

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО

Часть 10. Преобразование потенциальной энергии материала в электроэнергию

Настоящая статья является дальнейшим развитием магнитополевой теории и методов измерений и преобразований физических величин на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал. В статье изложена сущность магнитополевого метода преобразования энергии электромеханической системы замкнутого типа в электрическую энергию. Описано ряд технических решений магнитополевых преобразователей потенциальной энергии материала в электрическую энергию. Показана возможность использования разных типов нагрузок: активной, комплексной и реактивной. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитополевые методы и средства преобразования потенциальной энергии материалов.

Ключевые слова: магнитополевые методы, преобразование энергии, электромеханическая система.

V.T. KONDRATOV

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National academy of Science of Ukraine

FUNDAMENTAL METROLOGY. THE MAGNETIC-FIELD THEORY OF MEASUREMENTS WITH USE OF THE PHENOMENON OF ENERGY TRANSFER AND INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE

Part 10. Transformation of potential energy of a material to the electric power

This article is a further development of the magnetic-field theory and methods for measuring and transforming physical quantities based on the phenomenon of energy and information transfer through material. New, more adequate definitions of the concepts of energy, electrical energy and electrical power are proposed. The essence of the magnetic field method of converting the energy of an electromechanical system of a closed type into electrical energy is described. It is argued that as a source of electrons (moving material particles) a mechanical system of a certain configuration should be used that ensures the fulfilment of two fundamental laws: the law of conservation of mechanical energy and the law of conservation of electromagnetic energy. It is proposed to use a planar double-circuit waveguide as a mechanical system, which is a closed-loop mechanical system that ensures the implementation of these laws. The possibility of using the phenomenon of energy and information transfer is established not only for solving measurement problems, but also for solving the problem of converting the electromagnetic form of energy of a mechanical system of a closed type into electrical energy. For the manufacture of the waveguide, it is necessary to choose a material with high electrical conductivity, which depends on the concentration of free, electrically charged particles that are not associated with atoms and molecules or with the crystal structure of the material. The combined schemes of magnetic-field energy converters with feedback on the magnetic field and with different types of loads: active, complex and resonant are given and described. Of most interest are converters using boost RF transformers of a resonant type. A foundation has been laid for the development of a new direction in conversion technology and in electrical engineering — magnetic-field conversion into electrical energy of the electromagnetic form of the energy of a mechanical system of a closed type.

Keywords: magnetic field methods, energy conversion, electromechanical system.

Введение

Энергия не исчезает и не может быть создана из ничего, а выступает в различных своих формах, например, в форме тепловой, механической, световой, электрической энергии и т. д. [1].

По своей природе различают электрическую энергию, тепловую, механическую, энергию электрического поля атмосферы, энергию магнитного поля, энергию приливов, волн, течений, льда, энергию ветра, энергию за счет ядерного синтеза, химическую энергию, в том числе энергию за счет сверхэффективного электролиза, энергию топливных элементов и др.

В настоящее время освоены большинство из перечисленных родов энергий, созданы соответствующие преобразователи, ведутся исследования по повышению их эффективности и т. д. Особое внимание уделяется развитию альтернативных источников энергии, использующих новые физические эффекты и явления.

В 70-е годы XXI века было открыто явление переноса энергии и информации сквозь материал (вещество), получила развитие новое научное направление в метрологии и измерительной технике — магнитополевая теория измерений. В ее основе в качестве нового принципа измерений используется упомянутое явление переноса. Были разработаны и защищены патентами Украины магнитополевые методы и средства измерений физических величин. Впервые в мире измерены энергия Ферми материалов макромира, энергия дискретных энергетических уровней Ландау, удельная электропроводность листовых материалов и т. д.

Исследования показали возможность использования магнитополевой теории и для решения задач однопроводной передачи энергии и преобразования разных форм энергии физических систем в электрическую энергию.

Целью работы является развитие новой ветви магнитополевой теории измерений, направленной на преобразование разных форм энергии физических систем в электроэнергию.

Объектом исследований являются магнитополевые (МП) преобразователи разных форм энергии физических систем в электроэнергию.

Предметом исследований являются магнитопольевые методы и средства преобразования энергии электромеханической системы в электроэнергию.

Результаты исследований

Рассмотрим новый подход к преобразованию энергии электромеханической системы в электрическую энергию на основе явления переноса энергии и информации сквозь материал.

1. Преобразование потенциальной энергии материала в электроэнергию

1.1. Энергия, новые определения

Энергия — единая мера различных форм движения и взаимодействия материи, мера перехода движения материи из одних форм в другие [2].

Электрическая энергия — это способность электромагнитного поля производить работу, преобразовываясь в другие виды энергии [3].

Согласно [4], электрическая энергия — это способность электромагнитного поля совершать работу под действием приложенного напряжения в технологическом процессе её производства, передачи, распределения и потребления.

Такие определения не корректны, т.к. не отражают физическую сущность энергии. Электрическая энергия — это не способность, а свойство. Предлагается иная трактовка указанных понятий.

Энергия — свойство поля той или иной физической природы совершать работу по изменению формы движения и взаимодействия материи или по переходу движения материи из одних форм в другие.

Электрическая энергия — свойство электромагнитного поля совершать работу по изменению параметров движения и взаимодействия электронов и других отрицательно заряженных квазичастиц или по переходу их движения из одних форм в другие.

Электрическая мощность — это свойство электромагнитного поля совершать работу по перемещению электрических зарядов в единицу времени.

Электрическую энергию получают путем преобразования указанных видов и форм энергий в иные, чаще всего в электроэнергию.

Следует отметить, что до настоящего времени еще ведутся споры, как правильно говорить: «вид энергии» или «форма энергии». Точку в этом споре поставил проф. И.Ш. Коган, предложивший классификацию понятий, связанных с формами и видами энергии в термодинамике [5].

Согласно Большой Советской Энциклопедии «энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает; она только может переходить из одной формы в другую». В этом предложении речь идет только о формах движения и о формах энергии [5]. Безусловно, различные формы энергии следует рассматривать в соответствии с различными формами движения материи.

В популярном метрологическом справочнике [6] сказано: «различным видам движения и взаимодействия материи соответствуют разные виды энергии: механическая (кинетическая и потенциальная), внутренняя, электромагнитная, ядерная и др.». Здесь уже говорится о видах движения и видах энергии.

На рис. 1 приведена, связанная с энергией системы, классификация физических понятий по И.Ш. Когану, дополненная еще одной известной формой энергии системы — электромеханической. Последняя занимает в классификации промежуточное положение между механической и чисто электрической формой энергии системы (на рис. 1 выделен утолщенными линиями блок и его связи).

Электромеханическая форма энергии присуща, например, плоским двухконтурным волноводам, — электромеханическим системам замкнутого типа, изучаемым автором настоящей статьи. В такой системе направленное движение электронов характеризует механическую форму энергии системы, а явление переноса ими зарядов — электрическую.

Фактически классификация, приведенная на рис. 1, представляет собой классификацию форм и видов энергии в электродинамике (без указания природы энергий).

