

УДК 621.313.17

УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СЕГНЕТОМАГНЕТИКЕ

Челухин Владимир Алексеевич,

д-р техн. наук, профессор факультета компьютерных технологий
Комсомольского-на-Амуре Государственного технического университета,
Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.
E-mail: Cheluhin-VA@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития электромеханических преобразователей энергии и электроприводов с использованием новых активных материалов.

Цель работы: вывод уравнений системы электропривода индуктивно-ёмкостного типа с учетом взаимного магнитоэлектрического эффекта в активном сегнетомагнетике электромеханического преобразователя для анализа его электромеханических характеристик.

Методы исследования: математический анализ процесса управления на основе классической математической модели обобщенного электромеханического преобразователя энергии.

Результаты. Получены уравнения статических электромеханической и механической характеристик электропривода с индуктивно-ёмкостными компонентами, сегнетомагнетиком в качестве активного материала, и определен вид их характеристик. Показано, что в таких устройствах с сегнетомагнетиком в качестве активного материала возникает магнитоэлектрический эффект, влияние которого проявляется в усилении или ослаблении магнитных полей электрическими полями, и наоборот. Поскольку его влияние может быть весьма существенным – до 30 %, оно должно быть учтено в расчётах. Предложено учитывать влияние магнито-электрического эффекта с помощью введения дополнительных ЭДС, возникающих в обмотках индуктивной части и обкладках ёмкостей ёмкостной части ротора машины. Математическая модель такого двигателя в приводе индуктивно-ёмкостного двигателя постоянного тока с конвекционной ёмкостной частью проводящего типа будет содержать классические уравнения индуктивной и ёмкостной части, но с дополнительными ЭДС в обеих частях, возникающих из-за наличия магнито-электрического эффекта. Для получения уравнений механических характеристик такого двигателя предложено воспользоваться известными уравнениями обобщенной машины с добавлением в них вышеуказанной составляющей. Применяя к ним также преобразования на основе дуально-инверсной электродинамики, когда ёмкости заменяются на индуктивности, а индуктивности на ёмкости, и учтя добавочные члены взаимного влияния, получим уравнения для расчета соответствующих механических характеристик индуктивно-ёмкостного двигателя постоянного тока с конвекционной ёмкостной частью проводящего типа. Показано также, что преимуществом индуктивно-ёмкостного двигателя является универсальность регулирования, которое возможно как индуктивной, так и его ёмкостной составляющей.

Ключевые слова:

Сегнетомагнетик, индуктивно-ёмкостная компонента, математическая модель, ёмкостный электродвигатель, взаимная индуктивность, взаимная ёмкость, диэлектрик.

Развитие электромеханики и появление принципиально новых конструкций электрических машин, в том числе и индуктивно-емкостных, во многом зависит от прогресса в создании новых электротехнических материалов и успехов физики твердого тела.

Современные электротехнические комплексы созданы в подавляющей степени на основе индуктивных компонентов, разработка которых ведется уже второе столетие. Поэтому ожидать что-то принципиально новое в этом направлении уже не приходится. Качественно новый скачок в развитии электромеханических преобразователей энергии может быть осуществлен на базе новых активных и конструкционных материалов, обладающих такими уникальными свойствами, как сверхпроводимость, фазовые превращения при тепловом воздействии, сегнетомагнитные свойства. В этих условиях возникает потребность в разработке и создании новых схем и компонентов электрооборудования, работа которых основана на современных достижениях физики твердого тела и материаловедения.

На сегодня физикой твердого тела открыты и активно исследуются сегнетомагнетики – материалы, которые сочетают в себе свойства ферромагнитных материалов и сегнетоэлектриков [1–10].

