

УДК 621.313.39.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-65-71

## Тенденции развития совмещенных магнито-электроиндукционных электромеханических преобразователей энергии

Г.С. Караян, С.В. Гандилян

Дан обзор современного состояния электромеханической науки. Рассмотрено современное состояние совмещенной индуктивно-емкостной электромеханики. Проанализированы спектры ее практического применения и перспективы дальнейшего развития.

Предложен новый подход к математическому описанию переходных процессов в дуально-сопряженных динамических системах, на основе которого составлены дифференциальные уравнения совмещенных индуктивно-емкостных электромеханических преобразователей энергии.

Разработана обобщенная Лагранжевая теория совмещенных индуктивно-емкостных электрических машин, как объединение обобщенных Лагранжевых моделей индуктивных и емкостных электромеханических преобразователей энергии, разработанных на основе базовых принципов бинарно-сопряженной электрофизики.

Установлена возможность оптимизации рабочего режима индуктивного генератора с помощью емкостного генератора, с образованием параллельной или последовательной резонансных цепей (управляющим параметром является матрица взаимодействия). Совмещенная машина является резонансной машиной и имеет наилучшие энергетические показатели.

Приведены уравнения электродинамики и электромеханики совмещенных индуктивно-емкостных электрических машин, если в структуре их системы возбуждения существуют активные электротехнические материалы дуального назначения — сегнетомагнетики. Необходимый Лагранжиан для совмещенных индуктивно-емкостных энергий построен с помощью введения новой матрицы взаимодействия (взаимного влияния) между индуктивной и емкостной подсистемами. Совместное решение данных уравнений полностью определяет динамическое поведение и энергетические характеристики обобщенной модели совмещенных машин различных конструкций и в любых режимах взаимодействия их функциональных элементов.

Показано, что большие перспективы применения совмещенные индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи имеют в микросистемной электромеханике (например в микроприводах на уровне нанотехнологий).

*Ключевые слова:* сегнетомагнетик, диэлектрик, дуально-сопряженная электрофизика, индуктивно-емкостная электромеханика, наноструктурное материаловедение.

*Для цитирования:* Караян Г.С., Гандилян С.В. Тенденции развития совмещенных магнито-электроиндукционных электромеханических преобразователей энергии // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 65—71. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-65-71.

## Development Trends in the Construction of Combined Magnetic-Electroinduction Electromechanical Energy Converters

G.S. Karayan, S.V. Gandilyan

The modern state of the electromechanical science is reviewed. State of the art in combined inductive-capacitive electromechanics is considered, and the fields of its possible practical applications and prospects for its further development are analyzed.

A new approach for mathematical description of transients in dually conjugated dynamic systems is proposed, and the differential equations for combined inductive-capacitive electromechanical energy converters are derived proceeding from the proposed approach.

The generalized Lagrangian theory of combined inductive-capacitive electric machines is developed as uniting the generalized Lagrangian models of inductive and capacitive electro-mechanical energy converters developed proceeding from the fundamental principles of binary-conjugate electrophysics.

The possibility of optimizing an inductive generator's operating mode using a capacitive generator with setting up a parallel or a series resonant circuit (with the interaction matrix serving as the controlling parameter) has been determined. The combined device is essentially a resonant machine, which has the best power performance indicators.

The electrodynamic and electromechanical equations of combined inductive-capacitive electrical machines are given for the case when the structure of their excitation system contains ferroelectromagnets serving as dual-purpose active electrotechnical materials. The necessary Lagrangian for combined inductive-capacitive energy converters has been constructed by introducing a new matrix describing the interaction (mutual influence) between the inductive and capacitive subsystems. Simultaneous solution of these equations fully determines the dynamic behavior and power performance characteristics of the generalized model of combined machines of different designs and in any modes of interaction between their functional elements.

It is shown that combined inductive-capacitive electromechanical converters have great prospects for use in microsystem electromechanics (for example, in microdrives at the level of nanotechnologies).

*Key words:* ferroelectromagnet, dielectric, dually conjugate electrophysics, inductive-capacitive electromechanics, nanostructured materials science.

*For citation:* Karayan G.S., Gandilyan S.V. Development Trends in the Construction of Combined Magnetic-Electroinduction Electromechanical Energy Converters. MPEI Vestnik. 2018;2:65—71. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-65-71.

## Введение

В 1980 — 1990-х гг. в трудах академика А.Г. Иосифьяна и профессора И.П. Копылова на базе анализа физико-технических основ процессов генерирования, передачи, преобразования и потребления электромагнитной энергии в индуктивных (магнито-индукционных) и емкостных (электро-индукционных) электрических машинах и аппаратах была установлена возможность реализации совмещенных индуктивно-емкостных (магнито-электроиндукционных) электро-механических преобразователей энергии, в которых существенную роль играют как магнитное, так и электрическое потокоцепления [1, 2].

