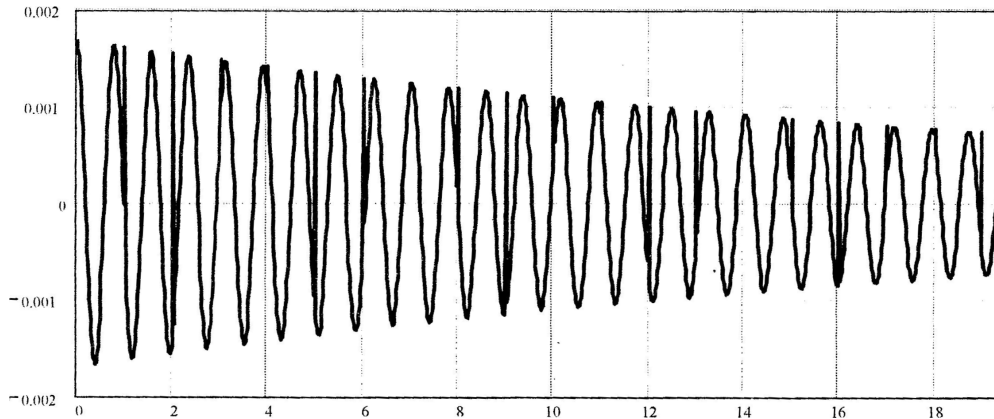


Рис 3. Зависимость амплитуды резонансных колебаний электрического заряда от времени

Коэффициент затухания  $\beta$  характеризует убывание амплитуды колебаний. Обозначив время уменьшения колебаний в  $e$  раз через  $\tau$ , легко получить значение  $\beta$ :

$$\frac{A_0}{A_0 e^{-\beta t}} = e \text{ или } e^{\beta t} = e \quad (10)$$

Отсюда

$$\tau = \frac{1}{\beta}, \quad (11)$$

Есть время релаксации. Для конкретного расчета, изображенного на рис.3, коэффициент релаксации составляет 23,15 с.

В такой резонансной системе важно знать потери на активном сопротивлении в колебательном контуре на период колебания. Для этого вводится логарифмический декремент затухания, который определяется следующим образом:

$$\Delta = \beta T, \quad (12)$$

где  $T$ - период колебаний.

Для энергетической характеристики вводится такое понятие как добротность контура. Эта величина равна:

$$Q = \pi N \quad (13)$$

где  $N$  - число колебаний в колебательном контуре за время релаксации, т.е., за время, когда амплитуда колебаний уменьшилась в  $e$  раз. Добротность характеризует резонансные свойства системы. Добротность для RLC - контура, как открытой системы, является коэффициентом связи с внешним источником энергии.

Для контура, изображенного на рис. .2, результирующее сопротивление по отношению к источнику переменного тока равно:

$$R_k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_a^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}} \quad (14)$$

Если индукционное  $\omega L$  и емкостное  $1/\omega C$  сопротивления равны, то наступает явление резонанса. В этом случае частота внешней вынуждающей силы

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2 \quad (15)$$

Здесь  $\omega_0$  — частота собственных колебаний RLC - контура. Так как коэффициент затухания всегда значительно меньше, чем частота собственных колебаний RLC - контура, то при резонансе имеет место совпадение частоты вынуждающей силы с частотой собственных колебаний контура.

Применим к RLC-контур, изображенному на рис.2. правила Кирхгофа. В точке А первое правило Кирхгофа дает:

$$I + I_2 = I_1 \quad (16)$$

На основании второго правила Кирхгофа в пренебрежении активным сопротивлением получаем:

$$I_1 \omega L - \frac{I_2}{\omega C} = 0 \quad (17)$$

Совместное решение уравнений (16) и (17) приводит к следующим равенствам [2]:

$$I = I_1(1 - \omega^2 LC) \text{ или } I = I_1(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}) \quad (18)$$

