

УДК 621.313.537

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ЕМКОСТНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Исмагилов Ф. Р., Папернюк В. А., Волкова Т. А.

*ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: [volkovausatu@yandex.ru](mailto:volkovausatu@yandex.ru)*

Рассмотрен электротехнический комплекс с емкостным электромеханическим преобразователем энергии (ЕЭМПЭ), подвижным элементом которого является диэлектрическая жидкость. Определено взаимовлияние параметров электрического поля, создаваемого в емкостном преобразователе, и свойств жидкости, проявляющихся в возникновении в ней направленного движения. С использованием электромеханических и электрогидродинамических аналогий были получены уравнения электромеханического преобразования при различных видах приложенного напряжения: постоянного, переменного однофазного и трехфазного. Получена формула для определения коэффициента полезного действия преобразователя. Численно найдены и экспериментально подтверждены оптимальные параметры преобразователя для возникновения направленного движения в жидкости с заданной скоростью. При этом учитывались такие свойства жидкости, как вязкость, электропроводность и поляризация.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, емкостный электромеханический преобразователь энергии (ЕЭМПЭ), электромеханическое и гидродинамическое преобразование.

## INVESTIGATION OF WORK OF THE ELECTROTECHNICAL COMPLEX WITH CAPASITIVE ELECTROMECHANICAL TRANSDUCER

Ismagilov F. R., Papernyuk V. A., Volkova T. A.

*Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia (450000, Ufa, K. Marx street, 12), e-mail: [volkovausatu@yandex.ru](mailto:volkovausatu@yandex.ru)*

The electro technical complex with capacitive electromechanical energy transducer (CEET) having a dielectric liquid as moving element, is considered. The mutual influence of electrical field parameters, created in the capacitive transducer, and liquid properties, which are shown in occurrence of directed movement into liquid, are determined. The equations of electromechanical transformation were received at various kinds of the applied voltage: direct, variable single-phase and three-phase, at using of electromechanical and electrohydrodynamical analogies. The formula for definition of efficiency of the transducer is received. The optimum parameters of the transducer for occurrence of the directed movement in a liquid with the given speed are numerically found and experimentally confirmed. Thus such properties of a liquid, as viscosity, electro leakage and polarization were taken into account.

Key words: electro technical complex, capacitive electromechanical energy transducer (CEET), electromechanical and electrohydrodynamical transformation.

### Введение

При исследовании новых энергоэффективных устройств для создания, преобразования и передачи энергии рассматриваются электростатические процессы, такие как: генерация, разделение, анализ и контроль заряженных частиц, а также их транспорт и упорядоченное движение, лежащие в основе воздействия электрического поля на диэлектрики. Особенно эти явления интересны в диэлектрических жидкостях, благодаря возможности управлением тепло-, массо- и электропереносом. При рассмотрении подобных процессов необходимо учитывать множество факторов, таких как: физико-химическую природу самих жидкостей, которая влияет на распределение электрического поля в пространстве, и свойства

электрического поля; а также свойства гидростатических и гидродинамических полей. Поэтому взаимовлияние электрического поля на диэлектрическую жидкость необходимо исследовать в некоем электротехническом комплексе, содержащем диэлектрическую жидкую среду и электромеханическое устройство для генерирования и преобразования электрического поля. Таким устройством может служить емкостный электромеханический преобразователь энергии (ЕЭМПЭ). Если ЕЭМПЭ включить в состав некоторого электротехнического комплекса, то можно получить установку для перемешивания жидкостей или для их сепарации. Электротехнический комплекс с ЕЭМПЭ представлен на рис.1.

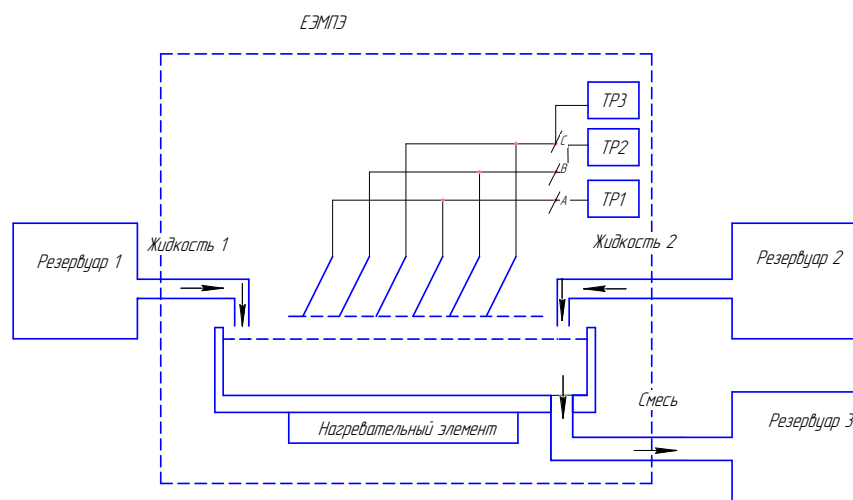


Рис. 1. Электротехнический комплекс с ЕЭМПЭ

В состав электротехнического комплекса входит сам ЕЭМПЭ (показанный пунктиром), состоящий из бака с диэлектрической жидкостью, электродов, подключенных к трем трансформаторам, и нагревательного элемента для интенсификации процессов. Также комплекс состоит из трех резервуаров: из первых двух жидкости, подлежащие смешению, поступают в преобразователь, а третий предназначен уже для смеси (в случае перемешивателя) или отдельных фракций (в случае сепаратора).

**Целью исследования** является разработка математического описания электромеханического преобразования энергии в ЕЭМПЭ и определение зависимости гидродинамического преобразования в жидкости от параметров преобразователя.

В ЕЭМПЭ [4] собственно преобразование энергии происходит благодаря взаимодействию между зарядами. Поэтому при исследовании работы ЕЭМПЭ с жидкостным ротором можно рассматривать электромеханическое преобразование в нем с двух точек зрения: либо как расчет движения заряженных частиц под действием сил заданного электрического поля, либо как расчет полей при заданном распределении заряженных частиц по скоростям. В связи с этим для определения электромеханического преобразования

энергии в ЕЭМПЭ необходимо воспользоваться электромеханическими и электрогидродинамическими аналогиями. Теория электромеханических аналогий основывается на подобии дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в механике и электротехнике [7]. Электрогидродинамические аналогии сводятся к моделированию потенциальных полей несжимаемой жидкости, основанного на приравнивании гидродинамического потенциала скорости и электрического потенциала. Для упрощения вывода уравнений будем рассматривать жидкость как сплошную среду.

На основе электромеханических аналогий и принятой концепции линейности электрических и механических цепей электромеханический преобразователь можно представить как согласующий четырехполюсник с мнимым коэффициентом связи [5], на одном конце которого размещаются электрические параметры, а на другом – механические. Напряжение, подаваемое на электроды преобразователя, является зависимым от электрического тока и механического растяжения:

$$\underline{u} = \frac{1}{j\omega C} \underline{i} - \frac{T_0}{j\omega} \underline{v}, \quad (1)$$

где  $T_0$  – параметр взаимности. Механическое напряжение сжатия является функцией тока и растяжения:

$$\underline{F} = \frac{T_0}{j\omega} \underline{i} - \frac{1}{j\omega n_l} \underline{v}, \quad (2)$$

где  $n_l$  – податливость системы, находящейся в режиме холостого хода электрической части. При электрическом коротком замыкании справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\underline{F}_k}{\underline{u}} = \frac{\underline{i}_k}{\underline{v}} = T_0 C. \quad (3)$$

Постоянная связи внутреннего согласующего четырехполюсника такова, что подводимая мощность равна отводимой:

$$P_{эл} = \tilde{u} \tilde{i}_\omega = \tilde{F}_\omega \tilde{v} = P_{мех}. \quad (4)$$

Чтобы составить уравнения такого электромеханического преобразователя, необходимо определить его характеристики  $C_b$ ,  $T_0$ . Их можно вычислить по физическим и геометрическим параметрам построенной модели. Емкость  $C_b$  можно измерить на электрических клеммах в начальный момент времени подачи напряжения на электроды (когда поляризация молекул верхнего слоя жидкости ещё не произошла).

$$C_b = C = \epsilon_0 \frac{A}{\delta}, \quad (5)$$

где  $A$  – площадь взаимодействующих поверхностей,  $\delta$  – расстояние между поверхностями (в данном случае величина воздушного зазора).

Чтобы определить постоянную преобразователя, равную  $C_b \circ T_0$ , можно использовать следующее соотношение, которое вытекает из уравнения (4):

$$\frac{\underline{F}_k}{\underline{u}} = \frac{\underline{i}_k}{\underline{v}} = C_b T_0 \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно определить скорость «втягивания» жидкости:

$$v = \frac{i_k}{C_b T_0}. \quad (7)$$

При подаче на электроды переменного однофазного напряжения  $\underline{u} \cos \omega t$  заряды переменного знака будут «стекать» с электродов через воздушный промежуток в жидкость. Таким образом, молекулы жидкости будут разноименно поляризоваться и отталкиваться друг от друга в противоположные стороны (на  $180^\circ$ ). А так как действие электрического поля направлено вдоль электродов, то движение поляризованных молекул будет направлено от центра электродов к стенкам бака.

На проекциях электродов возникает напряжение

$$u(t) = u_0 + \hat{u} \cos \omega t. \quad (8)$$

Данное напряжение вызывает силу

$$F(t) = \frac{C_b^2}{2\varepsilon_0 A} (u_0^2 + 2u_0 \hat{u} \cos \omega t). \quad (9)$$

В выражении (9) первое слагаемое – это равновесная сила, второе слагаемое – переменная сила  $F$ , которая представляет собой линейное приближение, соответствующее перемещению (перемещение равно нулю).

При трехфазном переменном напряжении молекулы жидкости также поляризуются, но теперь в первоначальный момент времени поляризованные молекулы отталкиваются друг от друга на  $120^\circ$ . Встречая на своем пути другие заряженные молекулы и сталкиваясь с ними, приобретая другой заряд, а также получая препятствие в виде незаряженных инертных молекул других слоев жидкости, поляризованные молекулы в итоге движутся в двух направлениях, образуя два ламинарных течения: от центра электродов к стенкам бака (как в случае однофазного переменного напряжения) и по центру вдоль бака. Когда эти два потока встречаются, то образуется сложное турбулентное течение.

В результате трехфазного переменного напряжения возникает суммарная сила

$$F(t) = \frac{C_b^2}{2\varepsilon_0 A} (u_0^2 + 2u_0 \hat{u} \cos \omega t + \hat{u}^2 \cos^2 \omega t), \quad (10)$$

третье слагаемое которой и вызывает второй ламинарный поток.

Мощность, которую достигает электрическое поле в жидкости, определяется формулой:

$$W = \int_V \bar{j} \bar{E} dV \quad (11)$$

Полная затрачиваемая мощность:

$$W = \int_V \sigma E^2 dV + \int_V \rho \bar{E} \bar{v} dV \quad (12)$$

Тогда к.п.д. электромеханического преобразования можно определить, как [6]:

$$\eta = \frac{W_\eta}{W} = \frac{W - W_q}{W}, \quad (13)$$

где  $W_q$  – энергия, затрачиваемая на джоулев нагрев, равна

$$W_q = \int_V \sigma E^2 dV = \sigma \cdot \bar{E}^2 V, \quad (14)$$

где  $\bar{E}^2$  – среднее значения квадрата напряженности, определяемое по формуле:

$$\bar{E}^2 = \left( \frac{1}{V} \right) \int E^2 dV. \quad (15)$$

Представим напряженность поля как сумму напряженностей внешнего и внутреннего (возникающего благодаря объемным зарядам) полей:

$$\bar{E}^2 = \bar{E}_e^2 + 2\bar{E}_e \bar{E}_i + \bar{E}_i^2. \quad (16)$$

Определим все три слагаемых уравнения (19).

$$\bar{E}_e^2 = \sigma \int E_e^2 dV = -\sigma \int \bar{E}_e \cdot \nabla \phi_e dV = -\sigma \oint \bar{E}_{es} \phi_{es} d\bar{S} = I_e \cdot U,$$

где  $I_e$  – сила тока, вызванная внешним электрическим полем, определяется по формуле:

$$I_e = \sigma E_{es} \cdot S. \quad (17)$$

Найдем второе слагаемое уравнения (19):

$$\bar{E}_e \bar{E}_i = \frac{1}{V} \int \bar{E}_e \bar{E}_i dV = -\frac{1}{V} \int \bar{E}_e \cdot \nabla \phi_e dV = -\frac{1}{V} \int \nabla (\bar{E}_e \phi_i) dV = 0.$$

Найти третье слагаемое уравнения (19) не представляется возможным, так как для этого необходимо знать распределение (или плотность) объемных зарядов. Используя уравнения (16) и (18 – 20), определим КПД преобразования энергии:

$$\eta = 1 - \frac{I_e}{I} - \sigma V \frac{\bar{E}_i^2}{UI}. \quad (18)$$

Движение в жидкостях под действием приложенного поля происходит вследствие возникновения электроконвективных явлений. Для этого необходимо наличие асимметрии в распределении электрических полей и полей физических параметров среды [3]. Такая асимметрия возникает благодаря заданным начальным и граничным условиям, которые определяются геометрическими электромеханическими параметрами устройства, в котором находится жидкость [1].

С целью определения оптимальных геометрических параметров ЕЭМПЭ был проведен эксперимент, в котором определялась зависимость характеристик электрического поля от расстояния между электродами (2 см и 5 см). В ходе эксперимента наблюдалось поднятие жидкости на определенную высоту (на электродах появился слой масла) как при постоянном приложенном напряжении, так и при переменном. Поэтому сначала была получена зависимость высоты поднятия жидкости от величины приложенного напряжения численным методом. Если предположить, что и жидкость и воздух (воздушный зазор между электродами и поверхностью жидкости) линейно поляризуются, то избыточное давление, создаваемое электрическим полем, компенсируется гидростатическим. Это выражается в поднятии жидкости на высоту

$$h = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1) E_0^2}{2g(\gamma_2 - \gamma_1)}, \quad (19)$$

где индекс 1 характеризует воздух, индекс 2 – жидкость. Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено на рис.2.

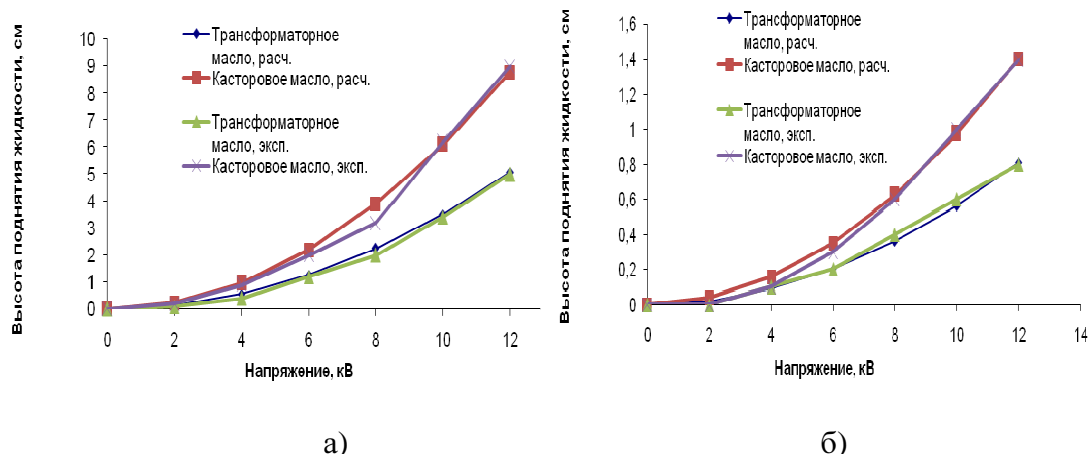


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений зависимости высоты поднятия жидкости от величины приложенного постоянного напряжения:

а) для расстояния между электродами 5 см;

б) для расстояния между электродами 2 см

По приведенному рисунку можно сделать следующие выводы: при расстояниях между электродами 2 см жидкость под действием электрического поля поднимается выше как в полярном касторовом масле, так и в неполярном трансформаторном масле, а, следовательно, электрическое поле при данном расстоянии сильнее и напряженность поля выше. Однако расстояние между электродами должно быть соизмеримо с их высотой [2].

### Заключение

Чтобы регулировать гидродинамическое преобразование в одной части электротехнического комплекса – жидкости, нужно правильно подобрать геометрические параметры другой составной части комплекса – емкостного электромеханического преобразователя. И с другой стороны, чтобы влиять на электромеханическое преобразование энергии в ЕЭМПЭ, необходимо знать характеристики и поведение в электрическом поле той или иной применяемой жидкости.

Способность регулировать и управлять движением жидкости под действием электрического поля приводит к возможности перемешивания жидкостей, а также к разделению нефтепродуктов на фракции [8]. Поэтому исследовать устройство, в котором реализуется направленное движение жидкости, – электротехнический комплекс с ЕЭМПЭ имеет практическое значение.

### Список литературы

1. Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. Электроконвекция и теплообмен. – Кишинев: Изд-во «ШТИИИЦА», 1977. – С. 89-104.

2. Волкова Т. А., Алетдинов Р. Ф., Папернюк В. А. Определение оптимальных геометрических параметров емкостного электромеханического преобразователя энергии с жидкостным ротором // Электротехнические комплексы и системы: межвузовский научный сборник. – 2012. – №1. – С. 193-197.
3. Гросу Ф. П. Термоэлектродоносительные явления и их прикладные аспекты: дисс... д-ра техн. наук. – Кишинев, 2008. – С. 198-210.
4. Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Фаттахов Р. К., Волкова Т. А. Емкостный двигатель-перемешиватель // Патент РФ № 2453978.2012. Бюл. №27.
5. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. – М.: Мир, 1978. – С.113-138.
6. Саранин В. А. Устойчивость, равновесие, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. – С. 174-182.
7. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – С.76-103.
8. Фаттахов Р. К., Исмагилов Ф. Р., Волкова Т. А. Электростатический преобразователь энергии в качестве перемешивателя диэлектрических жидкостей // Научный журнал «Вестник УГАТУ». – 2012. – Т. 16, №1 (46). – С. 150-156.

**Рецензенты:**

Гизатуллин Фарит Абдулганеевич, д.т.н., профессор кафедры электромеханики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Заико Александр Иванович, д.т.н., профессор кафедры теоретических основ электротехники ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.