В приведенной классификации используется несколько новых понятий: эксергия, анергия и инергия. Приведем их определения согласно [5].

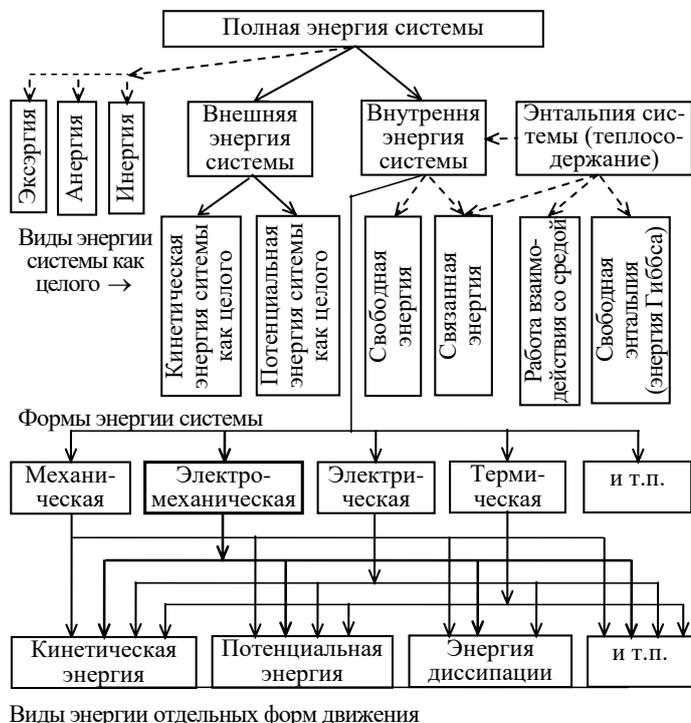


Рис. 1. Классификация физических понятий, связанных энергией системы

Понятия эксергия и анергия призваны различать полную энергию системы только по признаку работоспособности. Эксергия — это работо-способная (технически пригодная) часть полной энергии системы. Анергия — это неработо-способная (технически непригодная) часть полной энергии. Инергия — это часть энергии системы, участвующая во внутренних превращениях безотносительно к тому, в чем эти превращения выражаются — в совершении полезной или диссипативной, внешней или внутренней работы¹.

Следует помнить, что «все виды энергии (потенциальная, кинетическая, энергия диссипации, потенциальная энергия положения и потенциальная энергия деформации²) относятся к любой форме движения и к любой форме энергии» [5].

1.2. Магнитопольевой метод преобразования потенциальной энергии материала в электроэнергию

Рассмотрим сущность магнитопольевого метода преобразования потенциальной энергии материала в электроэнергию. Основными эле-ментами (частицами), передающими электри-ческую энергию являются электроны материала (или вещества). Они обладают определенной частотой вращения и потенциальной энергией в заданном объеме материала. Проблема заключается в разработке такого метода преобразования, при котором потенциальная энергия материала (вещества) преобразуется, в конечном счете, в электрическую энергию посредством, например, изменения формы взаимодействия материи и обеспечения направленного движения электронов, как носителей электрических зарядов, в толще материала заданного объема.

Исследования показали, что в качестве источника электронов (движущихся материальных частиц) должна использоваться электромеханическая система такой конфигурации, при которой одновременно выполняются два фундаментальных закона: закон сохранения механической энергии и закон сохранения электромагнитной энергии. Кроме того, должен быть известен закон симметрии, по которому атомы размещены в ячейке решетки кристалла, и средняя длина свободного пробега электронов. В качестве таковой предложено использовать плоский двухконтурный волновод, представляющий собой электромеханическую систему замкнутого типа с высокой удельной электропроводностью, обеспечивающую выполнение указанных законов.

Благодаря использованию плоского двухконтурного волновода было открыто явление переноса энергии и информации сквозь исследуемый материал. Из этого материала был изготовлен волновод с априори заданными параметрами (электропроводностью, толщиной, площадью поверхности, объемом) и конфигурацией. Изучение явления переноса показало возможность использования его не только для решения измерительных задач, но и для решения задачи получения свободной энергии из запасенной в материале энергии.

Был предложен метод преобразования энергии, в основу которого положено явление переноса энергии (и информации) сквозь материал, из которого изготовлен плоский двухконтурный волновод, а также явление индукции ЭДС в приемном контуре. Указанные явления проявляются благодаря направленному воздействию на материал стабилизированного (по значению частоты и напряженности) магнитного поля высокой частоты. Это силовое поле формируется током высокой частоты и прямоугольной формы (типа меандр), текущим через катушки индуктивности. Последние располагаются перпендикулярно площади поверхности первого и второго плоских контуров двухконтурного волновода. Контуров волновода, как и другие катушки индуктивности, защищаются от воздействия внешних магнитных полей экранами, в качестве которых могут быть использованы броневые ферритовые сердечники.

Использование дополнительно двух катушек индуктивности, которые также расположены перпендикулярно площади поверхности контуров двухконтурного волновода, связано с необходимостью контроля процесса передачи и приема электромагнитных колебаний. Следует отметить, что для изготовления волновода выбирается материал с высокой электропроводностью. Как известно [7], электропроводность разных материалов зависит от концентрации свободных, не связанных с атомами, молекулами или кристаллической структурой, электрически заряженных частиц. Чем больше концентрация таких частиц, тем больше электропроводность данного вещества.

Согласно предложенному магнитопольевому методу преобразования энергии, вначале формируется сигнал в виде прямоугольных (типа меандр) импульсов тока высокой частоты ω_0 и заданной амплитуды I_m . Математически этот сигнал можно записать в виде уравнения величин:

$$i(t) = I_m \left[\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (1)$$

где $k_1 = 1$, $k_2 = 2$.

Переменный ток (1) поочередно, с низкой частотой коммутации Ω_0 , пропускается через катушки индуктивности, расположенные над контурами волновода. В нечетные полупериоды частоты коммутации через катушку индуктивности, расположенную над первым контуром волновода, течет импульсный ток (типа меандр)

¹ редакция автора

² Этот вид потенциальной энергии связан с внутренним

$$i_{вч1}(t) = I_m \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right) \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right), \quad (2)$$

а через катушку индуктивности, расположенную над вторым контуром волновода — ток

$$i_{вч2}(t) = I_m \left(\frac{k_1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right) \left(\frac{k_1}{k_2} - \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_0 t}{k_2 n - k_1} \right), \quad (3)$$

где $k_1 = 1, k_2 = 2$.

В каждой катушке формируется соответствующее соленоидальное импульсное магнитное поле высокой частоты. Для его стабилизации часть тока, текущего через катушку индуктивности, направляется в контур отрицательной обратной связи первой и второй пар высокочастотных контуров. Причем, наведенная, за счет взаимной индукции, э.д.с. в соответствующих катушках индуктивности выпрямляется с целью преобразования ее в постоянный ток обратной связи.