Развитие современной электромеханической науки на стыке последних достижений классической механики, электродинамики, физики твердого тела, электротехнического материаловедения, физики полупроводников, атомной физики, химии, кибернетики и т. п. показало, что возможное практическое воплощение идеи индуктивно-емкостной электромеханики может обеспечить новый качественный скачок развития тех отраслей жизнедеятельности человека, где базово применяются системы электромеханических преобразователей энергии (от медицинской робототехники до создания средств освоения космоса) [3 — 5].

На практическое воплощение идеи индуктивно-емкостной электромеханики сильное воздействие оказывает развитие магистрального направления нанонауки — наноструктурное материаловедение (нанокристаллическое, нанокомпозитное, нановолокнистое и т. д.) [6, 7].

Системный анализ фундаментальных исследований, проведенных на рубеже XX и XXI вв., в области физико-математического моделирования, автоматизированного проектирования и технологического изготовления индуктивно-емкостных компонентов микросистемного электропривода представлен в ряде зарубежных и отечественных научных публикаций [8 — 14].

В настоящей работе, которая является продолжением [14, 15], предложен новый подход к решению некоторых узловых вопросов обобщенного физико-математического моделирования совмещенных индуктивно-емкостных преобразователей энергии, позволяющего учитывать большое число взаимосвязанных факторов, определяющих их динамические и энергетические характеристики.

## Уравнения электромеханических связей в совмещенных индуктивно-емкостных электромеханических преобразователях энергии

В [16 — 18] Лагранжевая теория обобщенных индуктивно-емкостных электрических машин описана как объединение обобщенных Лагранжевых моделей индуктивных и емкостных электромеханических преобразователей энергии, разработанных на основе базовых принципов бинарно-сопряженной электрофизики.

Рассмотрим более корректную постановку этой задачи. Пусть рассматриваемая обобщенная совмещенная машина состоит из четырех контурных цепей: двух статорных симметричных трехфазных (индуктивная  $\hat{S}$  и емкостная  $\hat{R}$  фазы обозначены через  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{c}$  и  $\hat{m}$ ,  $\hat{n}$ ,  $\hat{h}$ ) и двух роторных возбуждения постоянного магнитного  $\hat{F}$  и электрического  $\hat{P}$  полей (пространственно расположенные между системами  $\hat{S}$  и  $R$ ) (рис. 1). Возбуждение постоянного магнитного потока  $\Psi_f = \int B ds$  индуктивной части осуществляется с помощью обмотки возбуждения  $f$ , питаемой постоянным током, а возбуждение постоянного электрического потока  $Q_p^* = \int D ds$  емкостной части — с помощью дипольных электродов, которые подключены через специальные контактные кольца к источнику постоянного напряжения. Между фазными цепями двух подсистем имеется последовательная (или параллельная) гальваническая связь: между  $\hat{a}$  и  $\hat{m}$  через сопротивление  $R_{am}$ ; между  $\hat{b}$  и  $\hat{n}$  через  $R_{bn}$ ; между  $\hat{c}$  и  $\hat{h}$  через  $R_{ch}$  (рис. 2).

Энергетическое состояние совмещенной машины в многомерном фазовом пространстве обобщенных пере-

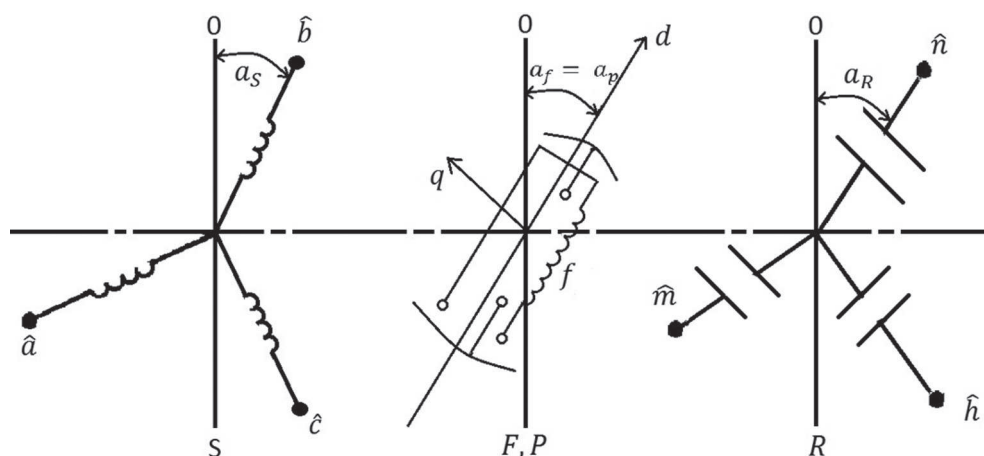


Рис. 1. Схема контурных цепей совмещенной индуктивно-емкостной машины с дуальной системой возбуждения