Сегнетомагнетиками является сравнительно недавно открытый класс веществ, в которых одновременно существуют магнитное и сегнетоэлектрическое (или антисегнетоэлектрическое) упорядочения. Открытию сегнетомагнитных соединений физикой твердого тела предшествовал период интенсивного и успешного развития физики магнитных явлений и сегнетоэлектричества в отдельности, что отражалось в электромеханике развитием индуктивных и емкостных машин. Еще Л.Д. Ландау и Е.М. Лившиц в 1959 г. [11] указали на возможность существования в магнитоупорядоченных кристаллах равновесной электрической поляризации, пропорциональной напряженности магнитного поля, и равновесной намагниченности, пропорциональной напряженности электрического поля (линейный магнитоэлектрический эффект). В 1958 г. группа ленинградских физиков, проводя поиск новых сегнетоэлектрических

соединений, пришла к открытию сегнетоэлектриков со структурой перовскита и значительным содержанием ионов железа, что дало основание надеяться, что соединения со структурой перовскита могут быть одновременно сегнетоэлектриками и ферро-(антиферро-) магнетиками. Возможность сосуществования спонтанных магнитных моментов и поляризации не находится в противоречии с общими критериями возникновения ферромагнетизма и сегнетоэлектричества в отдельности. Магнитное упорядочение определяется обменным взаимодействием спинов, а сегнетоэлектрическое – перераспределением зарядовой плотности в решетке. Исследования, проводящиеся во многих странах в этом направлении, указывают на возможность получения сегнетомагнетиков с достаточно высокими свойствами как ферромагнитной составляющей, так и сегнетоэлектрической.

Эти свойства могут быть с успехом применены в электротехнических комплексах, с использованием в их составе индуктивно-ёмкостных компонент [12, 13].

Ранее идея создания и развития этого направления высказывалась в трудах д.т.н., профессора И.П. Копылова, академика Арм. ССР А.Г. Иосифьяна, к.т.н. С.В. Ганделяна, В.В. Минасяна [14, 15].

Однако в этих работах не рассматривались вопросы использования сегнетомагнетиков в конструкциях этих компонент. Проблема заключается в том, что этот материал наиболее активно исследуется в последние годы, и поэтому в этих работах совершенно не рассматривались вопросы взаимного влияния магнитных и электрических полей в конструкции индуктивно-ёмкостных компонент. Индуктивно-ёмкостная компонента такого комплекса будет содержать сегнетомагнетик в качестве активного материала, причем со значительным магнитоэлектрическим эффектом.

При выводе основных уравнений не учитывался взаимный магнитоэлектрический эффект в сегнетомагнетике, значительное влияние которого обнаружено также совсем недавно, и влияние которого может быть весьма существенным.

Явление магнитоэлектрического эффекта в сегнетомагнетике обнаружено недавно. Суть его – усиление или ослабление магнитных полей электрическими полями, и наоборот [16]. Его влияние может быть весьма существенным – до 30 %, и поэтому оно должно быть учтено в расчётах.

Рассмотрим учет влияния этого эффекта на примере использования в приводе индуктивно-ёмкостного двигателя постоянного тока с конвекционной ёмкостной частью проводящего типа. В таком двигателе индуктивная и ёмкостная части, расположенные в одной машине, работают на один вал. Математическая модель такого двигателя будет содержать уравнения индуктивной и ёмкостной части [17].

Для вывода уравнений воспользуемся уравнениями индуктивной обобщенной электрической машины [18–20]. Динамика обобщенной машины

описывается четырьмя уравнениями электрического равновесия в цепях её обмоток и уравнением электромеханического преобразования энергии, которое выражает электромагнитный момент машины как функцию электрических и механических координат системы:

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + d\psi_{1\alpha}/dt; \\ u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + d\psi_{1\beta}/dt; \\ u_{2d} &= R_2 i_{2d} + d\psi_{2d}/dt; \\ u_{2q} &= R_2 i_{2q} + d\psi_{2q}/dt, \end{aligned}$$

где R_1 и R_2 – активные сопротивления фаз ротора и статора; ψ – потокосцепления; i – токи цепей. Потокосцепления каждой обмотки в общем виде определяются результирующим действием токов всех обмоток машины.

Применив к этой системе уравнений преобразования на основе дуально-инверсной электродинамики [10], получим подобную систему для ёмкостной части машины. Для этого заменим сопротивления на проводимости, напряжения – на токи, потокосцепления – на взаимные ёмкости.

$$\left. \begin{aligned} i_{1\alpha} &= G_1 u_{1\alpha} + dC_{1\alpha}^{RS}/dt; \\ i_{1\beta} &= G_1 u_{1\beta} + dC_{1\beta}^{RS}/dt; \\ i_{2d} &= G_2 u_{2d} + dC_{2d}^{RS}/dt; \\ i_{2q} &= G_2 u_{2q} + dC_{2q}^{RS}/dt, \end{aligned} \right\}$$

где G_1 и G_2 – проводимости фаз ротора и статора; C^{RS} – взаимные ёмкости электродов ротора и статора; u – напряжения на обкладках ёмкостей. Здесь также взаимные ёмкости в общем виде определяются результирующим действием напряжений на всех ёмкостях ёмкостной части машины.