Следует обратить внимание на то, что соленоидальное магнитное поле — это трубчатое векторное поле с нулевым расхождением потоков, входящих в катушку индуктивности и выходящих из нее. Примером является магнитное поле внутри бесконечно длинного соленоида, для которого $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, где \mathbf{B} — вектор магнитной индукции. Равенство дивергенции нулю означает, что соленоидальное импульсное магнитное поле свободно от источников. Соленоидальное импульсное магнитное поле — вихревое векторное поле, характеризующееся векторным потенциалом — функцией (\mathbf{A}) такой, что $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$. Для трубчатого векторного поля справедлив принцип сохранения интенсивности: в соленоидальном импульсном магнитном поле потоки трубчатого векторного поля через разные его поперечные сечения (сечения «векторной трубки») равны между собой по интенсивности (сохраняют постоянное значение).

Полная энергия импульсного магнитного поля высокой частоты в каждой катушке индуктивности описывается уравнением величин

$$W_{0M} = L_0 [i_{вч}(t)]^2 / k_2, \quad (4)$$

где L_0 — индуктивность катушки индуктивности через которую течет переменный ток.

Выразим энергию однородного импульсного магнитного поля высокой частоты внутри длинного соленоида, которым и является катушка индуктивности, через величины, характеризующие это поле в окружающем пространстве.

Индуктивность соленоида определяется уравнением величин:

$$L_0 = \mu \mu_0 N^2 \frac{S_0}{l_0}, \quad (5)$$

где μ — магнитная проницаемость; μ_0 — магнитная постоянная; S_0 и l_0 — соответственно, площадь поперечного сечения соленоида и его длина; N — число витков катушки.

В этом случае энергия магнитного поля соленоида определяется по уравнению величин

$$W_{0M} = \frac{\mu \mu_0}{k_2} \frac{N^2 [i_{вч}(t)]^2}{l_0} S_0. \quad (6)$$

Энергия импульсного магнитного поля в первой и второй катушках индуктивности опишется, соответственно, уравнениями величин:

$$W_1(t) = W_{0M} \left[\frac{k_1}{k_2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right], \quad (7)$$

и

$$W_2(t) = W_{0M} \left[\frac{k_1}{k_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - k_1) \Omega_K t}{k_2 n - k_1} \right]. \quad (8)$$

Согласно магнитополевого метода преобразования энергии, потенциальная энергия материала волновода преобразуется в кинетическую энергию бесконечно движения электронов по замкнутому контуру волновода.

Покажем, что благодаря закону сохранения и превращения механической энергии осуществляется перенос энергии электронов по замкнутому контуру волновода.

Важной особенностью закона сохранения механической энергии, в том числе и для волновода, выполненного из металла и содержащего N электронов, движущихся по замкнутому контуру, является то, что этот закон устанавливает связь между координатами и скоростью движения электрона в двух разных точках траектории движения.

Для системы из N движущихся электронов, прирост кинетической энергии равен:

$$\sum_{i=1}^n m_{ei} (\mathbf{v}_{ei} d\mathbf{v}_{ei}) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{F}_{ki} + \mathbf{F}_{\Pi i}) d\mathbf{l}_{ei} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{Mi} d\mathbf{l}_{ei} \quad (9)$$

где m_{ei} и v_{ei} — масса и скорость i -го электрона; $F_{\Pi i}$, F_{Mi} и F_{ki} — i -я равнодействующая внутренних

кулоновских, внешних консервативных и неконсервативных (магнитных) сил; l_{ei} — путь, проходимый i -м электроном.

При скорости движения электронов намного меньшей скорости света ($v \ll c$), их массы постоянны и равны между собой, т.е. $m_{e1} = m_{e2} = \dots = m_{ei} = \dots = m_{en} = m_e$, как равны между собой и равнодействующие внутренних кулоновских сил, — $F_{\pi 1} = F_{\pi 2} = \dots = F_{\pi i} = \dots = F_{\pi n} = F_{\pi}$. При силовом действии импульсного магнитного поля высокой частоты на электроны, их скорости выравниваются, т.е. $v_{e1} = v_{e2} = \dots = v_{ei} = \dots = v_{en} = v_e$. При этом выравниваются и равнодействующие внешних консервативных сил ($F_{k1} = F_{k2} = \dots = F_{ki} = \dots = F_{kn} = F_k$), и внешних неконсервативных (магнитных) ($F_{M1} = F_{M2} = \dots = F_{Mi} = \dots = F_{Mn} = F_M$) сил.

Левая часть равенства (9) представляет собой приращение кинетической энергии системы:

$$\sum_{i=1}^n m_{ei} (\mathbf{v}_{ei} d\mathbf{v}_{ei}) = \sum_{i=1}^n d \left(\frac{m_{ei} \mathbf{v}_{ei}^2}{k_2} \right) = dE_k, \tag{10}$$

где $k_2 = 2$.

В правой части равенства (9) первый член характеризует элементарную работу внутренних и внешних консервативных сил. Он равен элементарному приращению потенциальной энергии:

$$\sum_{i=1}^n (\mathbf{F}_{ki} + \mathbf{F}_{\pi i}) d\mathbf{l}_{ei} = dE_{\pi}. \tag{11}$$

где F_{ki} — равнодействующая внешних консервативных сил, действующих на каждый электрон, и обеспечивающая их движение, а $F_{\pi i}$ — равнодействующая внутренних консервативных сил (постоянных потенциальных полей кулоновских сил).

Второй член правой части равенства (9) описывает работу $dA = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{Mi} \cdot d\mathbf{l}_{ei}$ внешних неконсервативных сил (импульсного магнитного поля высокой частоты), действующих на материал волновода.

В целом, изменение полной энергии системы из n электронов равно изменению энергии внешних неконсервативных сил, т.е.

$$d(E_k + E_{\pi}) = dA. \tag{12}$$

Необходимо отметить, что переход n электронов, движущихся по замкнутому контуру двоконтурного волновода из одного положения (обозначим цифрой «1») в другое положение (обозначим через «2») осуществляется за счет работы внешних неконсервативных сил (например, за счет магнитной индукции импульсного электромагнитного поля высокой частоты) и описывается уравнением величин

$$\int_1^2 d(E_k + E_{\pi}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{Mi} \cdot d\mathbf{l}_{ei12} = n(\mathbf{F}_M \cdot d\mathbf{l}_{e12}) = A_{12} \tag{13}$$

где F_M — равнодействующая внешних неконсервативных сил (сил индукции магнитного поля высокой частоты), действующих на каждый электрон; $d\mathbf{l}_{ei12}$ — перемещение электрона под действием сил магнитного поля за интервал времени Δt ; A_{12} — работа, выполняемая внешними неконсервативными силами.

Таким образом, явление переноса энергии электронов сквозь материал описывается с помощью закона сохранения механической энергии. Только этот закон позволяет получить связь между координатами и скоростями электронов в двух разных точках их движения по замкнутому контуру. Причем нет необходимости в анализе закона движения электронов во всех промежуточных точках.