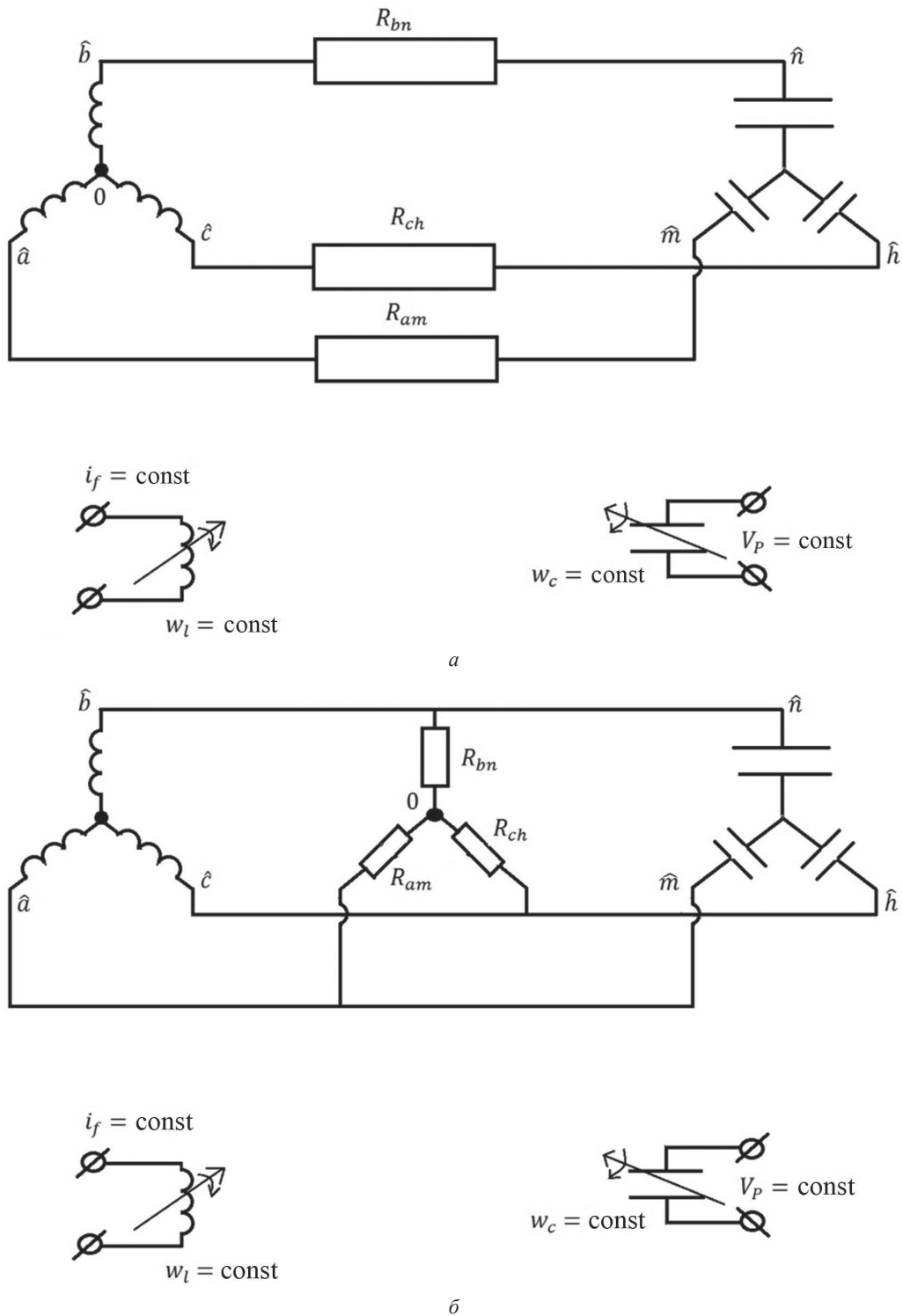


Рис. 2. Электрическая схема совмещенного индуктивно-емкостного генератора переменного тока для последовательного (а) и параллельного (б) соединений фазных цепей

менных описывается с помощью обобщенных координат  $q$  ( $q_a, q_b, q_c, q_f$  — как электрический заряд в контурах тока индуктивной подсистемы),  $\Psi^*$  ( $\Psi_m^*, \Psi_n^*, \Psi_h^*, \Psi_p^*$  — как магнитный поток индуктивного рабочего электрического поля емкостной подсистемы) соответственных обобщенных импульсов  $\Psi^*$  ( $\Psi_a^*, \Psi_b^*, \Psi_c^*, \Psi_f^*$ , рабочий магнитный поток),  $Q^*$  ( $Q_a^*, Q_b^*, Q_c^*, Q_f^*$ , рабочий электри-

ческий поток). В качестве механической обобщенной координаты принимаем угол поворота ротора  $\gamma = \int_0^t \omega dt$  или линейное отклонение  $x = \int_0^t V dt$ .