Поскольку обе части машины работают в одном корпусе и жестко связаны через вал, то обе системы объединяются в одну:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + d\psi_{1\alpha}/dt; \\ u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + d\psi_{1\beta}/dt; \\ u_{2d} &= R_2 i_{2d} + d\psi_{2d}/dt; \\ u_{2q} &= R_2 i_{2q} + d\psi_{2q}/dt; \\ i_{1\alpha} &= G_1 u_{1\alpha} + dC_{1\alpha}^{RS}/dt; \\ i_{1\beta} &= G_1 u_{1\beta} + dC_{1\beta}^{RS}/dt; \\ i_{2d} &= G_2 u_{2d} + dC_{2d}^{RS}/dt; \\ i_{2q} &= G_2 u_{2q} + dC_{2q}^{RS}/dt. \end{aligned} \right\}$$

Эта система уравнений в целом пригодна для расчёта режимов работы машины. Однако необходимо заметить, что это возможно только в одном случае – если отсутствует взаимное влияние одной части машины на другую. Такая математическая модель представляет индуктивно-ёмкостную машину как простую сумму двух машин – индуктивной и ёмкостной, работающих на одном валу и связанных между собой электрическими цепями. В физической модели такой машины отсутствует наличие сегнетомагнитного материала и учет его влияния. В реальной машине, использующей сегнетомагнетик в качестве активного материала, такое влияние обязательно будет существовать и может быть существенным. Это влияние будет двоя-

ким: взаимное влияние электрических цепей индуктивной части на электрические цепи ёмкостной части и особенно взаимное влияние полей – магнитного на электрическое и, наоборот, электрического на магнитное.

Влияние магнитоэлектрического эффекта при составлении уравнений цепей математической модели индуктивно-ёмкостной электрической машины (ИЁЭМ) можно учесть путём введения в эти уравнения дополнительных членов, учитывающих это влияние. Такой подход основан на использовании достижений в теории индуктивных машин и их математических моделей, которые с помощью методов дуально-инверсной электродинамики можно перенести на ёмкостные машины с учётом их особенностей и требований к индуктивно-ёмкостной машине.

В этом случае предполагается, что электрические поля ёмкостной части машины создают в обмотках индуктивной её части некоторые магнитные поля, возбуждающие дополнительные ЭДС в этих обмотках. Эти дополнительные ЭДС учитываются с помощью введения одной или нескольких дополнительных обмоток в индуктивной части.

Аналогично и для ёмкостной части. Предполагается, что магнитное поле индуктивной части машины создают в её ёмкостной части некоторые электрические поля, которые индуцируют дополнительные токи в её обкладках, что учитывается с помощью введения дополнительных обкладок в ёмкостной части. При таком подходе добавочные члены, учитывающие взаимное влияние частей машины, примут характер индуктивных сопротивлений для индуктивной части и характер ёмкостных для ёмкостной части, что значительно упрощает создание математической модели индуктивно-ёмкостной машины и облегчает физическое понимание процессов, проходящих в ней.

В этом случае математическая модель ИЁЭМ строится следующим образом. Вначале по соответствующей физической модели определяется число дополнительных обмоток в её индуктивной части, которые учитывают взаимное влияние ёмкостной

части. Затем такое же количество дополнительных обкладок, учитывающих влияние индуктивной части, вводятся в уравнение ёмкостной части.

Так как электрические и магнитные поля в индуктивно-ёмкостной машине целиком сосредоточены в роторе, и сегнетомагнетик устанавливается только в её роторе, то в этом случае дополнительное влияние необходимо учитывать только в роторе. Поэтому пространственная модель машины будет в общем случае содержать две дополнительные обмотки на роторе индуктивной части и две дополнительные ёмкости в роторе для ёмкостной части.