В резонансных условиях  $\omega \cong \omega_0$  и электрический ток во внешней цепи равен нулю и тогда  $I_1 = I_2$ . Следовательно, параллельный RLC - контур для приложенного переменного тока с частотой, равной частоте собственных колебаний контура, представляет собой бесконечное сопротивление. Это означает, что в резонансных условиях параллельный RLC - контур представляет собой замкнутую энергетическую систему по отношению к внешнему источнику переменного напряжения. Запишем применительно к такой системе, в соответствии с законом сохранения энергии, первое начало термодинамики, а именно:

$$dU_T + dA = 0, \quad (19)$$

Получается, что в резонансных условиях энергия, запасенная в колебательном контуре, расходуется на все виды работ за счет внутренней энергии. Если нет притока энергии извне, то переменные потери на активном сопротивлении компенсируются запасенной электрической энергией в контуре, а постоянные потери в сердечнике, за счет гистерезиса зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля, компенсируются за счет тепловой энергии, запасенной в магнитном сердечнике. Таким образом, в резонансных условиях параллельный колебательный контур является замкнутой системой по отношению к приложенному внешнему переменному напряжению и открытой системой по отношению к теплообмену с окружающей средой, т.е., является тепловым насосом по отношению к окружающей среде. Кроме этого, такой резонансный контур является активной магнитной антенной, воспринимающей магнитные волны и электромагнитные волны из окружающей среды.

Такая резонансная система потери на активном сопротивлении и при наличии существенного отбора энергии из системы на другие источники потребления может восполнять свои потери путем взаимодействия с внешним источником электромагнитного и магнитного излучения. Но тогда данная система работает не в стационарных резонансных условиях и является искусственно открытой. Учитывая такие свойства колебательного RLC - контура, сделаем конкретный расчет основных параметров электрического резонанса, не выходя за рамки уравнений Максвелла, записанных в реальном пространстве и минимум времени. Как осуществляется резонанс с учетом обобщенного заряда, введенного в [2], предстоит еще выяснить.

#### **Параметры электрического резонанса в магнитодинамическом мотор-генераторе**

Рассмотрим конкретно работу магнитодинамического мотор-генератора в следующих предположениях: постоянный магнит из хромистой стали со следующими параметрами: остаточная намагниченность  $B_m = 1$  Тл и коэрцитивная сила. Магнитные волны формируются магнитным диполем, а скорость их распространения предположительно может быть больше скорости света.  $H_c = 5500$  А/м [104].

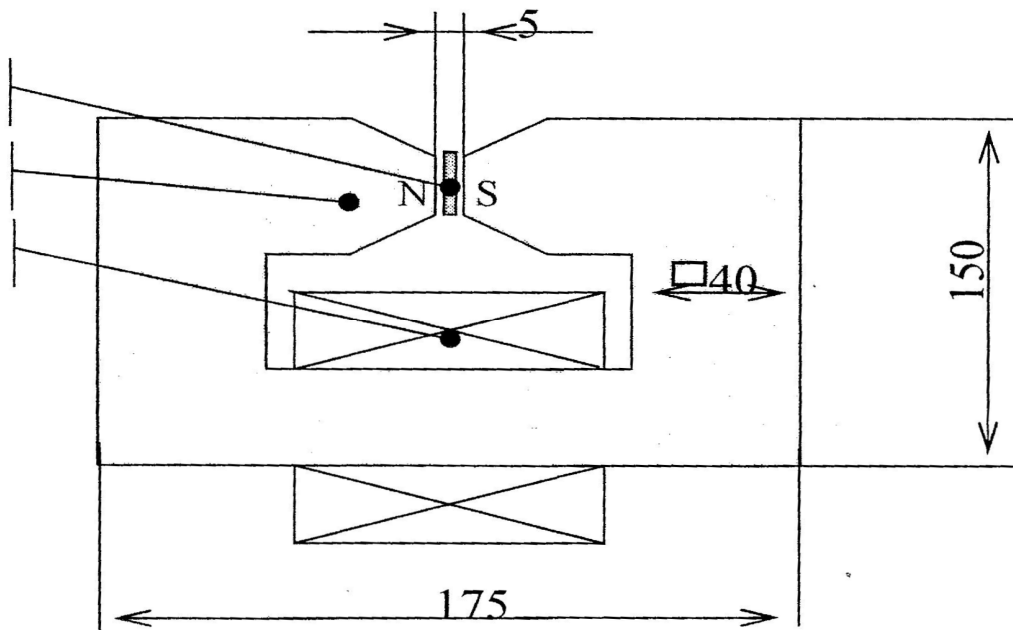


Рис.4. Габаритные размеры сердечника катушки индуктивности

На основании данных, относительная магнитная проницаемость постоянного магнита равна:

$$\mu = \frac{B_M}{\mu_0 H_c} = 145. \quad (20)$$

При заполнении зазора (рис. 4) магнитопровода катушки индуктивности магнитная индукция на границе раздела изменяется в соответствии с изменением относительной магнитной проницаемости, а напряженность магнитного поля при этом не изменяется и равна коэрцитивной силе постоянного магнита. Поскольку напряженность магнитного поля не изменяется при переходе от одного магнетика к другому, магнитная индукция в сердечнике должна соответствовать этой напряженности поля. Если использовать в качестве магнитного материала сердечника трансформаторную сталь с коэрцитивной силой  $H_c=50$  А/м (DIN46400 тип IV), то потери мощности на перемагничивание сердечника составят 11 Вт. Расчет сделан в соответствии с петлей гистерезиса, изображенной на рис. 9.30. Относительная магнитная проницаемость равна  $\sim 541$ . Анализируя оптимальные условия выработки электроэнергии одним модулем примерно 15 кВт, были установлены размеры сердечника, которые показаны на рис. 9.29. Материал постоянного магнита - вольфрамовая сталь с остаточной намагниченностью  $B_{\text{mag}} = 1$  Тл и с коэрцитивной силой  $H_{\text{mag}} = 5500$  А/м.

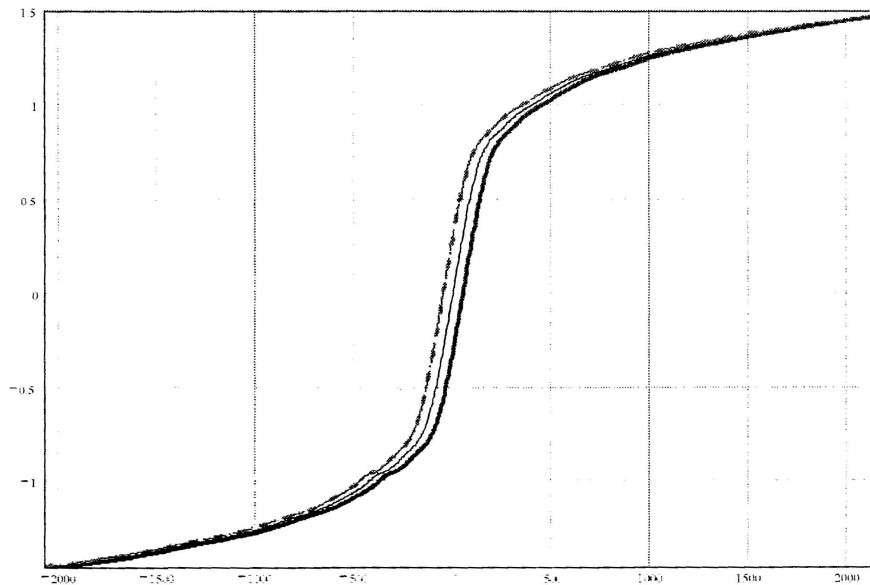


Рис.5. Расчетная петля гистерезиса для трансформаторной стали DIN46400 тип IV [104]



В соответствии с этой коэрцитивной силой, магнитная индукция в сердечнике катушки индуктивности составит  $B_0 = 2$  Тл. Оптимальное количество постоянных магнитов и катушек индуктивности при выходной мощности 15 кВт. соответственно, составило 12 и 6. По этим данным общий вес катушек индуктивности составляет 39 кг. При диаметре обмотки катушки индуктивности  $\varnothing 0.2$  мм. необходимое количество слоев в соответствии с выбранными размерами сердечника получилось 90. В результате этого, суммарное активное сопротивление составило 17,64 кОм, а результирующая индуктивность - 1,43 кГн.

При основной резонансной частоте RLC-контура емкость оказалась равной 0,7 нФ. ЭДС индукции вычислялась по формуле:

$$E_{инд} = n^2 L \nu B_0 l \quad (21)$$

где  $n$  - количество катушек индуктивностей;  $L$  - индуктивность отдельной катушки;  $\nu$  - скорость прохождения постоянного магнита в зазоре катушки индуктивности;  $B_0$  - магнитная индукция в сердечнике катушки индуктивности, наводимая постоянным магнитом;  $l$  - размер постоянного магнита.