Согласно (13), изменение полной энергии движения n электронов по замкнутому контуру электромеханической системы (двухконтурного волновода) при переходе из одного состояния в другое равно работе, выполняемой внешними неконсервативными силами, т.е. силами индукции импульсного магнитного поля высокой частоты. Если эти силы отсутствуют то, как следует из (13),

$$d(E_k + E_{\pi}) = 0. \tag{14}$$

Полная энергия волновода остается величиной постоянной:

$$E_k + E_{\pi} = W = \text{const}. \tag{15}$$

Равенство (15) описывает закон сохранения энергии электронов в материале, согласно которому сумма кинетической и потенциальной энергии электронов материала механической системы замкнутого типа, в которой действуют только консервативные силы, остаётся постоянной.

Таким образом, энергия электронов консервативной системы замкнутого типа не меняется в процессе их движения.

Поскольку в основу явления переноса энергии положено взаимодействие соленоидального импульсного магнитного поля с электронами материала, то формализовано это явление может быть описано через закон локального сохранения электромагнитной энергии. В интегральной форме он описывается следующим образом:

$$\iint_S \mathbf{\Pi} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_V \omega dV + \int_V p_{\Pi} dV = \int_V p_{ct} dV, \quad (16)$$

где $\mathbf{\Pi}$ — вектор Пойнтинга, характеризующий плотность потока электромагнитной энергии и указывает направление его движения; $\iint_S \mathbf{\Pi} \cdot d\mathbf{S}$ — мощность излучения (плотность потока электромагнитной

энергии, проходящей через элементарную поверхность dS материала волновода); $\frac{d}{dt} \int_V \omega dV$ — изменение во

времени (прирост) объемной плотности электромагнитной энергии, проходящей через элементарный объем;

$\int_V p_{\Pi} dV$ — объемная плотность мощности потерь, возникающих в результате уравнивания действия сил

Лоренца силами Кулона при движении электронов в электрическом поле; $\int_V p_{ct} dV$ — мощность сторонних

сил, обусловленная объемной плотностью мощности сторонних сил в элементарном объеме (за счет силового воздействия подведенной к материалу волновода энергии магнитного поля),

В дифференциальной форме закон сохранения электромагнитной энергии имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{\Pi} + \frac{\partial \omega}{\partial t} + p_{\Pi} = p_{ct}, \quad (17)$$

где $\operatorname{div} \mathbf{\Pi}$ — дивергенция вектора Пойнтинга; $p_{\Pi} = \lim_{\{V\} \rightarrow \{\Delta_V\}} \frac{P_{\Pi}}{V}$ — объемная плотность мощности

потерь, определяемая как отношение мощности потерь к объему, причем значение объема выбирается как можно малым, т.е. $\{V\} \rightarrow \{\Delta_V\}$ где $\{\Delta_V\}$ — предельное (весьма малое) числовое значение объема.

Закон сохранения энергии электромагнитного поля устанавливаем баланс мощностей в произвольном объеме электромагнитного поля и формулируется следующим образом: «небаланс мощностей в заданном объеме V компенсируется потоком вектора Пойнтинга, направленным внутрь объема (знак « \leftarrow ») через замкнутую поверхность S , ограниченную этим объемом» [3].

Согласно описываемого метода преобразования, в случае произвольного выбора материала, формируются токи проводимости, переноса и / или смещения, обусловленные движением отрицательно заряженных квазичастиц. Поэтому волновод, изготовленный из разных материалов, проявляет разные свойства. При изготовлении волновода из металлов в преобразовании энергии участвует большая часть тока проводимости, металлокерамики — токов проводимости и токов переноса. Существуют материалы с одинаковыми или разными долями носителей тока. Теоретически любые материалы могут быть использованы для решения поставленной технической задачи. Практически выбираются те материалы, которые содержат большое количество свободных электронов в единице объема.

Созданную высокочастотными токами электромагнитную волну направляют через частотно-избирательную нагрузку. В качестве последней может быть использовано, нагрузка в виде, например, последовательно соединенных спирали лампочки накаливания и чувствительного элемента измерителя тока, с которыми параллельно соединен конденсатор. Подобранная емкость конденсатора обеспечивает получение резонанса токов, при котором лампочка накаливания потребляет электроэнергию, передаваемую электромагнитной волной.

Об эффективности преобразования потенциальной энергии материала в электроэнергию судят по яркости свечения (мощности) лампочки накаливания и по отношению тока, потребляемого частотно-избирательной нагрузкой, и тока, используемого для формирования соленоидального импульсного магнитного поля. При этом текущий контроль за процессом потребления энергии осуществляется по результатам выпрямления ЭДС, наведенной в приемном контуре, расположенном, как и контур отрицательной обратной связи, перпендикулярно плоскости двухконтурного волновода.

Напряжение

$$u_{\text{вих}}(t) = k_T u_{\text{вх}}(t), \quad (18)$$

где k_T — коэффициент трансформации, наведенное в приемном контуре, выпрямляется и усредняется согласно аналитическому выражению:

$$U_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{k_1}{T'_k} \int_0^{T'_k} |u_{\text{вих}}(t)| dt}, \quad (19)$$

где $T'_k = nT_k$ — время интегрирования, кратное периоду частоты коммутации ($n=1-100$) и более; $k_1 = 1$.

Следует отметить, что усреднение выпрямленного напряжения осуществляется за счет использования RC -нагрузки.

Описанный магнитолевой метод обеспечивает последовательное преобразование форм и видов энергий: а) энергии соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты (соленоидальная форма энергии магнитного поля системы) в кинетическую энергию направленного движения электронов (механическая форма энергии системы); б) энергии колебательно-вращательно-поступательного движения электронов, несущих заряды (кинетическая энергия) в энергию продольной электромагнитной волны (в электромеханическую форму энергии системы); в) преобразование энергии электромагнитной волны в электрический сигнал (в электрическую форму энергии системы).

1.3. Магнитолевые преобразователи потенциальной энергии материала в электроэнергию

Рассмотрим вопросы реализации описанного метода преобразования потенциальной энергии материала электромеханической системы¹ в электроэнергию на примере магнитолевого преобразователя, комбинированная схема которого приведена на рис. 2. На рис. 2 использованы следующие обозначения: ГВЧ — генератор тока высокой частоты; ГНЧ — генератор импульсов низкой частоты коммутации; Кл1 и Кл2 — высокочастотные ключи; БС1 и БС2 — первый и второй броневые ферритовые сердечники (магнитные экраны); L1 и L2 — первая и вторая катушки индуктивности первой пары высокочастотных контуров; L3 и L4 — первая и вторая катушки индуктивности второй пары высокочастотных контуров; ЛН — лампочка накаливания; WG — двухконтурный волновод; L5 и L6 — первый и второй одновитковые контура волновода; R1 — подстроичный резистор; Д1 и Д2 — первый и второй диоды; МГ — микрометрическая головка; ИТ — измеритель тока.

После включения питания, ток высокой частоты (1) с выхода источника тока ИТ поступает на входы высокочастотных ключей Кл1 и Кл2, а также на синхронизирующий вход генератора ГНЧ импульсов низкой частоты коммутации. В результате на прямом и инверсном выходах ГНЧ появляются прямоугольные импульсы, которые поочередно, с низкой частотой коммутации Ω_0 , открывают высокочастотные ключи Кл1 и Кл2.