Система уравнений напряжений и токов для обобщённой ИЁЭМ будет иметь в этом случае следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + d\psi_{1\alpha}/dt + d\psi_{1\alpha}^{sr}/dt; \\ u_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + d\psi_{1\beta}/dt + d\psi_{1\beta}^{sr}/dt; \\ u_{2d} &= R_2 i_{2d} + d\psi_{2d}/dt + d\psi_{2d}^{rs}/dt; \\ u_{2q} &= R_2 i_{2q} + d\psi_{2q}/dt + d\psi_{2q}^{rs}/dt; \\ i_{1\alpha} &= G_1 u_{1\alpha} + dC_{1\alpha}^{RS}/dt + dC_{1\alpha}^{sr}/dt; \\ i_{1\beta} &= G_1 u_{1\beta} + dC_{1\beta}^{RS}/dt + dC_{1\beta}^{sr}/dt; \\ i_{2d} &= G_2 u_{2d} + dC_{2d}^{RS}/dt + dC_{2d}^{rs}/dt; \\ i_{2q} &= G_2 u_{2q} + dC_{2q}^{RS}/dt + dC_{2q}^{rs}/dt. \end{aligned} \right\}$$

В этих уравнениях добавочные члены $d\psi^{sr}$, $d\psi^{rs}$, dC^{rs} и dC^{sr} как раз и будут учитывать взаимное влияние ёмкостной и индуктивной частей. Характер знака между ними будет учитывать ослабление или усиление этого влияния.

Математическая модель ИЁЭМ, построенная на основе этой системы уравнений, будет наиболее полно отражать характер процессов, протекающих при работе машины, учитывая магнитоэлектрический эффект.

Для получения уравнений механических характеристик такого двигателя можно воспользоваться известными уравнениями обобщенной машины [12]. Применив к ним также преобразования на основе дуально-инверсной электродинамики и учтя добавочные члены взаимного влияния, получим:

Для индуктивной части

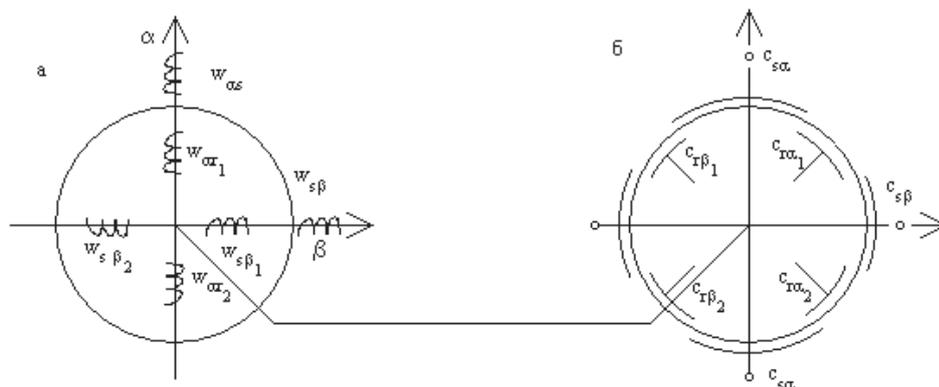


Рис. 1. Пространственная модель ИЁЭМ с учётом взаимного влияния её частей: а) индуктивной; б) ёмкостной

Fig. 1. Space model of inductance-capacitance electric machine (ICEM) considering its parts: а) inductive; б) capacity

$$u_B = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt};$$

$$u_{я} = i_{я} R_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + k\Phi\omega \pm L_d \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_{\mu} = k\Phi i_{я}.$$

Для ёмкостной части

$$i_B = u_B R_B + C_B \frac{du_B}{dt};$$

$$i_{я} = u_{я} R_{я} + C_{я} \frac{di_{я}}{dt} + k\Phi\omega \pm C_d \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_{\epsilon} = k\Phi u_{я}.$$

Здесь L_d, C_d – добавочные взаимные индуктивности и емкости, индуцированные взаимным влиянием полей сегнетомагнетика (магнитоэлектрический эффект), i_d, u_d – токи и напряжения, индуцированные этим эффектом.

