

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.П. Брусенцов

Российский федеральный ядерный центр —
ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск

Приводятся некоторые основные сведения об электрических характеристиках ТЭ и их графическая интерпретация. Даны практические рекомендации определения, расчета и анализа электрических свойств топливных элементов.

На различных этапах технологической обработки материалов и конструкции ТЭ возникают вопросы изготовления и проведения экспресс-исследований основных его электрических характеристик [1]. При этом ТЭ может представлять собой достаточно простую конструкцию, позволяющую подавать реагенты и снимать электрические характеристики. Соответственно и методы исследования должны быть простыми, но в то же время достаточно информативными. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть некоторые понятия и приемы анализа электрических характеристик ТЭ, позволяющие при минимальных затратах получить максимально возможную информацию.

В статье использована несколько упрощенная интерпретация электрических характеристик, что вызвано желанием помочь разобраться в вопросах электроэнергетики ТОТЭ более широкому кругу специалистов, работающих в области ТОТЭ и генераторов на их основе.

Основными электрическими характеристиками топливного элемента являются:

- электродвижущая сила E ;
- внутреннее электрическое сопротивление r ;
- электрическая мощность P ;
- электрический коэффициент полезного действия η .

ЭДС представляет собой отношение полной работы, совершаемой источником тока при перемещении единичного заряда по замкнутой электрической цепи, к величине этого заряда. В качестве движущей силы перемещения заряда в ТЭ служит сила в виде постоянного потенциала, образующегося при химических реакциях взаимодействия топлива и окислителя. Таким образом, химическая реакция окисления топлива непосредственно преобразуется в электрическую энергию. В работающем элементе ЭДС распределяется по длине элемента и зависит от содержания топлива в анодном газе на входе и выходе. Поэтому с известной долей условности можно говорить о среднем значении ЭДС элемента. При постоянном расходе топлива средняя ЭДС изменяется и с изменением мощности элемента. Однако если коэффициент использования топлива не изме-

няется при работе элемента, то не изменяется и средняя ЭДС (далее в тексте ЭДС) элемента [2]. В дальнейшем считается, что рассуждения относятся к элементу, работающему с постоянным коэффициентом использования топлива в изотермических условиях.

Замкнутой электрической цепью следует считать цепь, состоящую из источника тока со своим внутренним электрическим сопротивлением r , под которым понимается сумма его омических сопротивлений (электролита, электродов и т. п.) и сопротивлений, эквивалентных его поляризационным потерям, и нагрузки в виде внешнего электрического сопротивления R . ЭДС источника E будет распределяться на падение напряжения на внутреннем сопротивлении элемента и на падение напряжения на внешнем сопротивлении (на нагрузке) пропорционально их величинам. Падение напряжения на внешнем сопротивлении равно напряжению на зажимах источника U . При разомкнутой внешней цепи это напряжение называется напряжением разомкнутой цепи, которое по величине достаточно близко к величине ЭДС.

В связи с тем, что ЭДС по определению представляет собой полную работу, совершаемую источником тока по перемещению в цепи единичного заряда, отнесенную к величине этого заряда, а в цепи в единицу времени проходит заряд, численно равный току I , то полная электрическая мощность источника будет равна

$$P_{\text{полн}} = EI.$$

Эта мощность выделяется на сопротивлении нагрузки и на внутреннем сопротивлении элемента следующим образом.