Синхронизация импульсов низкой частоты коммутации импульсами высокой частоты осуществлена для синфазной работы генератора ГНЧ.

Частота коммутации выбирается в пределах (50–1000) Гц, а рабочая частота источника переменного тока ИТ — (1–20) МГц и выше.

Ток высокой частоты с выхода Кл1 и Кл2 в виде пачек импульсов (2) и (3) поступает на катушки индуктивности L2 и L4 соответственно. Переменные токи (2) и (3) создают в них соленоидальные импульсные магнитные поля высокой частоты с энергией (7) и (8) соответственно.

Энергия (7) и (8) импульсного магнитного поля поочередно воздействует на электроны первого и второго колебательных контуров L5 и L6 волновода WG и устанавливает их движение по замкнутому контуру в одну сторону, например, слева направо. Это приводит к превращению потенциальной энергии материала двухконтурного волновода WG в энергию бесконечного движения электронов и создаваемой ими электромагнитной волны по замкнутому контуру волновода WG.

Следует отметить, что двухконтурный волновод WG представляет собой плоские контуры L5 и L6 диаметрально и противоположно расположенные в одной плоскости и соединены между собой через активную нагрузку — лампу накаливания ЛН (см. рис. 2). Благодаря силовому воздействию соленоидального импульсного магнитного поля высокой частоты формируются токи проводимости, обусловленные движением электронов.

Для съема электрической энергии в разрезе между контурами L5 и L6 волновода подключается нагрузка.

Как отмечалось выше, об эффективности преобразования в электроэнергию потенциальной энергии материала волновода, выполненного, например, из меди, судят по яркости свечения (мощности) лампочки накаливания ЛН и по отношению тока, потребляемого активной нагрузкой и действующим значением тока, формируемого импульсное магнитное поле высокой частоты. В последнем случае измеритель тока встроен в ГВЧ.

По своему характеру нагрузка может быть активной, реактивной и комплексной. На рис. 2 приведена комбинированная схема магнитолевого преобразователя энергии с активной нагрузкой в виде лампочки накаливания ЛН, на рис. 3 — с обратной связью по магнитному полю и с резонансным RLC-контуром, а на рис. 4 — комбинированная схема магнитолевого преобразователя энергии с обратной связью по магнитному полю, с резонансным повышающим ВЧ-трансформатором и выпрямителем переменного тока. На

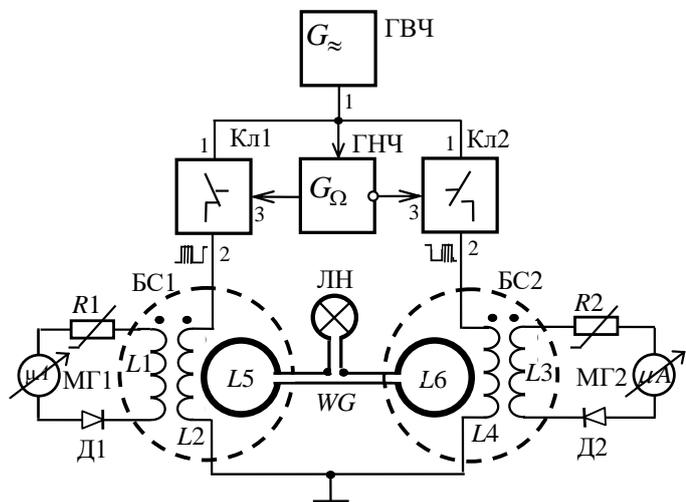


Рис. 2. Комбинированная схема простейшего магнитолевого преобразователя с обратными связями по магнитному потоку

¹ с электромагнитной формой энергии системы

рис. 4. и рис. 5 приведены комбинированные схемы магнитопольных преобразователей энергии с обратными связями по магнитному полю, с повышающими трансформаторами на высокочастотных ферритовых кольцевых сердечниках, причем, на рис. 4 используется резонанс токов, рис. 4 — резонанс напряжений, и выпрямителями.

Все варианты магнитопольных преобразователей энергии в своей основе реализуют описанный выше метод и являются идентичными. Различия заключаются в использовании разных нагрузок.

На рис. 3, например, в качестве нагрузки используется параллельный *RLC*-контур низкой добротности, состоящий из параллельно включенных конденсаторов *C1* и *C2* и последовательно соединенных лампочки накаливания ЛН и резистивного чувствительного элемента (сенсора) измерителя тока ИТ.

Элементы ЛН и ИТ образуют ветвь из последовательно соединенных резистора с общим сопротивлением R_{k1} и индуктивности L_k спирали лампочки накаливания ЛН.

Вторую ветвь параллельного контура образуют последовательно соединенные резисторы (подводящие проводники конденсаторов) с результирующим сопротивлением R_{k2} и параллельно соединенные конденсаторы *C1* и *C2* с общей емкостью C_k .

Добротность Q_k *RLC*-контура равна отношению его характеристического сопротивления к сопротивлению потерь и математически выражается уравнением величин

$$Q_k = \sqrt{L_k/C_k} / (R_{k1} + R_{k2}) = \rho / R_{\Sigma} \tag{20}$$

Поскольку, согласно (20), с уменьшением активного сопротивления R_{Σ} добротность *RLC*-контура увеличивается, то ЛН выбирается с малым значением омического сопротивления спирали.

Действующее значение тока, протекающего через первую ветвь, состоящую из ЛН и ИТ с омическим сопротивлением R_{k1} и индуктивностью L_k , описывается уравнением величин

$$I_{ЛН} = \frac{U_k}{R_{k1} + i\omega L_k} \tag{21}$$

где U_k — действующее значение напряжения на контуре.

Через конденсаторы, образующие ветвь параллельного *RLC*-контура, состоящую из емкости C_k и омического сопротивления R_{k2} , течет ток

$$I_c = \frac{U_k}{R_{k2} - \frac{i}{\omega C_k}} \tag{22}$$

Суммарный ток описывается уравнением величин [5]:

$$I_{\Sigma} = \frac{R_{k1} + R_{k2} + i\left(\omega L_k - \frac{k_1}{\omega C_k}\right)}{(R_{k1} + i\omega L_k)\left(R_{k2} - \frac{i}{\omega C_k}\right)} U_k \tag{23}$$

При любой частоте ω действующее значение тока в параллельном *RLC*-контуре определяется согласно уравнению величин [5]:

$$|I_k| = |I_{рез}| \frac{\sqrt{R_k^2 + \left(\omega L_k - \frac{k_1}{\omega C_k}\right)^2}}{R_k} = |I_{рез}| \sqrt{k_1^2 + Q_k^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \tag{24}$$

Зависимость резонансной частоты от параметров параллельного колебательного контура математически описывается уравнением величин [8]:

$$f_{рез} = \frac{k_1}{k_2 \pi \sqrt{L_k C_k}} \left[\frac{\rho^2 - R_{k1}^2}{\rho^2 - R_{k2}^2} \right] \tag{25}$$

или, через круговую частоту, —

$$\omega_k = \omega_0 \sqrt{(k_1 - \rho^2/R_{k1}^2)/(k_1 - \rho^2/R_{k2}^2)} \tag{26}$$

Следует отметить, что при резонансе реактивная составляющая входного сопротивления параллельного *RLC*-контура равна нулю, входное сопротивление чисто активно, и, соответственно, фазовый сдвиг между током и напряжением на входных зажимах цепи тоже равен нулю. При резонансе значения токов в реактивных элементах в Q раз больше значения общего тока цепи.