В результате выполненного расчета ЭДС составила  $E_{инд} = 2,9$  кВ на каждой отдельной катушке индуктивности. Резонансный ток находим по формуле:

$$I_{рез} = \frac{E_{инд}}{2\pi f L n} \quad (22)$$

Здесь  $f$  - частота резонансного тока, равная 50 Гц. В рассматриваемой конструкции резонансный ток составил 0,004 А. Резонансный ток определяет потери на активном сопротивлении внутри резонансного контура. В соответствии с этими потерями выбирали диаметр провода катушки индуктивности. Добротность контура определяется по формуле:

$$Q = \frac{2\pi f L n}{R_0} \quad (23)$$

В рассматриваемом случае добротность  $Q = 255$ . Такой добротности соответствует ширина полосы резонанса, равная 12 мин<sup>-1</sup>. Отбор выработанной энергии в резонансном контуре осуществляется вторичной обмоткой всех катушек индуктивностей. Обмотки трансформатора подключены последовательно, что позволило резко уменьшить расход меди за счет уменьшения толщины обмотки трансформатора. В соответствии с основной частотой колебания резонансного тока (50Гц), скорость вращения вала ротора составила 250 мин<sup>-1</sup>. В соответствии с расчетным значением добротности и коэффициента затухания, колебания электрического заряда в резонансном контуре представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что время релаксации равно 1,621 с. Такое время релаксации вполне приемлемо, так как за 0,02 секунды колебательный контур подпитывается внешним возбудителем.

При генерации электрической энергии 15 кВт мощность потерь составила 0,133 Вт. В сравнении с рис.3, где приведены зависимость амплитуды электрического заряда при неоптимальном режиме работы, оптимальный режим работы существенно отличается по своим резонансным характеристикам.

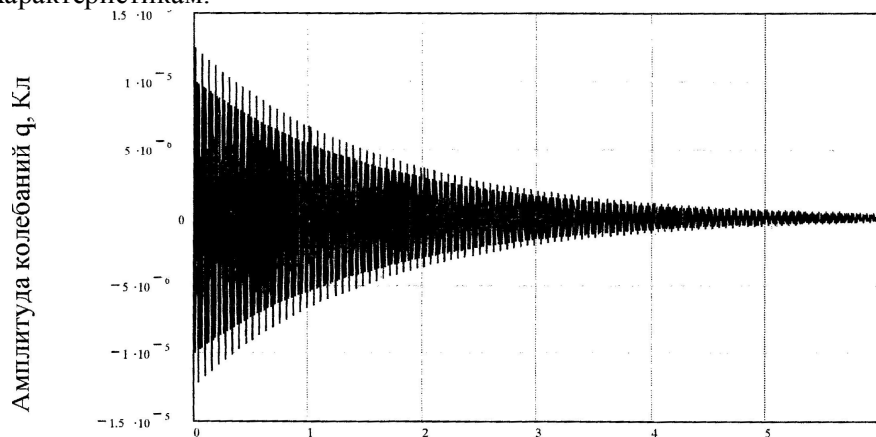


Рис.6. Зависимость амплитуды колебаний электрического заряда в резонансном контуре от времени

**Заключення.** Существенное отличие оптимального режима работы магнитодинамического генератора состоит в том, что количество магнитов на металлическом диске ротора должно быть в несколько раз больше, чем катушек индуктивности. В рассмотренном варианте количество постоянных магнитов в 4 раза больше, чем катушек индуктивности, что позволило в меньших массогабаритных размерах реализовать преобразование механической энергии в электрическую в оптимальных условиях с коэффициентом преобразования, близким к единице.

Таким образом, данные, полученные в результате физико-математического моделирования генератора, подтверждают возможность создания резонансного магнитодинамического мотор-генератора переменного тока при вращении постоянных магнитов в резонансных RLC -контурах. Применение таких мотор-генераторов на транспорте позволит существенно увеличить рабочий ресурс всех видов транспорта.

1. Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Современная энергетика. Пути и методы развития и применение на транспорте. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник ( за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство». - Луцьк: ЛНТУ, 2010. С. 162-165.
2. Гречихин Л.И., Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика. –Мн.: Право и экономика,2008 – 302с.
3. Копылов И.П., Гандилян С.В., Гандилян В.В., Некоторые вопросы обобщенного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии// «Электротехника», 1999, №9, с.25-40.
4. Рощин В.В., Годин С. Экспериментальное исследование физических эффектов в динамической магнитной системе.//Международный конгресс –2000.»Фундаментальные проблемы естествознания и техники».Санкт-Петербург,2000, Т.1,№1, с.202-205.
5. Хмельник С.И. Автономный бестопливный магнитный генератор. Интернетсайт [www.Spasebloom.net](http://www.Spasebloom.net).2007