

УДК 629.12.066(076)

С.Г. РЯБОВ, С.А. РОЖКОВ, К.В.ТИМОФЕЕВ
Херсонская государственная морская академия**ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА
В СИСТЕМЕ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СУДНА**

В статье рассматривается импульсный режим работы электролизёра и топливных водородных ячеек типа PEM. Рассмотрена обобщенная модель топливного элемента PEM, работающая на водороде и воздухе, которая может быть использована для моделирования систем топливных элементов в судовой системе резервного электропитания. Модель топливного элемента сочетает в себе электрические и химические особенности моделей топливных элементов и применяется в интегрированной библиотеке Sim Power Systems (Simulink-Matlab) как модель штатного водородного топливного элемента. В работе обосновывается наиболее эффективный режим электролиза водорода с использованием импульсного источника питания. Оценка эффективности электролиза основана на утверждении об экспоненциальной зависимости тока от времени, где показано, что импульсный режим работы электролизёра значительно уменьшает затраты электроэнергии на получение необходимого количества водорода для судовой системы резервного электропитания. Показано, что для повышения эффективности процесса необходимо иметь близкие время заряда и постоянную времени заряда, а также должны быть созданы условия для максимального значения постоянной времени разряда. При этом в системах с релаксацией во внешней среде возможно повышение эффективности процесса.

Ключевые слова: топливный элемент, моделирование, импульсный режим работы, электролиз, постоянная времени.

С.Г. РЯБОВ, С.О. РОЖКОВ, К.В.ТИМОФЕЕВ
Херсонська державна морська академія**ІМПУЛЬСНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА
В СИСТЕМІ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СУДНА**

У статті розглядається імпульсний режим роботи електролізера і паливних водневих осередків типу PEM. Розглянуто узагальнена модель паливного елемента PEM, що працює на водні та повітрі, яка може бути використана для моделювання систем паливних елементів в судновій системі резервного електроживлення. Модель паливного елемента поєднує в собі електричні та хімічні особливості моделей паливних елементів і застосовується в інтегрованій бібліотеці Sim Power Systems (Simulink-Matlab) як модель штатного водневого паливного елемента. У роботі обґрунтовується найбільш ефективний режим електролізу водню з використанням імпульсного джерела живлення. Оцінка ефективності електролізу заснована на твердженні про експоненційної залежності струму від часу, де показано, що імпульсний режим роботи електролізера значно зменшує витрати електроенергії на отримання необхідної кількості водню для суднової системи резервного електроживлення. Показано, що для підвищення ефективності процесу необхідно мати близький час заряду і постійну часу заряду, а також повинні бути створені умови для максимального значення постійної часу розряду. При цьому в системах з релаксацією в зовнішньому середовищі можливе підвищення ефективності процесу.

Ключові слова: паливний елемент, моделювання, імпульсний режим роботи, електроліз, постійна часу.

S.G.RABOV, S.O.ROZHKOVA, K.V. TYMOFEIEV
Kherson State Maritime Academy**IMPULSE MODE OF OPERATION OF ELECTROLYSER
IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE SHIP**

The use of fuel cells on sea vessels is also a promising area. However, one of the main problems of using hydrogen as an energy carrier is its production and storage. The article deals with the impulse mode of operation of electrolyzer and fuel hydrogen cells of PEM type. The paper substantiates the most effective mode of electrolysis of hydrogen using a pulsed power source. The evaluation of the efficiency of electrolysis is based on the statement about the exponential dependence of the current on time, where it is shown that the impulse mode of operation of the electrolyzer significantly reduces the energy costs for obtaining the required amount of hydrogen for the ship backup power system. It is shown that to increase the efficiency of the process it is necessary to have a close charge time and a charge time constant, and conditions must be created for the maximum value of the discharge time

constant. In systems with relaxation in the external environment, it is possible to increase the efficiency of the process. However, in actual tasks, the conditions may differ significantly from those indicated above, and fuel cells can not use all of the fuel. Approximately 15 to 20% of the fuel (hydrogen) remains at the output of the anode, which can be reused.

The paper presents a simplified model of the fuel cell PEM, which is a battery of fuel cells operating at nominal conditions of temperature and pressure. A detailed description of the PEM model is a set of fuel cells taking into account the changing parameters: pressure, temperature, composition and flow rate of fuel and air.

A generalized model of a PEM fuel cell operating on hydrogen and air is considered, which can be used to simulate fuel cell systems in a ship backup power system. The fuel cell model combines the electrical and chemical features of the fuel cell models and is used in the Sim Power Systems (Simulink-Matlab) integrated library as a model of the hydrogen fuel cell. The relative simplicity of the design makes fuel cells competitive enough in the market for alternative sources of electricity.

Keywords: fuel cell, modeling, pulse mode of operation, electrolysis, time constant.