Выход уравнений обобщенной модели совмещенной машины базируется на уравнениях Лагранжа вто-

рого рода, описывающих поведение неконсервативной системы с сосредоточенными параметрами:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{a}}_i} \right) - \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{a}_i} + \frac{\partial D_0}{\partial \dot{\mathbf{a}}_i} \right) = B_i; \quad i = a, b, c, f, m, n, h, p, \quad (1)$$

где  $\mathbf{a}(\mathbf{a}_i) = a(q_a, q_b, q_c, q_f; \Psi_m^*, \Psi_n^*, \Psi_h^*, \Psi_p^*)$  — совмещенный символический вектор обобщенных координат;

$$\dot{\mathbf{a}}(\dot{\mathbf{a}}_i) = \dot{a} \left( i_j = \frac{dq_i}{dt}; V_j^* = \frac{d\Psi_j^*}{dt} \right), \quad i = a, b, c, f; j = m, n, h, p \quad \text{—}$$

вектор обобщенных скоростей;  $\beta(\beta_i) = \beta(e_i = -d\Psi_i/dt, i_i^* = -dQ_i/dt)$  — обобщенные силы;  $\mathcal{L}$  — энергетическая функция Лагранжа;  $D_0 = -\frac{1}{2} \left( \sum_{j,i} (R_i i_i^2 + G_j V_j^{*2}) \right)$  —

функция потерь или рассеивания.

С точки зрения процессов преобразования энергии, в принципе могут быть реализованы следующие случаи.

1. Механическая энергия подводится к системе  $\widehat{FP}$ , система  $\widehat{F}$  — возбуждена, тогда совмещенная машина работает в режиме индуктивного генератора.

2. Механическая энергия подводится к системе  $\widehat{FP}$ , система  $\widehat{P}$  — возбуждена, тогда совмещенная машина работает в режиме емкостного генератора.

3. Механическая энергия подводится к системе  $\widehat{FP}$ , система  $\widehat{FP}$  — возбуждена постоянным током, тогда система  $\widehat{FS}$  работает в режиме индуктивного, а  $\widehat{PR}$  — в режиме емкостного генератора.

4. Электромагнитная энергия подводит системы  $\widehat{S}$ , система  $\widehat{F}$  возбуждена постоянным током, система  $\widehat{P}$  — постоянным напряжением, тогда, система  $\widehat{FS}$  работает в режиме индуктивного двигателя, а  $\widehat{PR}$  — в режиме емкостного генератора.

Если в структуре совмещенной индуктивно-емкостной электрической машины отсутствуют активные рабочие материалы типа сегнетоэлектриков и магнетиков, то она выглядит как простая линейная сумма двух машин — индуктивной и емкостной, работающих на одном валу и связанных между собой якорными электрическими цепями.

При линейной связи между индуктивной и емкостной подсистемами функция Лагранжа  $\mathcal{L}$  является аддитивной

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_L(x, p, \Psi, q) + \mathcal{L}_C(x, p, Q^*, \Psi^*), \quad (2)$$

при этом уравнения электродинамики совмещенной машины можно выразить в следующей векторно-матричной форме:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Psi^* \\ Q^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_L & 0 \\ 0 & G_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_L \\ \mathbf{V}_c^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_L \\ \mathbf{i}_c^* \end{pmatrix}; \\ \left| \begin{matrix} \Psi^* \\ Q^* \end{matrix} \right| = \left| \begin{matrix} L & 0 \\ 0 & C \end{matrix} \right| \left| \begin{matrix} \mathbf{i}_L \\ \mathbf{V}_c^* \end{matrix} \right|, \end{cases}$$

где  $\Psi, R_L, L$  — субматрицы магнитных потокосцеплений, активных сопротивлений и индуктивностей магнитной машины;  $Q^*, G_c, C$  — субматрицы электрических потокосцеплений, активных проводимостей и емкостей электрических контуров;  $\mathbf{i}_L, \mathbf{V}_L$  — векторы токов и напряжений магнитных контуров;  $\mathbf{V}_c^*, \mathbf{i}_c^*$  — векторы напряжений и токов электрических контуров.

Уравнение динамики дополняется уравнением движения ротора

$$M = (J_m + J_e) \frac{d\omega}{dt} + \frac{K\omega}{P_0} + \frac{P_0}{2} \left( \mathbf{i}_L^T \frac{dL}{dt} \mathbf{i}_L + \mathbf{V}_c^{*T} \frac{dC}{dt} \mathbf{V}_c^* \right) \frac{1}{\omega},$$

где  $J_m, J_e$  — моменты инерции роторов индуктивных и емкостных подсистем;  $P_0$  — число пар полюсов.

При последовательной связи фазовых стартовых цепей индуктивная подсистема как источник напряжений является несущей системой с активно-емкостной нагрузкой, а при параллельной связи несущей системой становится емкостная подсистема как источник тока с активно-индуктивной нагрузкой.