На рис. 4 приведена комбинированная схема магнитопольного преобразователя энергии с

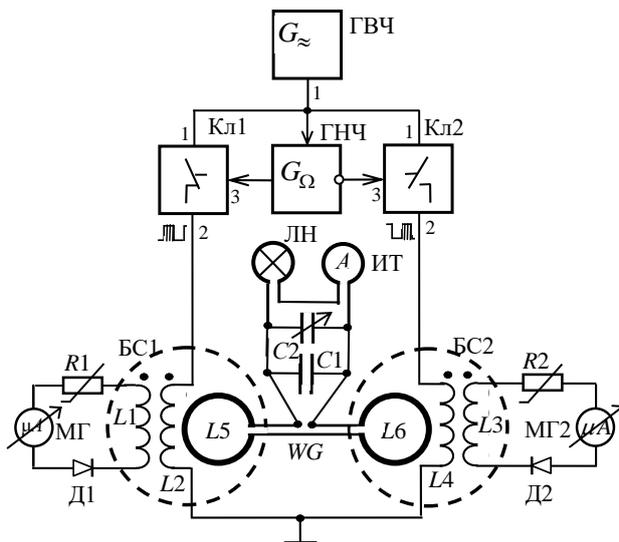


Рис. 3. Комбинированная схема магнитопольного преобразователя энергии с обратной связью по магнитному полю и резонансным *RLC*-контуром

повышающим трансформатором, выполненном на высокочастотном ферритовом кольцевом сердечнике, и использующим резонанс токов. Соотношение витков контуров L_7 и L_8 задается в пределах 1:10 и более. Выпрямитель собран на диодах Д3, ..., Д6 по мостовой двухполупериодной схеме с подключенной к ее выходам RC -нагрузкой (элементы $C2$, $C3$ и $R3$). Причем конденсатор $C2$ выбирается малой емкости (тысячи пикофард) для шунтирования высокочастотных помех, а $C3$ — большой емкости (десятки – сотни микрофард) для сглаживания выходного напряжения. Для измерения мощности, выделяемой на RC -нагрузке, используются измеритель тока ИТ и измеритель напряжения ИН, включенные, как показано на рис 4.

Резонансная частота параллельного колебательного LC -контура C_1L_7 определяется по значениям его параметров. Использование высокочастотного ферритового кольцевого сердечник требует специальные расчеты индуктивности такого контура. Согласно [9], индуктивность катушки на кольцевом сердечнике может быть определена согласно уравнению величин:

$$L = n^2 \frac{\mu}{\mu_0} h \frac{D_1 + D_2}{D_1 - D_2} \text{ мкГн}, \tag{27}$$

где n — число витков; μ — магнитная проницаемость кольцевого сердечника; $\mu_0 = 2500$; h — высота кольцевого сердечника; D_1 и D_2 — наружный и внутренний диаметры кольца, мм.

Емкость колебательного LC -контура C_1L_7 определяется по значению его резонансной частоты f_0 (МГц) и индуктивности L (мкГн) согласно уравнению величин:

$$C = \frac{k_1}{k_2^2 \pi^2 f_0^2 L} \text{ пф}. \tag{28}$$

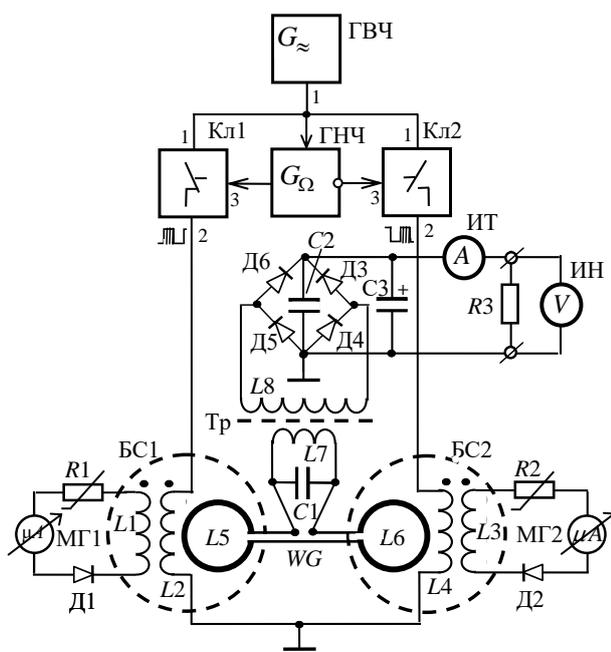


Рис. 4. Комбинированная схема магнитополевого преобразователя энергии с обратной связью по магнитному полю, с резонансным повышающим ВЧ-трансформатором и выпрямителем

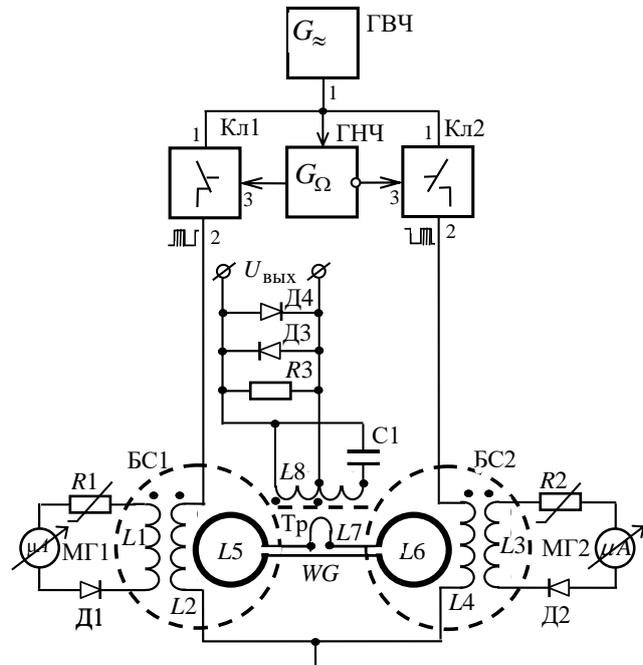


Рис. 5. Комбинированная схема магнитополевого преобразователя энергии с обратной связью по магнитному полю и с дифференциальным трансформатором тока

На практике параллельно конденсатору постоянной емкости подключается конденсатор переменной емкости (см. рис. 3) с целью подбора требуемого значения частоты резонанса.

На рис. 5 приведено схематическое решение магнитополевого преобразователя энергии, отличающееся от предыдущего тем, что в качестве нагрузки используется дифференциальный трансформатор тока, выполненный на высокочастотном ферритовом сердечнике.