Постановка проблемы

Применение технологий топливных элементов на морском транспорте до недавнего времени было достаточно ограничено. Исключением составляла технология Air Independent Propulsion (AIP) для подводных аппаратов и автономных транспортных средств. Например, для автономных подводных аппаратов Hugin-AUV (Kongsberg Gruppen, KONGSBERG) используют алюминий-кислородные полутопливные элементы, однако при этом электролит и аноды топливных ячеек требуют достаточно частой замены [8, 11]. В отличие от обычной батареи, в которой реагенты, потребляемые в процессе преобразования энергии, находятся внутри, реагенты, потребляемые топливным элементом (ТЭ), находятся снаружи и подаются в топливный элемент аналогично традиционному дизельному двигателю. В топливный элемент непосредственно подается газ (водород, метан и т.д.) и воздух, а не кислород, за исключением топливных ячеек, которые используют в космической технике (на подводных лодках), где воздух заменяют кислородом. При этом следует учитывать, что использование воздуха с нормальным содержанием кислорода (21%) снижает эффективность топливного элемента.

Анализ последних исследований и публикаций

В более поздних проектах топливных элементов в качестве топлива вместо водорода использовались расплавленные карбонатные топливные элементы для применения на водной основе (англ. Molten-carbonate fuel Cells for Waterborne Application, MC-WAP). Целью таких исследований было изучение применения технологии топливных элементов с расплавом карбоната на борту крупных судов, таких как Ro/Pax, Ro/Ro и круизные суда. Проект включал проектирование, строительство, монтаж на борту и тестирование вспомогательного силового агрегата мощностью 500 кВт, работающего от высокотемпературного топливного элемента MCFC (англ. Molten Carbonate Fuel Cell) и подпитываемого дизельным топливом. Для использования на морских судах в проекте METHAPU исследовалась легализация возобновляемых вспомогательных энергетических систем на основе метанола для коммерческих судов. Был разработан метанол-воздушный твердоокисный элемент (ТЭ) SOFC (англ. solid oxide fuel cell). Прототип ТЭ мощностью 20 кВт был изготовлен фирмой Wärtsilä и был установлен на борту шведского судна Undine типа RO/RO как дополнительный источник питания для судовой электроэнергетической установки (СЭЭУ). Однако следует учитывать, что по сравнению с обычными видами топлива, метанол требует ряда дополнительных мер предосторожности. При этом на судах его можно безопасно использовать без значительных отклонений от эксплуатационных процедур или конструктивных методов и он не будет представлять большого риска для судна, его экипажа или окружающей среды. На рис.1 показана однолинейная судовая гибридная энергетическая система с использованием топливных ячеек [7].

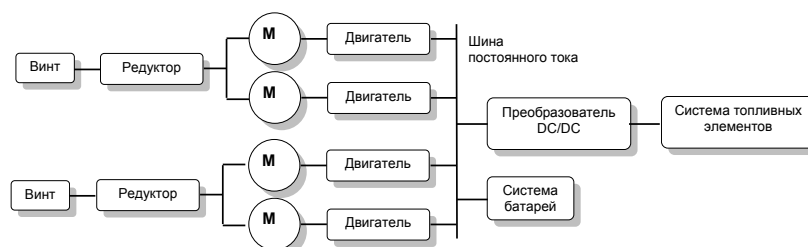


Рис. 1. Однолинейная гибридная энергетическая система с использованием топливных ячеек

На рис. 2 показаны схема модели топливного элемента (а) и теоретически возможный максимальный КПД двигателя внутреннего сгорания и топливного элемента (б).

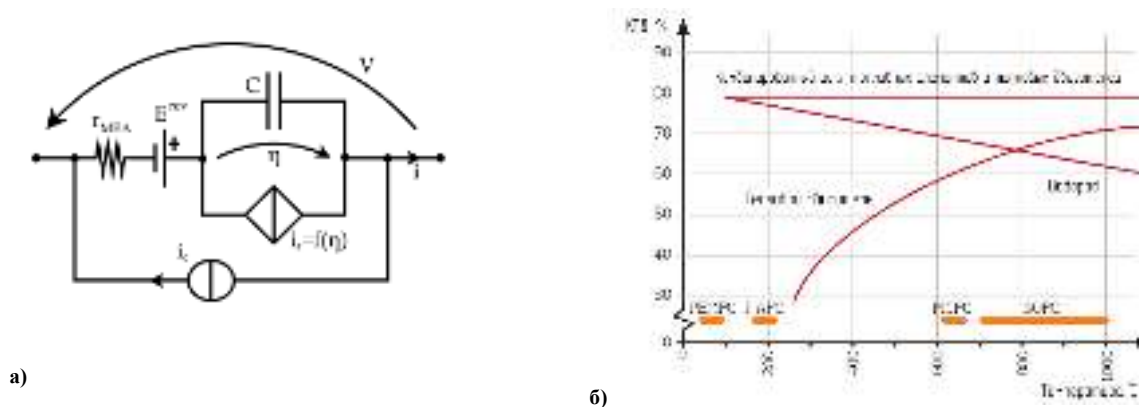


Рис. 2. Схема модели топливного элемента а) и теоретический максимальный КПД двигателя внутреннего сгорания и топливного элемента б)