Уравнения электродинамики совмещенной машины могут быть записаны для статорной системы  $\widehat{SR}$  при последовательной связи фазных статорных цепей

$$V_{SP} = \frac{d\Psi}{dt} + R_L \mathbf{i}_L + C_0^{-1} \int \mathbf{i}_c^* dt,$$

где  $\mathbf{i}_c^*$  — вектор,

$$\frac{dQ^*}{dt} + G_c \mathbf{V}_c^* = \mathbf{i}_c^*,$$

а матрица  $C_0$  выражается в форме уравнения для статорной системы  $\widehat{SR}$

$$C_0 = \begin{vmatrix} C_{mm} & 0 & 0 \\ 0 & C_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & C_{hh} \end{vmatrix}$$

при параллельной связи фазных статорных цепей

$$i_{RS}^* = \frac{dQ^*}{dt} + G_c \mathbf{V}_c^* + L_0^{-1} \int \mathbf{V}_L dt,$$

где  $\mathbf{V}_L$  — вектор,

$$\frac{d\Psi}{dt} + R_L \mathbf{i}_L = \mathbf{V}_L,$$

а матрица  $L_0$  равна

$$L_0 = \begin{vmatrix} L_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} \end{vmatrix}.$$

### Резонанс в индуктивно-емкостной машине

Резонанс в электрической цепи может быть получен как при параллельном соединении индуктивной

части с емкостной частью (резонансе токов), так и при их последовательном соединении (резонансе напряжений) [19].

В совмещенной машине, не содержащей внешних источников энергии, реактивная мощность определяется частной переменного тока  $\omega = \omega_L = \omega_C$  и максимальными значениями энергии, накапливаемой в индуктивных и емкостных подсистемах машины

$$\begin{cases} P_L = \mathbf{V}_L \mathbf{i}_L \sin \frac{\pi}{2} = \frac{L \mathbf{i}_L^2}{2} = \omega W_{L(\max)}; \\ P_C = -\mathbf{V}_C^* \mathbf{i}_C^* \sin \frac{\pi}{2} = \frac{L \mathbf{i}_L^2}{2} = -\omega \frac{C \mathbf{V}_C^{*2}}{2} = -\omega W_{C(\max)}, \end{cases}$$

где  $W_{L(\max)}$ ,  $W_{C(\max)}$  – максимальные значения энергии, периодически накапливаемые в магнитном поле индуктивной и электрическом поле емкостной машин.

Исходя из закона сохранения энергии, реактивная мощность совмещенной машины равна алгебраической сумме реактивных мощностей индуктивных и емкостных машин

$$P^0 = P_L + P_C = \omega (W_{L(\max)} - W_{C(\max)}).$$

При  $P^0 = 0$  имеют место резонансы напряжений (при последовательной связи) и тока (при параллельной связи), при этом выражении для резонанса напряжения и тока выглядят как

$$\begin{cases} V = \left[ V_R^2 + (\mathbf{V}_L - V_C)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \mathbf{i}_L \left[ R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \\ I = \left[ I_R^2 + (I_L - I_C)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \mathbf{V}_C^* \left[ \left( \frac{1}{2} \right)^2 + (1/\omega L - \omega C)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \end{cases}$$

При резонансе энергетические характеристики совмещенной машины наилучшие, поскольку происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной подсистемами, и для создания магнитного и электрического полей машина перестает потреблять реактивную мощность от внешних источников энергии.

Если в структуре системы возбуждения совмещенно индуктивно-емкостной электрической машины существуют активные электротехнические материалы дуального назначения (сегнетомагнетики), то между индуктивной и емкостной подсистемами электрофизическая связь нелинейная. При этом функция Лангранжа  $\mathcal{L}_{LC}$  не является аддитивной функцией

$$\mathcal{L}_{LC} = \mathcal{L}_L + \mathcal{L}_C + \Delta \mathcal{L}_{LC}, \quad (3)$$

где  $\Delta \mathcal{L}_{LC}$  — член лангранжиана.

Необходимый лагранжиан для совмещенных индуктивно-емкостных электромеханических преобразователей (ЭМП) энергии может быть построен с помощью матрицы взаимодействия (взаимного влия-

ния) между индуктивной и емкостной подсистемами  $\widehat{K}_0(q, \psi^*)$ .

$$\widehat{K}_0(q, \psi^*) = \begin{bmatrix} K_{am} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{bn} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ch} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{fp} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $K_{am} = K_0(q_a, \psi_m^*)$ ,  $K_{bn} = K_0(q_b, \psi_n^*)$ ,  $K_{ch} = K_0(q_c, \psi_h^*)$  выражают взаимное влияние между фазными цепями, а  $K_{fp}$  определяет энергетическое состояние совмещенной индуктивной системы возбуждения.