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении нагрузки (полезная мощность цепи) будет равна

$$P_{\text{нагр}} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R.$$

Электрическая мощность, рассеиваемая на внутреннем сопротивлении элемента (мощность потерь в цепи) будет равна

$$P_{\text{потерь}} = (E - U)I = \frac{(E - U)^2}{r} = I^2 r.$$

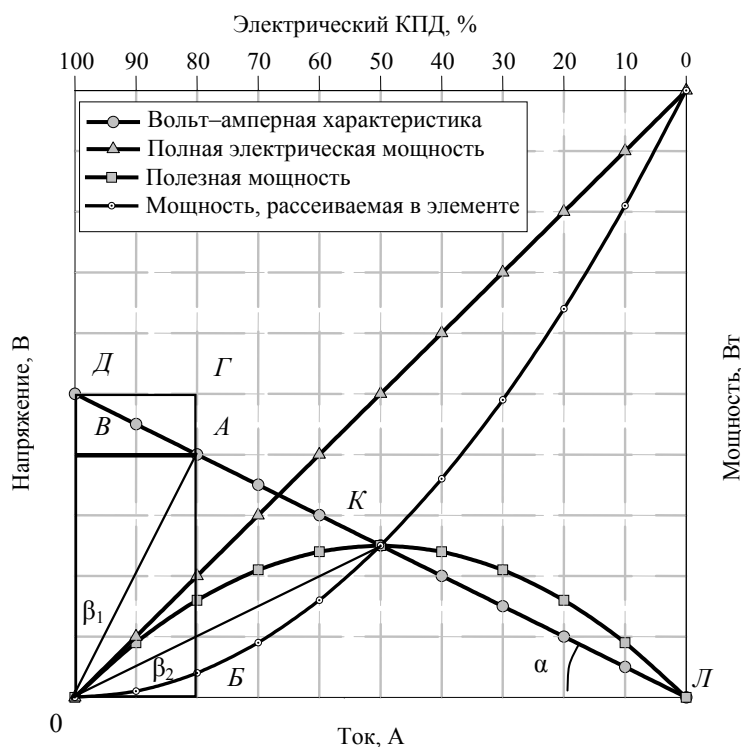
В вышеописанной интерпретации мощностей электрический КПД системы, очевидно, будет равен

$$\eta = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{E} = \frac{R}{R + r}. \quad (1)$$

Отношение U/E обычно называется КПД по напряжению.

Наибольшую информацию о топливном элементе и наглядность ее восприятия заключает в себе его вольт–амперная характеристика (ВАХ). Она представляет собой графическую зависимость напряжения топливного элемента от тока в нагрузке. В большинстве случаев ВАХ ТОГЭ представляет собой прямую линию, либо

поддается линеаризации (см. статьи на стр. 184, 347 и 352 настоящего сборника). Во всяком случае, для практических целей и целей описываемого анализа ее можно рассматривать как прямую линию (рисунок).



Электрические характеристики топливного элемента

Такое допущение позволяет не снимать полностью ВАХ во всем диапазоне, а использовать приемы интерполяции и экстраполяции. Строго говоря, начальный и конечный участки ВАХ имеют отклонения от прямой соответственно вверх и вниз (это обусловлено электрохимической поляризацией для начального участка ВАХ и диффузионной или химической поляризацией электродов для конечного участка) [3]. Эти отклонения в большинстве случаев незначительны и практически не выходят за пределы 10—15 % начала и конца участка кривой ВАХ, а в ряде случаев они вообще не наблюдаются. В большей степени интересен средний участок ВАХ. При этом с некоторым приближением можно считать, что точка *D* пересечения линии ВАХ с осью напряжения характеризует ЭДС элемента, а точка *L* пересечения линии ВАХ с осью тока характеризует ток короткого замыкания элемента.

Вольт-амперная характеристика может быть описана уравнением прямой линии с угловым коэффициентом:

$$y = -kx + b, (U = -Ir + E), \quad (2)$$

где y и x — координаты напряжения и тока; k — угловой коэффициент, равный тангенсу α — угла наклона линии ВАХ к оси тока; b — величина отрезка, который отсекает линия ВАХ на оси напряжения, в нашем случае b равно E элемента.

Уравнение прямой ВАХ может быть получено и по измерениям двух точек зависимости напряжения от тока $U_1(x_1, y_1)$ и $U_2(x_2, y_2)$, где x и y соответствующие координаты этих точек.