Фирмой Siemens для немецкого военно-морского флота разработан топливный элемент PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) мощностью 120 кВт, что позволяет комбинировать несколько модулей в энергетической системе. Система удовлетворяет требованиям нагрузки АР с большей эффективностью, чем у обычных двигателей внутреннего сгорания. Финансируемый Германией проект PaFCXcell исследует интеграцию небольших топливных элементов PEM во вспомогательную энергетическую сеть круизных судов. Фирма FellowSHIP является разработчиком совместного проекта исследований и разработок, целью которых является разработка гибридных блоков топливных элементов для применения на флоте. Партнерами проекта являются два основных производителя морских дизелей Wärtsilä и MTU, а также DNV GL Group [24].

В проекте FellowSHIP успешно использованы топливные элементы на основе расплавленного карбоната (Molten-carbonate fuel cells, MCFCs) мощностью 330 кВт, работающего на сжиженном природном газе (СПГ), например, на судне Viking Lady норвежской судоходной компании Eidesvik с гибридным двигателем. Топливные элементы MCFC эксплуатировались в составе четырех генераторных установок, которые работали на дизельном топливе и на сжиженном природном газе LNG (англ. liquefied natural gas, преимущественно метан, CH₄). Топливные элементы MCFC успешно показали бесперебойную работу на судне в течение более 7000 часов, и они могут быть адаптированы для стабильной и высокоэффективной работы с низким уровнем вредных выбросов. При этом, когда учитывалось внутреннее потребление, электрическая эффективность оценивалась в 44,5% без обнаружения NO_x, SO_x. При включении рекуперации тепла, общий топливный эффект был увеличен до 55% и оставался еще потенциал для дальнейшего повышения производительности.

Цель исследования

Целью статьи является исследование работы электролизёра в судовой системе резервного электропитания в импульсном режиме с топливными элементами типа PEM.

Изложение основного материала исследования

Существует три класса моделей PEMFC: эмпирические, полуэмпирические или теоретические модели. Эмпирические модели построены на основе экспериментальных данных для разработки соотношения между входами и выходами топливных элементов. Они просты и не требуют значительного вычислительного времени. Однако такие модели не могут достаточно хорошо представлять характеристики топливных элементов и явлений. С другой стороны, теоретическая или механистическая модели разработаны на основе электрохимии топливных элементов и физики, поэтому они обеспечивают детальное понимание устройства топливных элементов, но требуют значительного вычислительного времени. Полуэмпирические модели топливных элементов содержат более подробное описание, чем эмпирические модели, при этом они требуют меньшего вычислительного времени, чем механистические модели [11, 16].

При рассмотрении вопроса об окислительно-восстановительных реакциях возникает необходимость расчета электродвижущей силы (ЭДС) и потенциалов отдельных реакций, обусловленных уравнением Нернста:

$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}}, \quad (1)$$

где: E – реальный потенциал; E^0 – стандартный потенциал; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; F – постоянная Фарадея; z – число электронов, участвующих в процессе; a_{ox} – активность окисленной формы; a_{red} – активность восстановленной формы.

Однако, в реальных задачах условия могут значительно отличаться от указанных выше, и топливные элементы не могут использовать все топливо. Примерно от 15 до 20% топлива (водорода) остается на выходе анода, который можно использовать повторно.

Работающая на водороде и воздухе обобщенная модель топливного элемента PEM предложена в [16]. Она сочетает в себе электрические и химические особенности моделей топливных элементов, что позволяет использовать ее для моделирования систем топливных элементов. Модель используется в интегрированной библиотеке Sim Power Systems (Simulink-Matlab) как модель штатного водородного топливного элемента. Пользователь может устанавливать параметры блока топливных элементов из данных, предоставляемых производителем, или выбрать топливный элемент из 4-х моделей топливных элементов. Блок топливных элементов проверен с учетом спецификации Net Stack PS6 к топливным элементам [19]. Эквивалентная схема модели топливного элемента показана на рис. 3.