Активные материалы (сегнетомагнетики) устанавливаются в роторе совмещенного индуктивно-емкостного ЭПМ и в общем случае  $K_{fp}$  является непрерывным функционалом от теплоэлектрофизических и механических характеристик этого материала

$$K_{fp} = K_{fp}(\beta(i_f), \varepsilon(V_p), V_o, T), \quad (5)$$

где  $\beta(i_f)$ ,  $\varepsilon(V_p)$  — магнитная и электрическая проницаемости;  $V_o$  — объем;  $T$  — температура активного материала.

Основные аналитические свойства элементов матрицы  $\widehat{K}_0(q, \psi^*)$  формируются как элементы  $K_{am}$ ,  $K_{bn}$ ,  $K_{fp}$ , являются непрерывными периодическими функциями, имеют непрерывную периодическую производную в интервале  $0 \leq \gamma < \infty$  и удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} 0 \leq |K_0(q_i, \psi_j^*)| \leq 1; \\ \lim_{\substack{q_i \rightarrow 0 \\ \psi_j^* \rightarrow 0}} |K_0(q_i, \psi_j^*)| = 0; \\ \int_0^{q_{\max}} \int_0^{\psi_{\max}^*} T_m dq_i d\psi_j^* \leq K^0; \\ K^0 > 0; i = a, b, c; j = m, n, h. \end{cases} \quad (6)$$

При последовательной связи фазных цепей индуктивная подсистема является несущей системой с активно-емкостной нагрузкой, а при параллельной связи — несущей системой является емкостная подсистема как источник тока с активно-индуктивно нагрузкой

$$\begin{cases} \mathcal{L}_L = T_L - \Pi_L; \mathcal{L}_C = T_C - \Pi_C; \\ T_L = \frac{1}{2} \mathbf{i}^\tau L \mathbf{i} + \mathbf{i}^\tau \widehat{K}_0(q, \psi_j^*) \mathbf{V}^*; \Pi_L = \frac{1}{2} \mathbf{V}_\mathbf{я}^* C_\mathbf{я}; \\ T_C = \frac{1}{2} \mathbf{V}^{*\tau} C \mathbf{V}^* + \mathbf{i}^\tau \widehat{K}_0(q, \psi_j^*) \mathbf{V}^*; \Pi_C = \frac{1}{2} \mathbf{i}_\mathbf{я}^\tau L_\mathbf{я} \mathbf{i}_\mathbf{я}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $T_L, T_C$  — эффективная электрокинетическая энергия индуктивной и емкостной подсистем;  $\Pi_L, \Pi_C$  — энергия электрического поля емкостной и магнитной индуктивной нагрузок;  $\mathbf{i}^\tau \widehat{K}_0(q, \psi_j^*) \mathbf{V}^*$  — объемная энергия между двумя подсистемами ( $\tau$  — транспонированная матрица);  $L, C, L_\mathbf{я}$  — матрицы индуктивностей, емкостей и напряжения якоря;  $\mathbf{i}(i_a, i_b, i_c, i_j)$  — вектор токов индуктивных машин;  $\mathbf{V}_\mathbf{я}^*(V_m^*, V_n^*, V_h^*, V_p^*)$  — вектор на-

пряжения якоря емкостной машины;  $\mathbf{i}_a (i_a, i_b, i_c, 0)$  — вектор токов якоря индуктивной машины;

$$L_{я} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SF} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; C_{я} = \begin{bmatrix} C_{RR} & C_{RP} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На базе уравнений (1), (2), (3) — (7) уравнения электродинамики и электромеханики для стационарных режимов совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП могут быть записаны в следующий векторно-матричной форме.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} + R_L \mathbf{i}_L + K_0(q_i, \Psi_j^*) \frac{dV_C^*}{dt} &= V_{LC}; \\ \frac{dQ^*}{dt} + G_c V_C^* + K_0(q_i, \Psi_j^*) \frac{di_L}{dt} &= i_{CR}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$M_{LC} = -\frac{P_0}{2} \left[ i_L \frac{\partial L}{\partial \gamma} \mathbf{i}_L^T + V_C^* \frac{\partial C}{\partial \gamma} \mathbf{V}_C^{*T} + \mathbf{i}_L \frac{\partial K_0(q, \Psi_j^*)}{\partial \gamma} \mathbf{V}_C^{*T} \right]. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8), (9) полностью определяет динамическое поведение обобщенной модели совмещенной ЭМП в любых режимах взаимодействия их функциональных элементов.

Для исследования совмещенных ЭМП конкретной конструкции в задачах автоматизированного проектирования в данных уравнениях нужно учесть все конструкционные особенности функциональных элементов. Зависимости элементов матрицы взаимодействия от физических характеристик и конструктивных параметров совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП позволяют применить теорию планирования экспериментов [20].