При этом

$$k = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (3)$$

Приведенные рассуждения показывают, что получить ВАХ элемента можно, не прибегая к пошаговому его нагружению, а построить ее всего лишь по двум измерениям, что в ряде случаев может значительно сократить и время эксперимента, и ресурс элемента, и аппаратное обеспечение.

Предлагается некоторый анализ и сопоставление математической и графической аналогии вольт–амперной характеристики топливного элемента и ее производных (электрических сопротивлений, мощностей, КПД).

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ

Известно, что отношение ЭДС элемента к току короткого замыкания определяет его внутреннее сопротивление [1]. Из рисунка видно, что это отношение является тангенсом угла наклона линии ВАХ к оси тока:

$$r = \operatorname{tg} \alpha. \quad (4)$$

Некоторая произвольная точка, например, точка A на линии ВАХ, отражающая определенный режим работы топливного элемента, соединяется с точкой пересечения осей напряжения и тока O . Величина сопротивления нагрузки (внешнего сопротивления), характеризующего эту точку ВАХ равна отношению напряжения в этой точке к току или из треугольника AOB она равна $\operatorname{tg} \beta_1$. Таким образом, величина сопротивления, подключенного к топливному элементу, в некоторой точке ВАХ характеризуется тангенсом угла наклона линии, проведенной из этой точки до точки пересечения осей напряжения и тока, к оси тока, то есть

$$R = \operatorname{tg} \beta_1 \text{ или, в общем случае, } R = \operatorname{tg} \beta.$$

Из сказанного выше можно также сделать вывод, что работа топливного элемента в режиме максимальной мощности на нагрузке будет осуществляться в точке K , которая делает "треугольник сопротивлений" равнобедренным, так как в этой точке сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению топливного элемента ($\operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{tg} \alpha$). В точке K значения напряжения и тока приблизительно равны половине своих возможных максимальных величин.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ СИСТЕМЫ

Мощность, выделяемая на нагрузке при работе в точке A ВАХ, равна произведению напряжения на ток в этой точке, что численно соответствует площади прямоугольника $ABOV$. Далее, построив прямоугольник по высоте до величины равной E топливного элемента, можно получить прямоугольник $ГБOD$ с площадью, численно равной полной электрической мощности элемента в этом режиме работы. Таким образом, полезная мощность для любой точки кривой ВАХ численно равна площади прямоугольника, образованного отрезками, отсекаемыми проекциями данной точки на осях напряжения и тока. А полная электрическая мощность для любой точки кривой ВАХ будет равна площади прямоугольника, образованного сторонами, численно равными напряжению и току в этой точке. Рассчитав мощности (площади прямоугольников подобных прямоугольнику $ABOV$) для серии точек ВАХ можно получить в координатах "мощность — ток" кривую зависимости полезной мощности от величины тока (см. рисунок, кривая "Полезная мощность"). Эту зависимость иногда называют ватт-амперной характеристикой.

Очевидно, что для величин напряжения и тока, равных нулю, величина полезной мощности будет иметь нулевое значение. И также очевидно, что по мере роста тока полезная мощность будет увеличиваться до своей максимальной величины в точке K (здесь величина площади прямоугольника аналогичного $ABOV$ будет максимальной), а затем, зеркально левой части кривой, будет уменьшаться до нулевого значения. Следует иметь ввиду, что значение максимальной мощности, отдаваемой элементом в нагрузку, является одной из важнейших энергетических характеристик топливного элемента. А также — что одну и ту же мощность элемента можно получить как на восходящей части кривой полезной мощности, так и на нисходящей. При этом рассеиваемая электрическая мощность на внутреннем сопротивлении элемента для этих двух случаев будет резко отличаться.

Аналогично может быть рассчитана и представлена графически зависимость полной электрической мощности элемента от тока. Ее величина для любой точки кривой ВАХ будет равна произведению ЭДС элемента на соответствующее значение тока, вплоть до величины тока короткого замыкания. Графически полная электрическая мощность имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат напряжения и тока до точки, равной произведению E на ток короткого замыкания, расположенной на оси мощности (см. рисунок, прямая "Полная мощность").