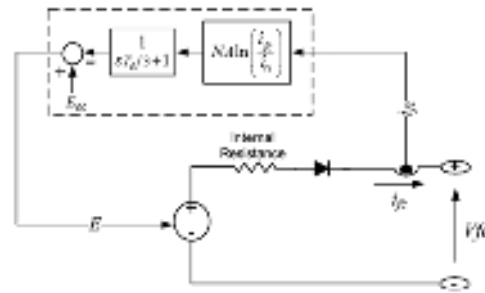


Рис.3. Упрощенная модель элементов топливных элементов

Упрощенная модель представляет собой батарею топливных элементов, работающую при номинальных условиях температуры и давления. Параметры эквивалентной схемы могут быть изменены на основе поляризационной кривой, полученной по таблице изготовителя, где нужно ввести значение напряжения на 0 и 1, номинальную и максимальную рабочие точки, для параметров, которые будут вычислять. Диод в схеме модели используется для предотвращения отрицательного тока в наборе пластин. Данная модель топливного элемента позволяет прогнозировать характеристики с точностью до 1%. Для расчета эквивалентной схемы используют выражения (2) и (3) [7, 20].

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (2)$$

$$E = E_{OC} - N \cdot A \cdot \ln\left(\frac{i_{fc}}{i_0}\right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{T_d s}{3}\right) + 1} \quad (3)$$

где V_{fc} – напряжение топливного элемента рассчитывается как функция напряжения разомкнутой цепи E , E_{OC} – напряжение холостого хода, внутреннее сопротивление R_{ohm} и ток топливного элемента i_{fc} с использованием уравнения 2 и E , рассчитанное с использованием уравнения (3).

Известно, что для устойчивого состояния в переходных процессах следует учитывать время отклика топливного элемента T_d при значительных изменениях тока топливного элемента (рис. 3). Время отклика топливного элемента зависит от типа топливных элементов и его значение обычно предоставляется заводом-изготовителем.

Потребление водорода PEMFC в граммах можно рассчитать, используя выражение (4) количества ячеек топливных элементов N , тока топливных элементов i_{fc} и константу Фарадея F .

$$H_{2cons} = \frac{N}{F} \int i_{fc} dt \quad (4)$$

Затем расход водорода используется для расчета необходимого количества водорода и энергии в PEMFC:

$$E_{fc} = H_{2Cons} \cdot HHV_{H2} \cdot \quad (5)$$

Подробное описание модели РЕМ представляет собой набор топливных элементов с учетом изменяющихся параметров: давления, температуры, состава и скорости потока топлива и воздуха. В диалоговом меню модели можно выбрать параметры, которые будут изменяться. Эти изменения влияют на напряжение разомкнутой цепи E_{OC} , ток обмена i_0 и наклон A . E_{OC} , i_0 и A изменяются следующим образом:

$$E_{oc} = K_c E_n, \quad (6)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}}, \quad (7)$$

$$A = \frac{RT}{zaF}, \quad (8)$$

где: $R = 8,3145$ Дж / (моль К); $F = 96485$ Ас/моль; z – число движущихся электронов; E_n – напряжение Нернста, которое является термодинамическим напряжением ячеек и зависит от температур и парциальных давлений реагентов и продуктов внутри набора (V); a – коэффициент передачи заряда, который зависит от типа используемых электродов и катализаторов; P_{H_2} – частичное давление водорода внутри набора (атм.); P_{O_2} – частичное давление кислорода внутри набора (атм.); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К – постоянная Больцмана; $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js – постоянная Планка; ΔG – размер активационного барьера, который зависит от типа используемого электрода и катализатора; T – температура работы (К); K_C – постоянная напряжения при номинальном состоянии работы.

Эквивалентная схема такая же, как и для упрощенной модели (рис. 4), за исключением того, что параметры E_{OC} , i_0 и A должны обновляться в режиме реального времени.

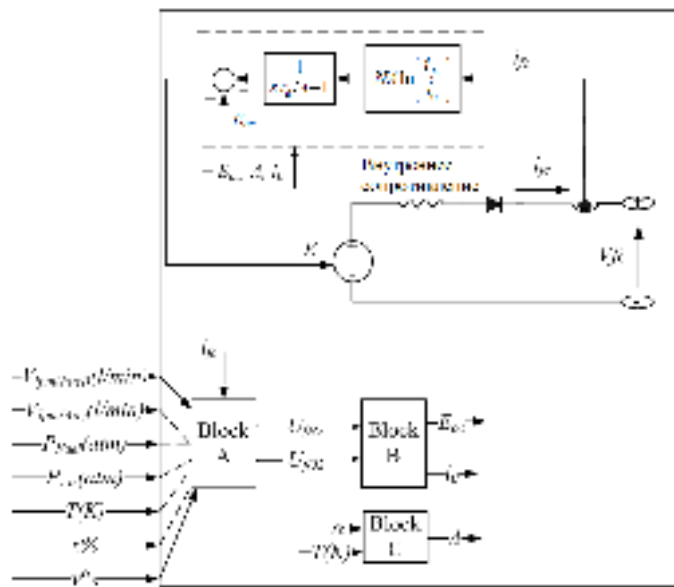


Рис. 4. Эквивалентная схема расширенной модели РЕМ элемента

Скорости конверсии (использования) водорода $U_{f_{H_2}}$ и кислорода $U_{f_{O_2}}$ определяются в блоке А следующим образом:

$$\begin{cases} U_{fH_2} = \frac{n_{H_2}^r}{n_{H_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{lpm(топливо)}x\%}, \\ U_{fO_2} = \frac{n_{O_2}^r}{n_{O_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}V_{lpm(воздух)}y\%}, \end{cases} \quad (9)$$