С учетом того, что момент для индуктивной части определяется отношением:

$$M_{\mu} = k_{\mu} \Phi_{\mu} i_{я},$$

где $k_{\mu} = p_n N / 2\pi a$ – конструктивный коэффициент; Φ_{μ} – магнитный поток индуктивной части; $i_{я}$ – ток якоря индуктивной части. Если принять, что потоки постоянны, то получим следующее уравнение механической характеристики для индуктивной части:

$$\omega = \frac{u_{я}}{k_{\mu} \Phi_{\mu}} - \frac{R_{я}}{k_{\mu}^2 \Phi_{\mu}^2} M_{\mu} - \frac{I_{я}}{k_{\mu}^2 \Phi_{\mu}^2} \frac{dM_{\mu}}{dt} \pm \frac{I_d}{k_{\mu}^2 \Phi_{\mu}^2} \frac{dM_{\mu}}{dt}.$$

Используя дуально-инверсные положения опять, получим для ёмкостной части:

$$\omega = \frac{i_{я}}{k_{\epsilon} \Phi_{\epsilon}} - \frac{R_{я}}{k_{\epsilon}^2 \Phi_{\epsilon}^2} M_{\epsilon} - \frac{U_{я}}{k_{\epsilon}^2 \Phi_{\epsilon}^2} \frac{dM_{\epsilon}}{dt} \pm \frac{I_d}{k_{\epsilon}^2 \Phi_{\epsilon}^2} \frac{dM_{\epsilon}}{dt}.$$

Поставляя в эти выражения значение момента для индуктивной части

$$M_{\mu} = k_{\mu} \Phi_{\mu} i_{я}$$

и ёмкостной части

$$M_{\epsilon} = k_{\epsilon} \Phi_{\epsilon} u_{я},$$

получим уравнения для электромеханических характеристик обеих частей.

Рассматривая полученные уравнения, можно заключить, что добавочное влияние магнитоэлектрического эффекта лишь увеличит или уменьшит наклон этих характеристик.

Как частный результат полученного математического описания могут быть определены уравнения статических электромеханической и механической характеристик двигателя. При постоянном потоке уравнения этих характеристик запишутся в следующем виде для индуктивной части:

$$\omega_{\mu} = \frac{u_{я}}{k_{\mu} \Phi_{\mu}} - \frac{R_{я}}{k_{\mu}^2 \Phi_{\mu}^2} M_{\mu};$$

для ёмкостной части:

$$\omega_{\epsilon} = \frac{i_{я}}{k_{\epsilon} \Phi_{\epsilon}} - \frac{R_{я}}{k_{\epsilon}^2 \Phi_{\epsilon}^2} M_{\epsilon}.$$

Рассматривая полученные уравнения, можно заключить, что при постоянном потоке электромеханическая и механическая характеристики линейны.

На рис. 2 показаны механические характеристики индуктивно-ёмкостной машины постоянного тока с независимым возбуждением. Здесь каждый из двух взаимосвязанных частей имеет такую характеристику $\omega=f(M_{1,2})$ линия 1. Результирующая характеристика привода показана линией 2. При отрицательном влиянии магнитоэлектрического эффекта будет снижение напряжения индуктивной части и пониженный ток ёмкостной части, поэтому результирующая механическая характеристика 3 привода почти параллельна характеристике 1, но располагается ниже.

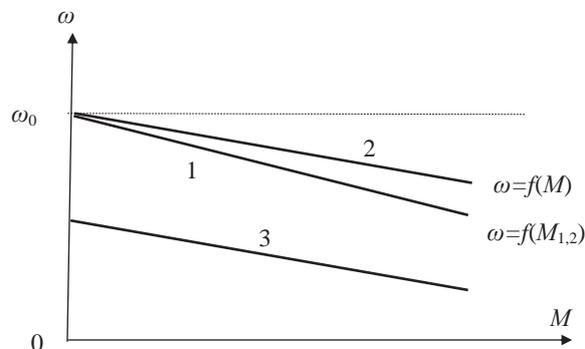


Рис. 2. Механические характеристики ИЭЭМ постоянного тока с независимым возбуждением

Fig. 2. Mechanical data of ICEM of separately excited DC

Причем если построить механические характеристики ёмкостного микродвигателя ЁКД-5-сэ/16, полученные экспериментально, то они будут иметь следующий характер, рис. 3.