## Заключение

Приведены дифференциальные управления индуктивно-емкостных электромеханических преобразователей энергии, на основе которых представлены уравнения индуктивных и емкостных электрических машин переменного тока.

Использование достижений индуктивных электрических машин для развития емкостных электрических машин при помощи инверсно-сопряженной электродинамики может значительно ускорить развитие последних и стать основой для создания индуктивно-емкостной машины с рабочим электромагнитным полем.

Показана возможность оптимизации рабочего режима индуктивного генератора с помощью емкостного генератора (или наоборот) с образованием параллельной (или последовательной) резонансной цепи (управляющий параметр — матрица взаимодействия). Совмещенная машина является резонансной и имеет наилучшие энергетические показатели.

Более глубокое применение разработанных теоретических принципов для обобщенного физико-математического, компьютерного моделирования, расчета

оптимальных энергетических показателей совмещенных индуктивно-емкостных ЭМП энергии и их систем будет приведено в дальнейших публикациях авторов.

## Литература

1. **Иосифьян А.Г.** Эволюция физических основ электротехники и электродинамики // *Электричество*. 1987. № 12. С. 19—21; 1989. № 9. С. 7—14.
2. **Копылов И.П., Гандилян С.В.** Некоторые вопросы общественного физико-математического моделирования электромеханических преобразователей энергии // *Электротехника*. 1998. № 9. С. 25—40.
3. **Лапцевич И.П., Гречихин Л.Н., Кузь Н.Г.** Энергетическая база беспилотных летающих аппаратов // *Изв. высш. учеб. заведений СНГ. Серия «Энергетика»*. 2012. № 6. С. 64—77.
4. **Носов Г.В., Пустыльников С.В.** Индуктивно-емкостный генератор мощных импульсов тока для питания электрофизических установок в частотном режиме // *Известия Томского политехн. ун-та*. 2012. Т. 320. № 4. С. 111—115.
5. **Челухин В.А.** Уравнения электромеханических связей в индуктивно-емкостных электроприводах с учетом влияния магнитоэлектрического эффекта в сегнетомагнетике // *Известия Томского политехн. ун-та*. 2014. Т. 325. № 4. С. 76—80.
6. **Фраерман А.А.** Магнитные состояния и транспортные свойства ферромагнитных наноструктур // *УФН*. 2012. Т. 182. № 12. С. 1345—1351.
7. **Ter-Oganessian N.V.** Dielectric and Magnetic Properties of Magnetoelectric Delafossites // *Ferroelectrics*. 2012. V. 438. No. 1. Pp. 101—106.
8. **Gallacher B.J., Burdess J.S., Harris A.J., Mc-Nie M.E.** The Design and Fabrication of a Multi Axis Vibrating Ring Gyroscope // *Proc. Progress in Phys*. 2001. V. 64. Pp. 10—20.
9. **Muralt P.** Micromachined Infrared Detectors Based on Pyroelectric Thin Films // *Ibid*. P. 1339—1388.
10. **Нанотехнологии** в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005.
11. **Турков В.Е., Жукова С.А., Рискин Д.Д.** Реактивные микродвигатели, изготавливаемые по технологии МСТ // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. № 12. С. 7—21.
12. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии: возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Технологии, 2006.
13. **Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М.** Основы нанотехнологии в технике. М.: Академия, 2009.
14. **Karayan H.S., Gandilyan S.V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS) // *Armenian J. Phys*. 2016. V. 9 (3). Pp. 244—259.
15. **Караян Г.С., Гандилян С.В.** Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // *Вестник МЭИ*. 2017. № 5. С. 63—70.

16. **Иосифьян А.Г., Арешян Г.Л.** Основы теории синхронных емкостных машин переменного тока // Докл. АН Армянской ССР. 1981. Т. 73. № 1. С. 54—61.

17. **Челухин С.В.** Совмещенные индуктивно-емкостные машины постоянного тока // Изв. высш. учеб. заведений. Серия «Электромеханика». 1987. № 5 С. 48—52.

18. **Гандилян С.В.** Совмещенные магнитно-электроиндукционные (индуктивно-емкостные) электро-механические преобразователи энергии // Электричество. 1988. № 8. С. 22—28.

19. **Гандилян С.В.** Совмещенные индуктивно-емкостные электро-механические преобразователи энергии // Известия АН РФ. Серия «Энергетика и транспорт». 1993. № 2. С. 50—62.

20. **Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т.** Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд.-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2011.

## References

1. **Iosif'yan A.G.** Evolyutsiya Fizicheskikh Osnov Elektrotehniki i Elektrodinamiki. Elektrichestvo. 1987;12:19—21; 1989;9:7—14. (in Russian).

2. **Kopylov I.P., Gandilyan S.V.** Nekotorye Vop-rosy Obshchestvennogo Fiziko-matematicheskogo Modelirovaniya Elektromekhanicheskikh Preobrazovateley Energii. Elektrotehnika. 1998;9:25—40. (in Russian).