где P_{fuel} – абсолютное давление подачи топлива (атм); P_{air} – абсолютное давление подачи воздуха (атм); $V_{lpm(топливо)}$ – расход топлива (л/мин); $V_{lpm(воздух)}$ – расход воздуха (л/мин); x – процент водорода в топливе (%); y – процент кислорода в окислителе (%); N – количество ячеек.

Парциальные давления и напряжение Нернста определяют в блоке В (рис. 4) следующим образом:

$$\begin{cases} P_{H_2} = (1 - U_{fH_2})x\%P_{топливо}, \\ P_{H_2O} = (w + 2y\%U_{fO_2})P_{воздух}, \\ P_{O_2} = (1 - U_{fO_2})y\%P_{воздух}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 1,229 + (T - 298) \frac{-44,43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) \text{ когда } T \leq 100^\circ C, \\ 1,229 + (T - 298) \frac{-44,43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \text{ когда } T > 100^\circ C, \end{cases} \quad (11)$$

где P_{H_2O} – частичное давление водяного пара в наборе (атм); w – процент водяного пара в окислителе (%).

Из парциальных давлений газов и напряжения Нернста могут быть рассчитаны новые значения напряжения разомкнутой цепи E_{OC} и обменного тока i_0 . В блоке С вычисляют новое значение наклона характеристики. Параметры α , ΔG и K_C рассчитываются на основе поляризационной кривой при номинальных условиях работы с учетом дополнительных параметров: низкий нагрев (Low Heating Value LHV), состав топлива и воздуха, давление подачи и температура. Эти значения выбирают из спецификации производителя.

Номинальные скорости конверсии газов рассчитываются следующим образом:

$$U_{fH_2} = \frac{n_{nom} \Delta h^0(H_2O(газ))N}{zFV_{nom}}, \quad (12)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{2zFP_{воздух, nom} V_{lpm(воздух), nom} \cdot 0,21}, \quad (13)$$

где n_{nom} – номинальная эффективность LHV набора (%); $\Delta h = 241,83 \cdot 10^3$ Дж/мол; V_{nom} – номинальное напряжение (В); I_{nom} – номинальный ток (А); $V_{lpm(воздух), nom}$ – номинальный поток воздуха (л/мин); $P_{(воздух), nom}$ – номинальное абсолютное давление подачи воздуха (Па); T_{nom} – номинальная рабочая температура (К).

Из этих скоростей конверсии могут быть получены номинальные парциальные давления газов и напряжение Нернста. Поскольку E_{OC} , i_0 и A известны и предполагается, что набор топливных ячеек работает с постоянными скоростями преобразования (в номинальном состоянии), можно определить α , ΔG и K_C .

Если на входе топливных ячеек отсутствует топливо или воздух, предполагается, что топливные ячейки работают с фиксированной скоростью конверсии газов. Тогда подача газов регулируется в

соответствии с законом токовой нагрузки. При этом выходное напряжение на топливных ячейках резко падает при увеличении тока выше номинального значения. Время отклика ячейки $Td = 95\%$ и используется для моделирования явления заряда двойного слоя. Однако это влияет только на напряжение активации $\left(NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \right)$, как показано на эквивалентных схемах (рис.3 и рис.4). Пиковое использование $U_{fO_2(nuk)}$ и соответствующее напряжение V_u используются для моделирования влияния истощения кислорода на выходное напряжение ячейки. Из-за этого эффекта напряжение Нернста E_n изменяется, как показано в (14), где $U_{fO_2(nom)}$ – номинальное потребление кислорода (воздуха), а K – постоянная напряжения:

$$E_n = \begin{cases} E_n - K(U_{fO_2} - U_{fO_2(nom)}), & U_{fO_2} > U_{fO_2(nom)}, \\ E_n, & U_{fO_2} \leq U_{fO_2(nom)}; \end{cases} \tag{14}$$

$$K = \frac{V_u}{K_c(U_{fO_2(peak)} - U_{fO_2(nom)})}. \tag{15}$$

Параметры динамики потока $U_{fO_2(nuk)}$ и V_u зависят от динамики внешнего оборудования (компрессора, регулятора и нагрузки) и они не предоставляются производителями, так как их значения варьируются в зависимости от пользовательского приложения. Для моделирования предположим значения $U_{fO_2(nuk)}$ между 60% и 70% и V_u 2 – 5% номинального напряжения набора.