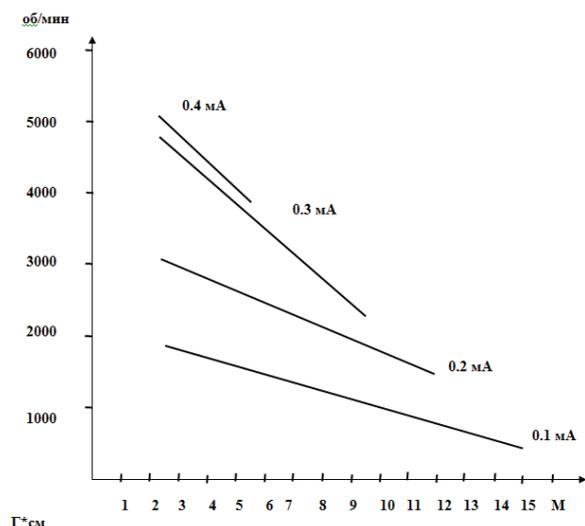


Рис. 3. Механические характеристики микродвигателя ЁКД-5-сэ/16, полученные экспериментально

Fig. 3. Mechanical data of micromotor EKD-5-сэ/16 obtained experimentally

Как видно из графиков на рис. 2, 3, с ростом значения тока емкостной машины начальная точка характеристик перемещается выше, что в точности соответствует виду механических характеристик индуктивных двигателей постоянного тока независимого возбуждения при регулировании их частоты вращения изменением значения магнитного потока возбуждения. В индуктивных двигателях постоянного тока независимого возбуждения значения угловых скоростей лежат выше точки скорости идеального холостого хода при ослаблении магнитного потока возбуждения. Эти характеристики показывают, что

с ростом нагрузки частота вращения ротора значительно уменьшается и наклон характеристик увеличивается.

В микроприводах и роботах на уровне нанотехнологий такие микропреобразователи с индуктивно-емкостной компонентой чаще всего будут работать для привода отдельных частей, работающих с небольшим отношением времени работы к общему времени работы. Поэтому целесообразнее всего рассматривать совместную работу индуктивной и емкостной компонент в комплексе с механической нагрузкой при кратковременном или повторно-кратковременном режиме нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленский Г.А., Чупис И.Е. Сегнетомагнетики // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 137. – Вып. 3. – С. 415–448.
2. Челухин В.А. Экспериментальное исследование сегнетомагнетиков // Реальная структура и свойства ацентричных кристаллов: Труды Всесоюзной конф. – Благовещенск, 17–22 сент. 1990. – Ч. 2. – 199 с.
3. Иванов О.Н., Скрипченко Е.А., Чумаков А.П. Синтез и физические свойства сегнетомагнетика $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{FeO}_{12}$ // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48. – Вып. 6. – С. 981–983.
4. Веневцев Ю.Н., Гагулин В.В., Любимов В.Н. Сегнетомагнетики. – М.: Наука, 1982. – 167 с.
5. Фраерман А.А. Магнитные состояния и транспортные свойства ферромагнитных наноструктур // УФН. – 2012. – V. 182. – № 12. – С. 1345–1351.
6. Ter-Oganesian N.V. Dielectric and Magnetic Properties of Magnetoelectric Delafossites // *Ferroelectrics*. – 2012. – V. 438. – № 1 – P. 101–106.
7. Spin Structures and Domain Walls in Multiferroics Spin Structures and Magnetic Domain Walls in Multiferroics / P. Pyatakov, A.K. Zvezdin, A.M. Vlasov, A.S. Sergeev, D.A. Sechin, E.P. Nikolaeva, A.V. Nikolaev, H. Chou, S.J. Sun, L.E. Calvet // *Ferroelectrics*. – 2012. – V. 438. – № 1. – P. 79–88.
8. Nucleation-induced self-assembly of multiferroic BiFeO_3 - CoFe_2O_4 nano-composites / S.M. Stratulat, Xiaoli Lu, A. Morelli, D. Hesse, W. Erfurth // *Nano Lett.* – 2013. – V. 13. – № 8. – P. 3884–3889.
9. Magnetic Field-Induced Ferroelectric Switching in Multiferroic Aurivillius Phase Thin Films at Room Temperature / L. Keeney, T. Maity, M. Schmidt, A. Amann, N. Deepak // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2013. – V. 96. – № 8. – P. 2339–2357.
10. Пятаков А.П., Зvezdin A.K. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. – 2012. – Т. 182. – С. 593–620.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992. – 266 с.
12. Челухин В.А. Индуктивно-емкостная машина постоянного тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 1987. – № 5. – С. 48–52.
13. Челухин В.А. Выбор схемы соединений индуктивно-емкостной машины методом дуальных цепей // Изв. вузов. Электромеханика. – 1989. – № 8. – С. 104–107.
14. Гандилян С.В., Минасян В.В. Магнито-электроиндукционные электрические машины // Док. АН Арм. ССР. Электромеханика. – 1988. – Т. XXXVI. – № 3. – С. 102–107.
15. Гандилян С.В. Совмещённые магнито-электроиндукционные (индуктивно-емкостные) электромеханические преобразователи энергии // *Электричество*. – 1988. – № 8. – С. 22–28.
16. Челухин В.А. О влиянии магнитоэлектрического эффекта на расчет цепей индуктивно-емкостной машины // Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов: Тезисы докл. 2 Дальневосточной конф. – Комсомольск-на-Амуре, 25–27 мая 1989. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре ПТИ, 1989. – С. 93–94.
17. Копылов И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (электрические машины). – М.: Высш. шк., 1980. – 256 с.
18. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
19. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. 6 изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
20. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