Первичной обмоткой трансформатора служит одновитковая катушка индуктивности L_7 . Вторичной обмоткой является колебательный RC -контур. Две вторичные обмотки катушки индуктивности L_8 наматываются бифилярно, причем конец одной обмотки соединяется с началом другой и делается отвод для подключения остальных элементов схемы (рис. 5). Конденсатор подключается к началу первой и к концу второй обмотки катушки индуктивности

Часть высокочастотного напряжения, снимаемого с первой половины витков катушки индуктивности L_8 , поступает на элементы $R3$, Д3 и Д4, параллельно соединенные с выходными клеммами преобразователя. О результате преобразования потенциальной энергии материала волновода в электроэнергию

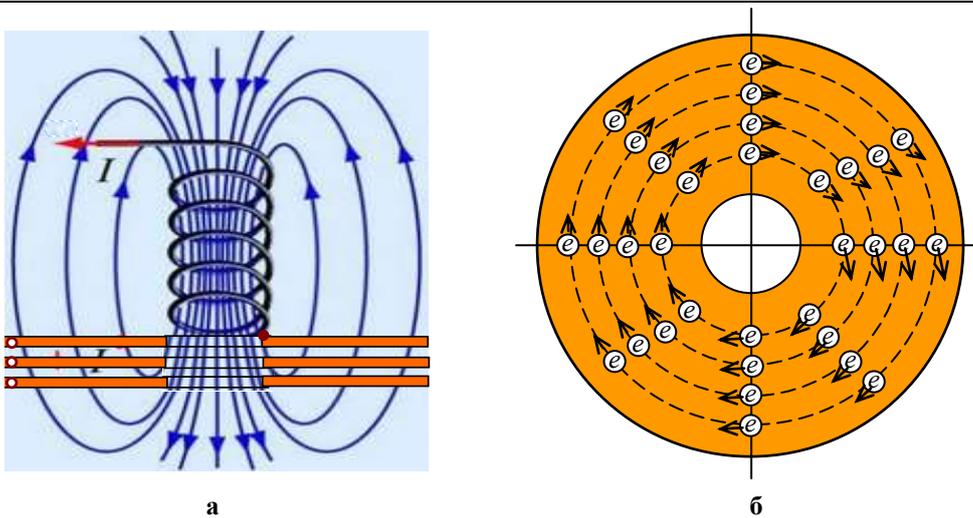


Рис. 8. Графические построения действия соленоидального магнитного поля на кольцеобразные пластины воздушного конденсатора с линейно перемещаемой

При отсутствии других сил, сила Лоренца, согласно второму закону Ньютона, сообщает электрону центростремительное или нормальное ускорение

$$a_{цн} = v_i^2 / r_i = \omega_i^2 r_i, \tag{30}$$

где v_i и ω_i — линейная и угловая скорости движения i -го электрона.

Следует отметить, что работа, совершаемая над движущимся электроном в магнитном поле постоянной силой Лоренца, равна нулю, если угол β между направлением векторов силы Лоренца F_L и направлением вектора радиального перемещения Δr в кольцевых пластинах воздушного конденсатора равен 90° , т.е. $\beta = 90^\circ$. В этом случае абсолютное значение скорости движения электрона и его кинетическая энергия остаются постоянными и при движении его в соленоидальном импульсном магнитном поле. Период вращения i -го электрона определяется по уравнению величин: $T_i = 2\pi r_i / v_i$.

Силы Лоренца, действующие на свободные электроны, смещают их к центру кольцеобразных пластин. Благодаря движению свободных электронов по окружности в пластинах конденсатора создаются электрические поля типа «сендвич», увеличивающие напряженность электрического поля конденсатора $C1$ последовательного колебательного контура $L8C1$. Кольцевые токи в пластинах создают соответствующие магнитные поля, которые накладываются на соленоидальное магнитное поле катушки индуктивности $L8$.

При резонансе ($f = f_0$) высокочастотный сигнал на обкладках воздушного конденсатора $C1$ резко увеличивается по амплитуде. Часть сигнала с «холодной» и средней обкладках конденсатора поступает на диоды Д3 и Д4 и выпрямляется (рис. 6). RC -нагрузка подключается через дроссель Др к диоду Д3.

При отсутствии других сил, сила Лоренца, согласно второму закону Ньютона, сообщает электрону центростремительное или нормальное ускорение $a_{цн} = v_i^2 / r_i = \omega_i^2 r_i$, где v_i и ω_i — линейная и угловая скорости движения i -го электрона.

Ток в последовательном RLC -контуре зависит от напряжения источника питания U_k и от полного сопротивления контура, т.е.

$$I_k = \frac{U_k}{Z_k} = \frac{U_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{k_{тр} U_0}{\sqrt{R_k^2 + \left(\omega L_k - \frac{k_1}{\omega C_k} \right)^2}}, \tag{31}$$

где $U_k = k_{тр} U_0$, $k_{тр}$ — коэффициент трансформации входного напряжения трансформатора в выходное, равное отношению витков катушек индуктивности $L8$ и $L7$.

Ток контура I_k , создаваемый напряжением U_k , проходя через конденсатор $C1$, поочередно заряжает и разряжает его. При этом на конденсаторе $C1$ формируется переменная разность потенциалов $U_C = \varphi_2 - \varphi_1$, противоположная по знаку ЭДС конденсатора.

Разность потенциалов U_C отстает по фазе от тока на 90° . В то же время ток контура I_k , проходя через катушку индуктивности $L8$, возбуждает в ней ЭДС индукции, отстающую по фазе от тока на четверть периода (90°). В результате на катушке индуктивности $L8$ возникает переменная разность потенциалов U_L , опережающая по фазе ток на 90° .

На резонансной частоте f_0 эти напряжения равны по значениям и противоположны по знаку, т.е. сдвинуты по фазе на 180° . Именно поэтому резонанс в последовательном контуре является резонансом напряжения.

Емкостное сопротивление конденсатора X_C и индуктивное сопротивление катушки X_L зависят от частоты питающего тока. С повышением частоты X_C уменьшается, а X_L — увеличивается (рис. 9).

Практический интерес представляет зависимость напряжения на конденсаторе $C1$ от частоты сигнала в катушке индуктивности $L7$. Напряжение на конденсаторе $C1$ пропорционально току в контуре и емкостному сопротивлению конденсатора: $U_C = I_K X_C$, где $X_C = k_1 / k_2 \pi f C_K$ (рис. 9). Ток в контуре вблизи резонанса резко изменяется при изменении частоты f , сопротивление конденсатора при этом изменяется незначительно. Если пренебречь этим изменением, то напряжение U_C на конденсаторе при резонансе ($f = f_0$) можно считать максимальным (рис. 10). Если бы емкостное сопротивление оставалось неизменным, то кривая, отражающая зависимость напряжения на конденсаторе от частоты f источника питания, была бы с высокой точностью подобна резонансной кривой тока. Но так как емкостное сопротивление X_C конденсатора при повышении частоты уменьшается, то резонансная кривая напряжения оказывается расположенной несимметрично относительно кривой тока (рис. 10). Получение двух напряжений, — низковольтного и высоковольтного. свидетельствует о более широких возможностях данного магнитополевого преобразователя энергии.