Известно, что относительная простота конструкции делает топливные элементы достаточно конкурентноспособными на рынке альтернативных источников электроэнергии. Использование топливных элементов на морских судах также является очень перспективным направлением. Однако, одной из основных проблем использования водорода в качестве энергоносителя является его получение и хранение. Водород очень взрывоопасен, диапазон взрывоопасных концентраций водорода в воздухе широк – от 4,0 до 75,0%, а способ хранения и транспортировка водорода представляет собой достаточно сложный затратный процесс. Непосредственное производство водорода в необходимом количестве с минимальными объемами хранения может обеспечить эффективный режим работы такой энергетической системы.

Способов производства водорода достаточно много, однако наиболее эффективным является электролиз воды с использованием импульсного источника питания [1, 12]. Для оценки эффективности электролиза при импульсном питании примем гипотезу для импульса питания об экспоненциальной зависимости тока от времени (рис. 5).

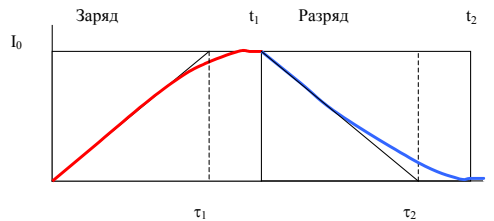


Рис. 5. Процесс заряд-разряд ячейки

Следовательно, при подаче импульса заряда ячейки напряжение на ячейке изменяется по экспоненциальному закону

$$U(t) = U_m(1 - e^{-\alpha t}), \tag{16}$$

где: α – показатель экспоненты, зависящий от скорости изменения напряжения.

На рис. 6 приведена осциллограмма режима импульсного питания, для которого справедливо предположение об экспоненциальности. Как видно из осциллограммы (рис. 6), ток имеет прямоугольный характер, т.е. имеет место режим постоянного тока, что реализуется при источнике тока. Полагая, что используется источник с большим внутренним сопротивлением и емкостной характер ячейки, проявляется существенная нелинейность вольтамперной характеристики ячейки.



Рис. 6. Изменение напряжения на ячейке при прямоугольных импульсах тока

Здесь предполагается уравнение органического роста:

$$\frac{dU}{dt} = -\alpha U. \quad (17)$$

При анализе энергетических затрат будем учитывать особенности вольтамперной характеристики ячейки (рис. 7). Наличие нелинейности связано со свойствами электролита, а именно, с наличием порогового потенциала, после которого начинается процесс электролиза.

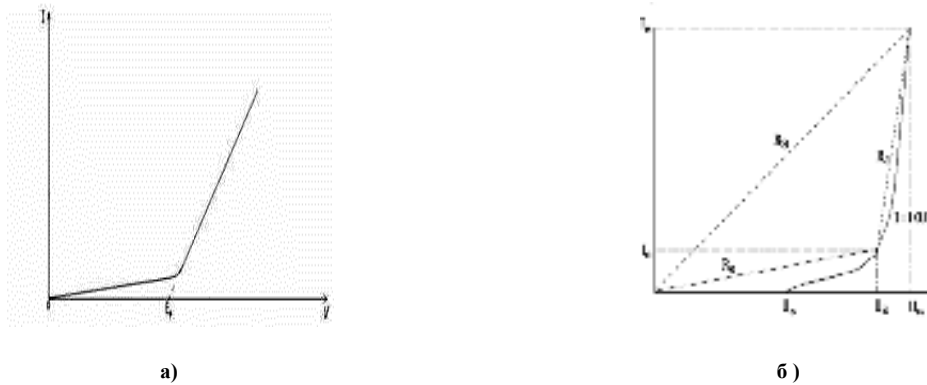


Рис. 7. Вольтамперная характеристика (ВАХ) ячейки:
а) теоретическая характеристика; б) реальная характеристика

При работе напряжение на ячейки мало зависит от тока, особенно при значительных плотностях тока (рис. 7), при этом динамическое сопротивление ячейки колеблется от 0,1 до 0,01 Ома.

Анализ импульсного режима электролизёра. Считая в первом приближении, потребление энергии ячейкой при питании импульсным током прямоугольной формы определяется выражением

$$\bar{P} = U_m I_0 \frac{1}{t_1 + t_2} \int_0^{t_1} (1 - e^{-\alpha t}) dt = U_m I_0 \frac{1}{t_1 + t_2} \left(t_1 + \frac{1}{\alpha} (e^{-\alpha t_1} - 1) \right), \quad (18)$$

где: t_1 - длительность импульса тока; t_2 - длительность паузы; U_m - напряжение источника; I_0 - ток в импульсе.