Поступила 28.03.2014 г.

UDC 621.313.17

EQUATIONS OF ELECTROMECHANICAL COUPLINGS IN INDUCTANCE-CAPACITANCE ELECTRIC DRIVES CONSIDERING THE INFLUENCE OF MAGNETOELECTRIC EFFECT IN FERROELECTROMAGNET

Vladimir A. Chelukhin,

Dr. Sc., Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenin Avenue, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: Cheluhin-VA@mail.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop electromechanical energy converters and drives using new active materials.

The main aim of the research is to derive the equation of the electric drive system inductive capacitive type, taking into account the mutual magnetoelectric effect in the active ferroelectromagnet of electromechanical transducer to analyze its electromechanical characteristics.

Methods: control mathematical analysis based on classical mathematical model of the generalized electromechanical energy converter.

Results. The author has obtained the equations of static electromechanical and mechanical characteristics of the electric drive with induction-capacitive components, ferroelectromagnet as an active material and determined the type of their characteristics. It is shown that in such devices with ferroelectromagnets as an active material the magnetoelectric effect occurs. Its influence is manifested in strengthening or weakening of magnetic fields by the electric ones, and vice versa. As its impact can be substantial – up to 30 %, it must be taken into account in calculations. The author proposed to take into account the impact of magneto-electric effect by introducing additional emf arising in inductive windings and capacitive plates of the tanks in the machine rotor. The mathematical model of the motor in the drive of inductive capacitive DC motor with convection capacitive part of conductive type contains classical equations of inductive and capacitive parts, but with additional voltage in both parts arising due to magneto-electric effect. To obtain the mechanical characteristic equations of the engine it was proposed to use the known equations of the generalized machine adding the above mentioned component. Applying the conversions based on dual-inversion electrostatics to them when tanks are replaced by inductance and the capacitance are replaced by the inductance, and taking into account the mutual influence of the additional terms, one can obtain the equations for calculating the corresponding mechanical properties of inductive-capacitive DC motor with convection capacitive part of the conductive type. It was shown as well that the advantage of the inductive-capacitive engine is control versatility which is possible both by inductive and capacitive components.

Key words:

Ferroelectromagnet, inductive capacitive component, mathematical model, capacitive motor, mutual inductance, mutual capacitance, dielectric.