3. **Laptsevich I.P., Grechikhin L.N., Kuts' N.G.** Energeticheskaya Baza Bepilotnykh Letayushchikh Apparatov. Izv. Vyssh. Ucheb. Zavedeniy SNG. Seriya «Energetika». 2012;6:64—77. (in Russian).

4. **Nosov G.V., Pustynnikov S.V.** Induktivno-емкостный Generator Moshchnykh Impul'sov Toka dlya Pitaniya Elektrofizicheskikh Ustanovok v Chastotnom Rezhime. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta. 2012; 320;4:111—115. (in Russian).

5. **Chelukhin V.A.** Uravneniya Eletromekhanicheskikh Svyazey v Induktivno-емкостnykh Elektroprivodakh s Uchetom Vliyaniya Magnitoelektricheskogo Effekta v Segnetomagnetike. Izvestiya Tomskogo Politekhn. Un-ta. 2014;325;4:76—80. (in Russian).

6. **Fraerman A.A.** Magnitnye Sostoyaniya i Transportnye Svoystva Ferromagnitnykh Nanostruktur. UFN. 2012;182;12:1345—1351. (in Russian).

7. **Ter-Oganessin N.V.** Dielectric and Magnetic Properties of Magnetolectric Delafossites. Ferroelectrics. 2012;438;1:101—106.

8. **Gallacher B.J., Burdess J.S., Harris A.J., Mc-Nie M.E.** The Design and Fabrication of a Multi Axis Vibrating Ring Gyroscope. Proc. Progress in Phys. 2001;64:10—20.

9. **Murali P.** Micromachined Infrared Detectors Based on Pyroelectric Thin Films. Ibid:1339—1388.

10. **Nanotekhnologii** v Elektronike / pod red. Yu.A. Chaplygina. M.: Tekhnosfera, 2005. (in Russian).

11. **Turkov V.E., Zhukova S.A., Riskin D.D.** Reaktivnye Mikrodvigateli, Izgotavlivaemye po Tekh-

nologii MST. Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika. 2014; 12:7—21. (in Russian).

12. **Al'tman Yu.** Voennye Nanotekhnologii: Vozmozhnosti Primeneniya i Preventivnogo Kontrolya Vooruzheniy. M.: Tekhnologii, 2006. (in Russian).

13. **Kovshov A.N., Nazarov Yu.F., Ibragimov I.M.** Osnovy Nanotekhnologii v Tekhnike. M.: Akademiya, 2009. (in Russian).

14. **Karayan H.S., Gandilyan S.V.** Several Issues of Generalized Physical and Mathematical Modeling of Micro- and Nano-Electromechanical Systems (MEMS and NEMS). Armenian J. Phys. 2016;9 (3):244—259.

15. **Karayan G.S., Gandilyan S.V.** Sovremennoe Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Mikrosistemnoy Elektromekhaniki. Vestnik MPEI. 2017;5:63—70. (in Russian).

16. **Iosif'yan A.G., Areshyan G.L.** Osnovy Teorii Sinkhronnykh Emkostnykh Mashin Peremennogo Toka. Dokl. AN Armyanskoy SSR. 1981;73;1:54—61. (in Russian).

17. **Chelukhin S.V.** Sovmeshchennye Induktivno-емкостные Mashiny Postoyannogo Toka. Izv. Vyssh. Ucheb. zavedeniy. Seriya «Elektromekhanika». 1987; 5:48—52. (in Russian).

18. **Gandilyan S.V.** Sovmeshchennye Magnitno-электроиндукционные (Индуктивно-емкостные) Elektromekhanicheskie Preobrazovateli Energii. Elektrichestvo. 1988;8:22—28. (in Russian).

19. **Gandilyan S.V.** Sovmeshchennye Induktivno-емкостные Elektromekhanicheskie Preobrazovateli Energii. Izvestiya AN RF. Seriya «Energetika i Transport». 1993;2:50—62. (in Russian).

20. **Sidnyaev N.I., Vilisova N.T.** Vvedenie v Teoriyu Planirovaniya Eksperimenta. M.: Izd.-vo MGTU im N.E. Bauman, 2011. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Караян Гамлет Суренович** — доктор физико-математических наук, чл.-корр. НАН РА, профессор Ереванского государственного университета (г. Ереван, Армения), e-mail: hsKarayan@yandex.ru

**Гандилян Сейран Вартович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Ереванского государственного университета (г. Ереван, Армения), e-mail: angastroi@mail.ru

## Information about authors

**Karayan Gamlet S.** — Dr.Sci. (Phys-Math.), corresponding member of NAS RA, Professor of Yerevan State University (Yerevan, Armenia), e-mail: hsKarayan@yandex.ru

**Gandilyan Seyran V.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Head of Laboratory, Yerevan State University (Yerevan, Armenia), e-mail: angastroi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.06.2017