Или учитывая связь $1/\alpha = \tau$

$$\bar{P} = U_m I_0 \frac{t_1 - \tau_1 + \tau_1 e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}}{t_1 + t_2}. \quad (19)$$

Таким образом, при малых постоянных времени ячейки $\tau_1 \rightarrow 0$ и длительных прямоугольных импульсах средняя мощность описывается выражением

$$\bar{P} \approx U_m I_0 \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{S} U_m I_0, \quad (20)$$

где скважность $S = \frac{t_1 + t_2}{t_1}$.

Следовательно, с увеличением скважности затрачиваемая мощность падает, но падает и средний ток в ячейке. При условии постоянства среднего тока для прямоугольного импульса $I = I_0 \cdot S$ средний ток равен

$$\bar{I} = I_0 \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{S} I_0. \quad (21)$$

Предполагая, что ток в периоде релаксации спадает по экспоненте

$$I_2(t) = I_0 e^{-\alpha_2 t}, \quad (22)$$

находим выход водорода как

$$W(t) = \frac{I(t)}{F}. \quad (23)$$

Среднее значение тока при поданном импульсе питания находим следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{I_0}{t_1 + t_2} \int_0^{t_1} (1 - e^{-\alpha_1 t}) dt = I_0 \frac{t_1}{t_1 + t_2} + I_0 \frac{1}{t_1 + t_2} \frac{1}{\alpha_1} e^{-\alpha_1 t_1} - I_0 \frac{1}{t_1 + t_2} \frac{1}{\alpha_1} = \\ \bar{I}_1 &= \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 (1t \Big|_0^{t_1} - e^{-\alpha_1 t} \Big|_0^{t_1}) = \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 t_1 + \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 \frac{1}{\alpha_1} e^{-\alpha_1 t_1} - \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 \frac{1}{\alpha_1}; \\ \bar{I}_1 &= \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 \left(t_1 + \frac{1}{\alpha_1} e^{-\alpha_1 t_1} - \frac{1}{\alpha_1} \right) = \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 \left(t_1 - \tau_1 + \tau_1 e^{-\frac{t_1}{\tau_1}} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{t_1 + t_2} I_0 \left(t_1 + \frac{1}{\alpha_1} e^{-\alpha_1 t_1} - \frac{1}{\alpha_1} \right) = \frac{I_0 t_1}{t_1 + t_2} + \frac{I_0 \tau_1}{t_1 + t_2} \left(e^{-\frac{t_1}{\tau_1}} - 1 \right). \quad (25)$$

Учитывая тот факт, что время заряда выбрано достаточным для достижения максимального тока, то:

$$\begin{aligned} t = t_1 &\rightarrow (e^{-\alpha_1 t_1} - 1) \approx -1; \\ \bar{I}_1 &\approx I_0 \frac{t_1 - \tau_1}{t_1 + t_2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Аналогично, для второго участка:

$$\bar{I}_2 = \frac{I_0}{(t_1 + t_2)} \frac{1}{\alpha_2} (1 - e^{-\alpha_2 t_2}). \quad (27)$$

Предполагая затухание переходного процесса к моменту окончания цикла, получаем:

$$\begin{aligned} t = t_2 &\rightarrow e^{-\alpha_2 t_2} \approx 0; \\ \bar{I}_2 &\approx \frac{I_0}{t_1 + t_2} \frac{1}{\alpha_2}. \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, за счет использования процесса релаксации получаем коэффициент полезного действия по отношению к процессу без релаксации в виде

$$\eta = \frac{\bar{I}_1 + \bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{(t_1 - \frac{1}{\alpha_1}) + \frac{1}{\alpha_2}}{(t_1 - \frac{1}{\alpha_1})}. \quad (29)$$

Или

$$\eta = 1 + \frac{\frac{1}{\alpha_2}}{t_1 - \frac{1}{\alpha_1}}. \quad (30)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{\alpha_1} = \tau_1; \quad \frac{1}{\alpha_2} = \tau_2, \quad (31)$$

получаем соотношение:

$$\eta = 1 + \frac{\tau_2}{t_1 - \tau_1}. \quad (32)$$

При этом следует учитывать следующие ограничения:

$$\tau_1 < t_1; \quad \eta = 1 + \frac{\tau_2}{t_1 - \tau_1} > 1. \quad (33)$$

Следовательно, правильный выбор параметров может дать значительное увеличение выхода водорода при электролизе. Например, для $\bar{\tau}_1 = \tau_2 = 0,8t_1$ получают

$$\eta = 1 + \frac{0,8t_1}{t_1 - 0,8t_1} = 1 + \frac{0,8}{0,2} = 5. \quad (34)$$

По отношению к постоянному току

$$\eta_0 = \frac{\bar{I}_1 + \bar{I}_2}{\bar{I}_0} = \frac{I_0(t_1 - \tau_1 + \tau_2)}{I_0(t_1 + t_2)};$$

$$\eta_0 = \frac{t_1 - \tau_1 + \tau_2}{t_1 + t_2}; \quad (35)$$

$$\frac{1}{2} \leq \eta_0 \leq 1.$$

Таким образом, выигрыша по производительности по отношению к постоянному току нет, но по затратам энергии выигрыш получен достаточно существенный.

Выводы

Импульсный режим работы электролизёра резко уменьшает затраты электроэнергии на получение необходимого количества водорода.

В системах с релаксацией во внешней среде возможно повышение эффективности процесса. Вход не превышает выхода на постоянном токе.

Для повышения эффективности процесса необходимо иметь близкие время заряда и постоянную времени заряда, а также создавать условия для максимального значения постоянной времени разряда.

Список использованной литературы

1. Богомолов В.С. Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация / В.С. Богомолов. – М.: Мир, 2006. – 320 с.
2. Крыловский государственный научный центр. – Режим доступа: <http://www.krylov-center.ru>

3. Основы эксплуатации судовых энергетических установок / А.Н. Носовский [и др.]. – Николаев, 2010. – 383 с.
4. Петров С. А. Проблема внедрения полного электродвижения на корабли // Состояние и перспективы развития корабельных ЯЭУ иностранных флотов: Монография / С.А. Петров. – СПб.: Судостроение, 2009. – С. 240-260.
5. Судовые автоматизированные тепло- и электроэнергетические установки / А.Н. Пипченко [и др.]. – Одесса: ТЭС, 2011. – 394 с.
6. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы / Г.С. Яковлев. – СПб.: Судостроение, 2012. – 387 с.
7. Ameen M. Bassam Design, modelling and simulation of a hybrid fuel cell propulsion system for a domestic ferry. Proceedings of PRADS2016 4th-8th September, 2016. Copenhagen, Denmark – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/308033943>
8. Allen S., Ashby E., Gore D., Woerner J. and Cervi M. (1998). Marine Applications of Fuel Cells. A Multi-Agency Research Program // Naval Engineering Journal, January 1998. pp.93-106.
9. Bagotskii, V.S. (Vladimir Sergeevich) (2015). Electrochemical power sources : batteries, fuel cells, and supercapacitors / Vladimir S. Bagotsky, Alexander M. Skundin, Yuriy V.M. Volkovich. John Wiley & Sons, Inc.
10. Bagotsky, V. S. (Vladimir Sergeevich) (2012). Fuel cells : problems and solutions / Vladimir S. Bagotsky. – 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.
11. Cheddie D. and Munroe N. Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling// Journal of Power Sources. Volume 147, Issues 1–2, 9 September 2005, Pages 72-84.
12. Fuel Cell Stack Режим доступа: <http://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>
13. Kunusch, Cri stian, Puleston, Paul, Mayosky, Miguel (2012). Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells: Springer Science & Business Media, 2012. pp.180.
14. Li H. (eds.) (2010). Proton Exchange Membrane Fuel Cells Contamination and Mitigation Strategies: Taylor and Francis Group, LLC. pp.436.
15. Motapon S.N., Tremblay O. and L. -A. Dessaint. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation // J. of Power Electronics. Vol. 4, No. 6, 2012, pp. 505–522.
16. Joya S., Tremblay O. and L.-A. Dessaint. A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. pp. 1722-1729.
17. Oyama J. New control strategy for matrix converter// CH2721-9/89/0000-0360 IEEE, J. Oyama, T. Higuchi, E. Yamadea, T. Koga, T. Lipo, 1989.
18. Paddison, Stephen J., Promislow, Keith S. (Eds.) (2009). Device and Materials Modeling in PEM Fuel Cells// Springer-Verlag New York, 2009. P.589.
19. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. – P.230. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>
20. Spiegel Colleen. PEM Fuel Cell. Modeling and Simulation Using MATLAB/ Elsevier, 2008. –P.456.
21. Suib Steven L. (eds.) (2013). New and Future Developments in Catalysis: Batteries. Hydrogen Storage and Fuel Cells. Elsevier B.V. P.658.
22. Tronstad T., Astrand Hogmoen Hanne, Haugom Gerd Petra. Study on the use of fuel cells in shipping, DNV GL, EMSA European Maritime Safety Agency, 2017, Version 0.1 Fuel cells for ships, Research and Innovation, Position Paper 13-2012, DNV.
23. Wilkinson D.P. (eds.) (2010). Proton exchange membrane fuel cells: materials properties and performance / David P. Wilkinson [et al.]. Taylor and Francis Group, LLC. – P.460. [electronic resource].
24. Tomas Tronstad, Hanne Hogmoen Astrand, Gerd Petra Haugom Study on the use of fuel cells in shipping, DNV GL, EMSA European Maritime Safety Agency, 2017, Version 0.1.