REFERENCES

- Smolensky G.A. Chupis I.E. Segnetomagnetiki [Ferroelectromagnets]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1982, vol. 137, Iss. 3, pp. 415–448.
- Chelukhin V.A. Eksperimentalnoe issledovanie segnetomagnetikov [Experimental study ferroelectromagnets]. *Realnaya struktura i svoystva atsentrirnykh kristallov: Trudy Vsesoyuznoy konferentsii* [Proc. of All-Union Conference. Real structure and properties of acentric crystals]. Blagoveshchensk, 17–22 September, 1990. P. 2, 199 p.
- Ivanov O.N., Scripchenko E.A., Chumakov A.P. Sintez i fizicheskie svoystva segnetomagnetiki $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{FeO}_{12}$ [Synthesis and physical properties of ferroelectromagnet $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{FeO}_{12}$]. *Fizika tverdogo tela – Solid State Physics*, 2006, vol. 48, Iss. 6, pp. 981–983.
- Venevtsev U.N., Gagulin V.V., Lyubimov V.N. *Segnetomagnetiki* [Ferroelectromagnets]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 167 p.
- Fraerman A.A. *Magnitnye sosoyaniya i transportnye svoystva ferromagnitnykh nanostruktur* [Magnetic states and transport properties of ferromagnetic nanostructures]. *Phys. Usp.*, 2012, vol. 55, no. 12, pp. 1255–1260.
- Ter-Oganessian N.V. Dielectric and Magnetic Properties of Magnetoelectric Delafossites. *Ferroelectrics*, 2012, vol. 438, no. 1, pp. 101–106.
- Pyatakov P., Zvezdin A.K., Vlasov A.M., Sergeev A.S., Sechin D.A., Nikolaeva E.P., Nikolaev A.V., Chou H., Sun S.J., Calvet L.E. Spin Structures and Domain Walls in Multiferroics Spin Structures and Magnetic Domain Walls in Multiferroics. *Ferroelectrics*, 2012, vol. 438, no. 1, pp. 79–88.
- Stratulat S.M., Xiaoli Lu, Morelli A., Hesse D., Erfurth W. Nucleation-induced self-assembly of multiferroic $\text{BiFeO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$ nano-composites. *Nano Lett.*, 2013, vol. 13, no. 8, pp. 3884–3889.
- Keeney L., Maity T., Schmidt M., Amann A., Deepak N. Magnetic Field-Induced Ferroelectric Switching in Multiferroic Aurivillius Phase Thin Films at Room Temperature. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2013, vol. 96, no. 8, pp. 2339–2357.
- Pyatakov A.P., Zvezdin A.K. Magnitoelektricheskie materialy i multiferroiki [Magnetoelectric materials and multiferroics]. *Physics-Uspekhi*, 2012, vol. 182, pp. 593–620.
- Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of Continuous Media*. Oxford, Pergamon Press, 1984. 66 p.
- Chelukhin V.A. Induktivno-emkostnaya mashina postoyannogo toka [Inductive-capacitive DC machine]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Proceedings of Higher Education. Electromechanics*, 1987, no. 5, pp. 48–52.
- Chelukhin V.A. Vybory skhemy soedineniy induktivno-emkostnoy mashiny metodom dualnykh tsepey [Choosing the schematic inductive capacitive machines by dual chains]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Proceedings of Higher Education. Electromechanics*, 1989, no. 8, pp. 104–107.
- Gandilyan S.V., Minasyan V. Magnito-elektroinduktsionnye elektricheskie mashiny [Magneto-inductive electric machines]. *Doc. AN Arm. SSR. Elektromekhanika*, 1988, vol. XXXVI, no. 3, pp. 102–107.
- Sovmeshchennyye magnitno-elektroinduktsionnye (induktivno-emkostnye) elektromekhanicheskie preobrazovateli energii [Combined Magnetic electroinductive (inductance-capacitance) electromechanical energy converters]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1988, no. 8, pp. 22–28.
- Chelukhin V.A. O vliyaniy magnitoelektricheskogo effekta na raschet tsepey induktivno-emkostnoy mashiny [On the influence of magnetoelectric effect on calculation of inductively machine capacitive circuits]. *Sovershenstvovanie elektrooborudovaniya i sredstv avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov: Tezisy dokladov vtoroy Dalnevostochnoy konferentsii* [Perfection of electrical and process automation. Abstracts. 2 Far Eastern Conf.]. Komsomolsk-on-Amur, May 25–27 1989. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur PTI, 1989. pp. 93–94.
- Kopylov I.P. *Primenenie vychislitelnykh mashin v inzhenerno-ekonomicheskikh raschetakh (elektricheskie mashiny)* [Application of computers in engineer economic calculations (electrical equipment)]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 256 p.
- Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p.
- Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchyy kurs elektroprivoda* [The general course of electric drive]. 6th ed., ext. and rev. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 576 p.
- Kopylov I.P. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii* [Electromechanical energy converters]. Moscow, Energiya Publ., 1987. 248 p.

Received: 28 March 2014.