В точке K полная электрическая мощность элемента будет равна двойному значению его максимальной электрической мощности на нагрузке, а в точке короткого замыкания — четырехкратному. В связи с этим, работа в режиме короткого замыкания может привести к нежелательным последствиям: перегреву элемента перегоранию электродов и подгоранию электродных покрытий, а для резких замыканий — к большим динамическим нагрузкам.

На основании приведенного рисунка легко представить, что максимальная полезная мощность ТЭ, численно равна половине площади треугольника образованного пересечением линии ВАХ с осями напряжения и тока (ΔDOL). В свою очередь, используя уравнение (2), можно определить недостающую координату вершины этого треугольника L , равную OD/k . Применение приемов аналитической геометрии позволяет найти, что максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку (полезная мощность), равна

$$P_{\text{нагр. макс.}} = \frac{E^2}{4k} = \frac{E^2}{4r},$$

где k и r могут быть получены из равенств (3) и (4). Таким образом, максимальная мощность на нагрузке может быть определена по измерениям ЭДС элемента и значений напряжения и тока при произвольной нагрузке.

На рисунке приведена также кривая электрической мощности, рассеиваемой в элементе. Она получена вычитанием из полной мощности элемента полезной мощности на нагрузке. Здесь следует обратить внимание на прогрессирующее возрастание потерь в элементе по мере увеличения значения снимаемой полезной мощности и более резкое возрастание потерь после перехода максимального значения полезной мощности.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ

При рассмотрении электрического коэффициента полезного действия системы элемент — нагрузка, следует иметь в виду, что общий КПД топливного элемента и генератора на его основе из-за тепловых потерь будет всегда ниже его электрического КПД. Такое утверждение справедливо, если в системе отсутствуют дополнительные преобразования тепловой энергии в электрическую, например, с помощью дополнительной системы: тепловой турбины-генератора и если не используется тепловая энергия как продукт системы. В такой интерпретации рассматриваемый электрический КПД системы будет равен отношению электрической мощности, выделяемой на нагрузке (внешнем сопротивлении), к полной электрической мощности элемента. Таким образом, электрический КПД в системе для точки A (см. рисунок) будет равен отношению площади прямоугольника $ABOV$ к площади прямоугольника $ГБOD$, а так как основания прямоугольников равны, то КПД будет равен отношению AB к DO , или отношению напряжения для данной точки к ЭДС элемента. Аналогичны рассуждения и для других точек кривой ВАХ (см. рисунок, шкала "Электрический КПД" и соотношение (1)).

Следует иметь в виду, что электрический КПД в режиме максимальной мощности на нагрузке будет равен 50 %. А общий КПД, как отмечено выше, будет меньше его электрического КПД. Естественно, эксплуатация элемента в таком режиме может оказаться нерентабельной. Особенностью топливного элемента как источника электроэнергии является то, что с уменьшением нагрузки на элемент,

электрический КПД его растёт. И, как видно из рисунка, экономичная работа топливного элемента будет реализовываться только на левой части кривой зависимости мощности от тока.

Таким образом, основные электрические характеристики ТЭ, ответственные за его работоспособность, могут быть интерпретированы графически, что в ряде случаев даёт более наглядные представления о характеристиках, динамике их изменения, оптимальных и экстремальных соотношениях.

ССЫЛКИ

1. Общая электротехника / Под ред. А.Т. Блажкина. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 592 с.
2. Timofeeva N., Demin A. Modelling of SDFC Operation in Variable Regime // Proc. First European Solid Oxide Fuel Cell Forum. — 3—7 October 1994. — Lucerne, Switzerland / Ed. by Ulf Bossel. — Vol. 1. — P. 277—286.
3. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 264 с.