

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Работа посвящена исследованию способа преобразования электрической энергии в механическую, который используют бактерии для перемещения в пространстве. Актуальность исследования обусловлена возможностью использовать природные принципы преобразования энергии для создания эффективного электропривода.

Введение. В течение последних 10 – 15 лет был раскрыт механизм, с помощью которого одноклеточные бактерии перемещаются в среде обитания [1, 2]. Оказалось, что перемещение осуществляется движителем, напоминающим винт или весло, который приводится во вращение электрическим двигателем. Двигатель создает момент $40 \text{ пН}\cdot\text{м} = 4 \cdot 10^{-20} \text{ Н}\cdot\text{м}$, частота вращения $\cong 10^2 \text{ с}^{-1}$, соответственно мощность – $4 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$. Объем двигателя имеет порядок 10^{-24} м^3 . Отсюда следует, что удельная (на единицу объема) мощность имеет порядок $1 \text{ МВт}/\text{м}^3$. Для сравнения удельная на единицу объема мощность современных электрических машин имеет порядок $10 \text{ кВт}/\text{м}^3$, т.е. в 100 раз меньше. Удельные на единицу массы мощности – $1 \text{ кВт}/\text{кг}$ двигателя бактерии и $1 \text{ Вт}/\text{кг}$ современной электрической машины, т.е. в 1000 раз меньше. КПД электродвигателя бактерии практически 100%.

Очевидны преимущества, которые даст привод с такими характеристиками для макрообъектов.

Постановка задач исследования. Принцип электромеханического преобразования энергии представлен на рис. 1.

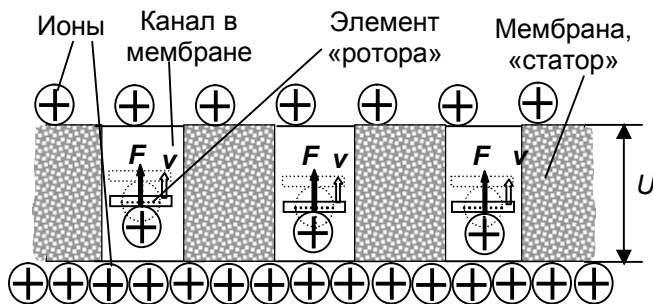


Рис. 1 – Схема преобразования энергии разности электрических потенциалов в механическую

«Биологический электропривод» содержит мембрану с каналами, диаметры которых равны или несколько больше диаметра иона. На внешней и внутренней (по отношению к клетке, которую охватывает мембрана) поверхностях мембраны сосредоточены ионы калия, натрия, водорода, хлора в разной концентрации, так что имеет место разность потенциалов U. Эта мембрана является «статором» привода. «Ротором» является белковая молекула, выступы которой расположены в каналах.

Под действием разности потенциалов ионы без трения перемещаются по каналам, взаимодействуя с выступами «ротора», т.е. дают

на него с силой F. Под действием этой силы выступ перемещается со скоростью v. Так происходит преобразование энергии электрического потенциала U в механическую энергию Fvt.

В молекуле – микробе с «ротором» связаны жгутики, выполняющие функции винта, с помощью которого микроб перемещается в жидкой среде. Посредством каналов, способных замыкать накоротко поверхности мембраны, организм микроба управляет разностью потенциалов и тем самым управляет его движением.

Обращают внимание две особенности описанного электромеханического преобразования: 1) оно происходит без участия магнитного поля (в отличие от подавляющего большинства «человеческих» электрических машин); 2) преобразование происходит без диссипации энергии – ионы движутся по каналам без трения и взаимодействуют только с элементами «ротора», – так что КПД преобразования практически 100%.

Ценность такого (с высоким КПД, без меди и стали) привода для макрообъектов несомненна, хотя в настоящее время отсутствуют идеи реализации указанных особенностей в макроскопических размерах. Тем не менее, представляется целесообразным анализ характеристик электропривода, устроенного на описанном принципе. Цель настоящей работы – оценить возможные характеристики биологического электропривода.

Материалы исследования. Характеристики определяются из следующих соображений.

Плотность мощности (вектор Пойнтинга, $\text{Вт}/\text{м}^2$) потока ионов

$$p = Uj \tag{1}$$

Здесь U – разность между потенциалами наружной и внутренней сторонами мембраны-статора, В;

j – плотность потока ионов, $\text{А}/\text{м}^2$.

$$j = \rho v_e \hat{a}, \tag{2}$$

где ρ – плотность ионов, $1/\text{м}^3$. $v_{и}$ – скорость перемещения иона до контакта с «ротором», м/с; e – заряд иона, А·с.

Плотность потока ионов, которые перемещают «ротор», пропорциональна скорости «ротора»:

$$j_p = j \frac{v_p}{v_{и}}, \tag{3}$$

где v_p – скорость перемещения «ротора», м/с.

Из (1) и (3) следует, что мощность привода, Вт/м²,

$$p_p = Uj_p = Uj \frac{v_p}{v_{и}}. \quad (4)$$

Плотность тока на расстояниях, не больших длины свободного пробега зарядов, определяется законом Ленгмюра [3, с.422]:

$$j = \frac{4\sqrt{2e\epsilon_0}}{9} \cdot \frac{U^{1,5}}{l^2 \sqrt{m}}, \quad (5)$$

где e – заряд иона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, А·с; ϵ_0 – электрическая постоянная, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; l – расстояние между поверхностями с разностью потенциалов U . У бактерий порядок этой величины 10^{-8} м; m – масса иона: протона (атома водорода, H⁺) – $1,67 \cdot 10^{-24}$ г, натрия Na⁺ – $38,2 \cdot 10^{-24}$ г, калия K⁺ – $64,9 \cdot 10^{-24}$ г.

После подстановки значений постоянных величин (ϵ_0 , e , $m_{пр}$)

$$j \approx 1,7 \cdot 10^{-9} \frac{U^{1,5}}{l^2} \sqrt{\frac{m_{иД}}{m_{и}}}, \quad (6)$$

где $m_{и}$ – масса иона, $m_{пр}$ – масса протона.

Тогда удельная (на единицу площади) мощность биологического электропривода

$$p_p = Uj_p = 1,7 \cdot 10^{-9} \frac{U^{2,5}}{l^2} \sqrt{\frac{m_{пр}}{m_{и}}} \frac{v_p}{v_{и}}. \quad (7)$$

Внешние характеристики (зависимость скорости от давления)

$$v_p = \frac{p_p}{f} = 1,7 \cdot 10^{-9} \frac{U^{2,5}}{f^2} \sqrt{\frac{m_{пр}}{m_{и}}}. \quad (8)$$

где f – сила, с которой ионы давят на «ротор», Н/м².

На рис. 2 и 3 представлены зависимости скорости двигателя от нагрузки и от разности потенциалов.

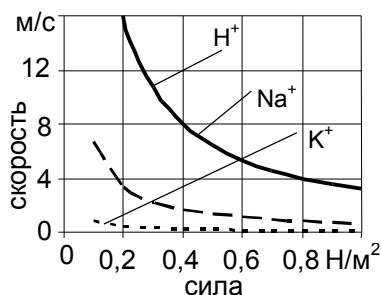


Рис. 2. Механические характеристики биологического электропривода с ионами H⁺, Na⁺, K⁺

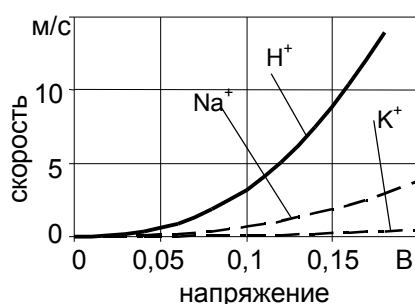


Рис. 3. Зависимость скорости от напряжения биологического электропривода

Из графиков рис. 2 видно, что двигатель имеет мягкие внешние характеристики. Это объясняется тем, что электрическая энергия U постоянна, так что при увеличении силы должна уменьшаться скорость. В зависимости от вида ионов скорость тем больше, чем ионы легче: наибольшая скорость привода получается при самых легких ионах – водорода. (Возможно, этим объясняется то, что привод бактерий работает именно на протонах).

Зависимости скорости привода от напряжения (рис. 3) различны для ионов

разной массы: крутизна характеристики тем больше, чем легче ионы: при изменении напряжения наибольшее изменение скорости имеет место для ионов водорода.

Выводы.

Биологический электропривод преобразовывает энергию электрического поля в механическую энергию движения положительно заряженных ионов и связанного с ионами исполнительного органа. Энергетическая эффективность преобразования выше на несколько порядков, чем известных электрических машин.

Механические характеристики привода зависят от массы ионов, которые приводят в движение рабочий орган: у двигателя на ионах водорода характеристики мягкие, как у электродвигателя последовательного возбуждения, при ионах калия они такие же, как асинхронной машины или двигателя параллельного возбуждения.

Также различны зависимости скорости от напряжения: при ионах водорода скорость существенно изменяется при изменении напряжения, при ионах калия изменяется незначительно.

Высокие энергетические параметры биологического электропривода имеют место, когда его размеры соизмеримы с длиной свободного пробега ионов – порядка 10^{-7} – 10^{-8} м. Для использования такого привода необходимо либо преобразовать макротехнологии в микро (такие технологии известны, например, для обработки руды), либо создать конструкции, способные решать задачи макротехнологии микроприводом.

Литература.

1. Скулачев В.П. Электродвигатель бактерий // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. N 9. С. 2-7.
2. Тихонов А.Н. Молекулярные преобразователи энергии в живой клетке // Там же. 1997. N 7. С. 10-17.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: «Наука».- 1968.-940 с.