Таким образом, существует минимум 5 вариантов схмотехнических решений магнитолевых преобразователей потенциальной энергии материала в электроэнергию.

Все схмотехнические решения магнитолевых преобразователей являются типовыми и различаются режимами работы и видами нагрузки.

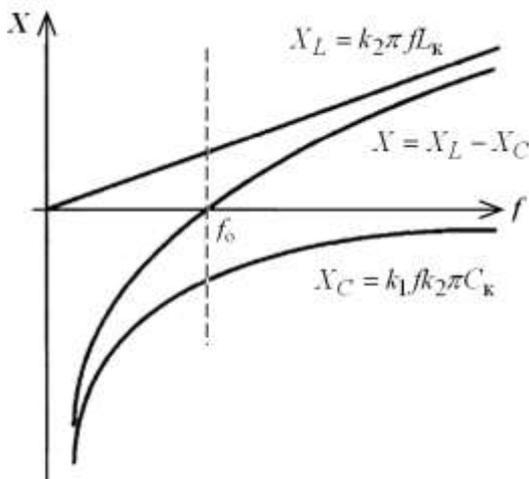


Рис. 9. Зависимость реактивного сопротивления последовательного колебательного контура от частоты генератора

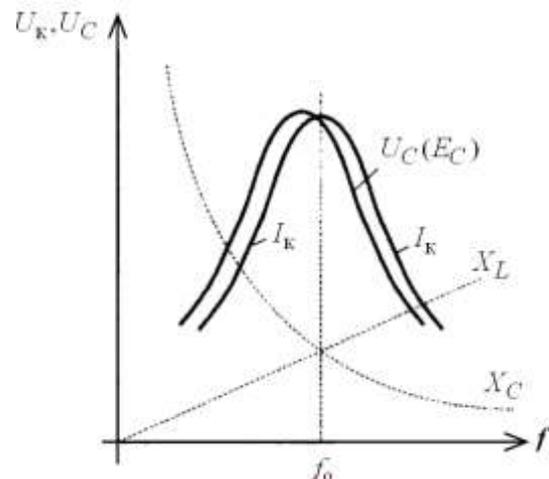


Рис. 10. Зависимость напряжения конденсатора от частоты

Выводы

1. Предложены новые, более адекватные определения понятий энергия, электрическая энергия и электрическая мощность. В частности, например, утверждается, что «энергия — свойство поля той или иной физической природы совершать работу по изменению формы движения и взаимодействия материи или по переходу движения материи из одних форм в другие».

2. Приведена классификация физических понятий по И.Ш. Когану, связанная с энергией системы и дополненная еще одной известной формой энергии системы — электромеханической. Это позволило более обосновано различать формы и виды энергии, понять особенности электромеханической формы энергии, которая используется в магнитолевых преобразователях.

3. Показаны возможности и описана сущность магнитолевого метода преобразования электромагнитной формы энергии системы в электроэнергию.

4. Утверждается, что в качестве источника электронов (движущихся материальных частиц) должна использоваться механическая система определенной конфигурации, обеспечивающая выполнение двух фундаментальных законов: закона сохранения механической энергии и закона сохранения электромагнитной энергии.

5. Предложено в качестве электромеханической системы использовать плоский двухконтурный волновод, представляющий собой выполненную из меди механическую систему замкнутого типа, обеспечивающую выполнение указанных законов.

6. Установлена возможность использования явления переноса энергии и информации не только для решения измерительных задач, но и для решения задачи преобразования электромагнитной формы энергии электромеханической системы замкнутого типа в электрическую энергию.

7. Для изготовления волновода необходимо выбирать материал с высокой электропроводностью, которая зависит от концентрации свободных, электрически заряженных частиц, не связанных с атомами и молекулами или с кристаллической структурой материала.

8. Приведены и описаны комбинированные схемы магнитолевых преобразователей энергии с обратной связью по магнитному полю и с разными типами нагрузок: активной, комплексной и резонансной.

Наибольший интерес представляю преобразователи с использованием повышающих ВЧ-трансформаторов резонансного типа.

9. Положено начало развитию нового направления в преобразовательной технике и в электротехнике — магнитополовое преобразование в электрическую энергию электромагнитной формы энергии механической системы замкнутого типа.

10. Представляется целесообразным использование механических систем типа «сэндвич» с высокой электропроводностью материалов.

11. Предстоит большая исследовательская и научно-техническая работа по всестороннему изучению процессов преобразования одной формы энергии в другую, по повышению эффективности и оптимизации режимов работы предложенных технических решений магнитополовых преобразователей энергии.

Литература

1. Преобразование энергии — электрической, тепловой, механической, световой [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/osnovy/2096-preobrazovanie-energii-elektricheskoy.html>
2. Энергия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F>.
3. Электрическая энергия и мощность [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.proelectro2.ru/info/id_266.
4. Коган И.Ш. Формы энергии и виды энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.kogan.iri-as.org/stat/formy_energy.pdf.
5. Резонансные свойства RLC-цепей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/45632/1/978-5-7996-0831-6_2013.pdf.
6. Чертов А.Г. Физические величины / Чертов А.Г. – М. : Высшая школа, 1990. – 336 с.
7. Основы физики твердого тела [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/35958/1/Book_Bagmut_Osnovy_fiziki_2018.pdf
8. Формулы расчета параллельного колебательного контура [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://coil32.ru/parallel-contour.html>.
9. Двухтактные преобразователи (упрощенный расчет) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://textarchive.ru/c-1865916-pall.html>.
10. Катушка Тесла Краткая теория [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://radiolaba.ru/vyisokoe-napryazhenie/katushka-tesla-kratkaya-teoriya.html>.

References

1. Preobrazovanie energii — elektricheskoy, teplovoj, mehanicheskoy, svetovoj [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://electricalschool.info/main/osnovy/2096-preobrazovanie-energii-elektricheskoy.html>
2. Energiya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F>.
3. Elektricheskaya energiya i moshnost [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.proelectro2.ru/info/id_266.
4. Kogan I.Sh. Formy energii i vidy energii [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://www.kogan.iri-as.org/stat/formy_energy.pdf.
5. Rezonansnye svojstva RLC-cepej [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/45632/1/978-5-7996-0831-6_2013.pdf.
6. Chertov A.G. Fizicheskie velichiny / Chertov A.G. – M. : Vysshaya shkola, 1990. – 336 s.
7. Osnovy fiziki tverdogo tela [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/35958/1/Book_Bagmut_Osnovy_fiziki_2018.pdf
8. Formuly rascheta parallelnogo kolebatelnogo kontura [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://coil32.ru/parallel-contour.html>.
9. Dvuhtaktnye preobrazovateli (uproshennyj raschet) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <http://textarchive.ru/c-1865916-pall.html>.
10. Katushka Tesla Kratkaya teoriya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://radiolaba.ru/vyisokoe-napryazhenie/katushka-tesla-kratkaya-teoriya.html>.

Рецензія/Peer review : 12.1.2020 р.

Надрукована/Printed : 14.2.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією