

Исследование влияния характеристик и конструкции накопителей электрической энергии на работу систем бесперебойного питания

БЕЛОВ Д.В., ВОРОПАЙ А.Н., КУЗЬМИН И.Н., ЛОСКУТОВ А.Б.

В связи с развитием альтернативной энергетики в мире большое внимание уделяется быстро растущему направлению разработки и производства проточных аккумуляторных батарей, которые способны решить проблему балансировки сетей при непредсказуемом характере генерации энергии от солнца и ветра. Данные накопители энергии во многом схожи с топливными элементами, и некоторые особенности конструкции последних исследователи транслируют на конструкцию проточных аккумуляторных батарей. В статье сравниваются два типа конструкции ванадиевых проточных батарей, а именно батарея с потоком электролита через пористое тело и конструкция с потоком электролита по змеевидному каналу, а также проводится оптимизация геометрии змеевидных каналов для получения конструкции с наиболее высокими характеристиками. Проводится оценка эффективности работы ванадиевой проточной батареи в составе системы бесперебойного питания. Как показывают результаты работы, конструкция со змеевидным каналом без учета потерь на работу насосов и прокачку по всему контуру имеет при мощности 99,5% максимальной КПД на уровне 88,2%, в то время как конструкция с потоком через пористое тело имеет при той же мощности КПД на уровне 85,3%. Разработан подход, который позволяет определить параметры ячейки со змеевидным каналом.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *накопители энергии, проточные аккумуляторы, конструкция, мощность батареи*

Потребитель энергии не раз сталкивался с внезапными отключениями электроэнергии, скачками напряжения в сети, выводящими из строя дорогостоящие электроприборы. Основным критерием электроснабжения объектов и предприятий является надежность [1]. Даже внутри объекта могут быть потребители различных категорий, требующие разного подхода к системе энергообеспечения.

Для обеспечения надежности на объектах, требующих постоянного электропитания, как правило, применяют два независимых источника электроснабжения. При наличии особой группы потребителей устанавливают ещё и резервный источник электроэнергии. В зависимости от периодов отключения электроэнергии выстраивается и бесперебойная система электроснабжения, при этом качество подаваемой электроэнергии не должно изменяться. Для этого в систему устанавливают источник бесперебойного питания (ИБП). Это приспособление позволит в период отключения электроэнергии выполнить качественный переход на линию резервного питания. Для этого в состав ИБП вводят накопитель энергии: либо аккумуляторы [2–4]; либо суперконденсаторы [5–8]; либо механические накопители энергии [9]; либо др. [10, 11]. Каждый накопитель энергии имеет свою нишу, а ввиду развития альтернативной энергетики акту-

альной становится задача применения ИБП для использования энергии, получаемой от солнца, ветра и др., так как данные источники энергии имеют непостоянный график генерации, сильно зависящий от природных условий. Поэтому в современном мире уделяется большое внимание тому, какие источники накопления энергии могут использоваться для энергетики и систем бесперебойного питания (СБП), а также для альтернативной энергетики. Одним из наиболее подходящих вариантов является проточный аккумулятор [12], который пригоден для длительного аккумулирования энергии и имеет хорошие стоимостные характеристики с перспективами снижения стоимости запасенной энергии [13].

Основным элементом проточного аккумулятора, в частности ванадий-кислотного (VRFB), является проточная ячейка, где из-за необходимости прокачивания электролита через пористый углеродный электрод теряется часть мощности из-за гидросопротивления материалов. Одним из подходов к уменьшению гидродинамического сопротивления стало изменение конструкции биполярных пластин, которые по новой концепции должны включать в себя змеевидный канал, а обмен электролита с пористым углеродным материалом осуществляется за счет диффузии ионов, осмотическо-

го давления и турбулентных потоков на границе, где протекающий по каналу электролит соприкасается с пористым углеродным электродом [14].

В статье проводится сравнение классической конструкции ячейки проточного аккумулятора с новой модификацией, включающей в себя змеевидный канал, и рассматривается влияние параметров (глубина, ширина, число каналов) на гидродинамическое и электрическое сопротивление ячейки, а также на эффективность системы в целом, когда проточная АКБ входит в состав СБП, как показано на рис. 1.

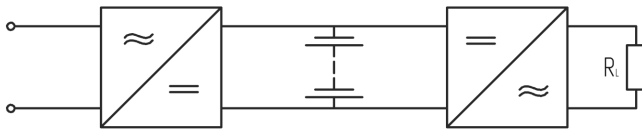


Рис. 1. Схема преобразования в СБП с проточной АКБ

Методика проведения расчетов. Математическое моделирование проведено в программе COMSOL Multiphysics. В статье сравниваются две конструкции ячейки проточного аккумулятора. На рис. 2 представлены модели полуячеек (расчет ведется на одну полуячейку, а для целой ячейки результат просто удваивается), в которых моделируется течение жидкости по каналу. Размер области расчета 150×120 мм, глубина каналов варьировалась от 0,5 до 1,5 мм, ширина каналов — от 3 до 8 мм, число каналов — от 3 до 19. Материал пластины — графит с удельным сопротивлением 8 мкОм·мм. Основные обозначения физических величин приведены далее:

Плотность электролита	ρ
Вязкость электролита	μ
Пористость углеродного войлока	ε_p
Проницаемость углеродного войлока	k
Скорость течения электролита	v
Давление электролита	p
Перепад давления электролита на входе и выходе из полуячейки	$\Delta p_1,$ Δp_2
Объёмный расход электролита через полуячейку	Q_1
То же через углеродный войлок в конструкции	Q_2
Мощность гидравлических потерь для ячеек конструкций А и Б соответственно	$\Delta P_1,$ ΔP_2
Мощность ячеек конструкций А и Б соответственно	P_1, P_2

Параметры электролита: плотность электролита $\rho = 1,355$ г/см³, динамическая вязкость $\eta = 2,5$ мПас. При различных комбинациях параметров число Рейнольдса изменялось от 15 до 43. Для расчёта была выбрана модель ламинарного течения.

Размер пористого углеродного материала в случае конструкции со змеевидным каналом $150 \times 120 \times 1$ мм, пористость 92%.

Расчёт перепада давления и поля скоростей проведён путем численного решения системы урав-

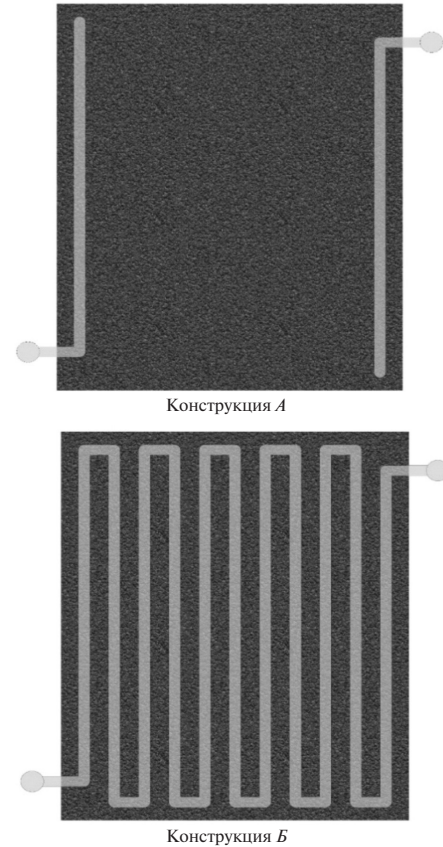


Рис. 2. Вид проточных полуячеек различной конструкции

нений в программе COMSOL. Течение электролита в проточном канале описывается уравнениями Навье–Стокса и уравнением неразрывности:

$$\begin{aligned} \rho(u\nabla)u &= -\nabla p + \mu\nabla^2 u; \\ \rho\nabla u &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Течение в углеродном войлоке описывается моделью Бринкмана. Здесь записываются модифицированные уравнения Навье–Стокса для поля скоростей, усреднённых по объёмам, много меньшим размеров конструкции, но много большим размеров пор (согласно сравнительному анализу, изложенному в [15, 16] данная модель является наиболее подходящей для конструкций А и Б):

$$\begin{aligned} \rho(u\nabla)u &= -\nabla p - \frac{\mu}{k}u + \mu\nabla^2 u; \\ \rho\nabla u &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Влияние размеров змеевидного канала. Поведено моделирование влияния значения высоты и ширины канала при радиусах кривизны при повороте канала $r=0$ и $R=d/2$ (данные значения выбраны из соображений более простого технологического исполнения). По перепаду давления вычислены значения мощности потерь при различных геометрических параметрах канала полуячейки при объёмном расходе электролита $Q=0,5$ л/ч. Число

участков канала $N=9$. Также стоит учесть, что при увеличении размера канала увеличивается электрическое сопротивление токосъемной пластины. Мощность потерь на электрическое сопротивление оценено по формуле

$$P=0,02592h/S,$$

где h – глубина канала; S – площадь контакта.

На рис. 3 представлены кривые зависимости суммарной мощности потерь (от гидросопротивления и электрического сопротивления) от ширины и глубины канала. Наиболее низкими потерями обладает геометрия с глубиной канала 1,5. Аппроксимация кривой 3 представлена на рис. 3, и по данной аппроксимации определена оптимальная ширина канала: $d=4,2$ мм (округлено до десятых, так как в реальности есть ограничения в выборе инструмента).

Проведенные расчеты по оптимизации числа каналов показали, что при увеличении числа каналов увеличиваются гидродинамическое сопротивление и электрическое сопротивление, поэтому необходимо ввести дополнительный параметр оптимизации, по которому следует ограничить число каналов. Данным параметром должно выступать значение количества электролита, протекающего в порах углеродного материала, который в данной конструкции располагается над каналами: чем

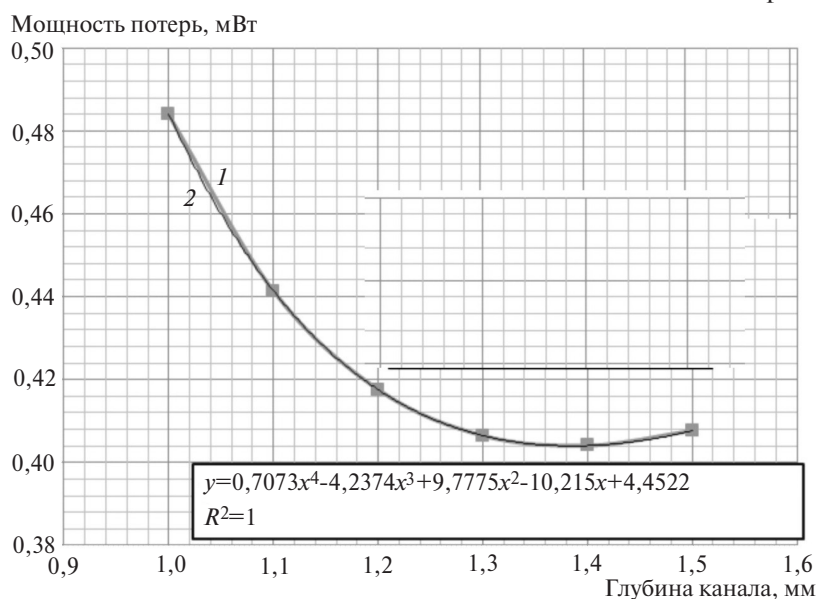


Рис. 4. Кривая зависимости суммарной мощности потерь в зависимости от глубины канала (число каналов 11, ширина канала 4 мм); 1 – $N=11$; $d=4$ мм; 2 – полиномиальная

Суммарные потери мощносим, мВт

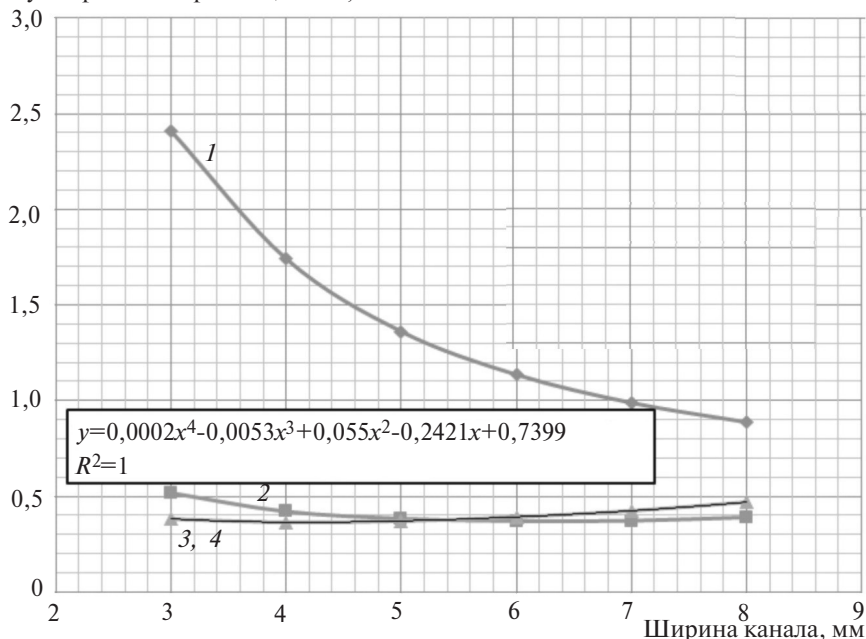


Рис. 3. Кривые зависимости суммарной мощности потерь от ширины канала: 1 – $h=0,5$ мм; 2 – 1,0 мм; 3 – 1,5 мм; 4 – полиномиальная ($h=1,5$ мм)

меньше каналов, тем больше между ними расстояние и тем меньше электролита проникает в пористый углеродный материал, что снижает мощность системы, но так как моделирование пористого тела не рассматривается в этой статье, то ограничим число каналов по площади каналов согласно [17], где площадь каналов не менее 30%. Следовательно, при площади 180 см^2 площадь каналов должна быть не менее 54 см^2 , а площадь контакта должна быть не более 126 см^2 . Таким образом, конструкция с 11 каналами наиболее оптимальна.

На рис. 4 представлен график зависимости суммарной мощности (гидродинамической и электрической) потерь в зависимости от глубины канала для случая с 11 каналами и шириной канала 4 мм. Аппроксимируя данные полиномом 4-й степени (подобран так, как дает $R=1$), находим значение минимума функции $h \approx 1,4$ мм (округляем до первого знака после запятой, так как технологически в производстве мы ограничены точностью изготовления деталей из графита до ± 10 мкм [18]).

Таким образом, наиболее оптимальной конструкцией ячейки со змеевидным каналом является конструкция следующих параметров: глубина каналов 1,4 мм, ширина каналов 4,2 мм, число каналов 11.

На рис. 5 представлены модели перепада давления в полужайчках при

скорости течения электролита 0,1 л/ч. Видно, что в конструкции *A* перепад давления почти в 5 раз выше, чем в конструкции *B*, что согласуется с данными [14], где рассмотрена 2D-модель движения электролита в сегменте проточного канала конструкции ячейки, аналогичной конструкции *B*, исследованы влияние входного объемного расхода, проницаемости пористого слоя, толщины пористого слоя и толщины проточного канала на проникновение потока в пористый слой, рассчитана плотность тока в такой ячейке. Оценка удельного тока в пористом углеродном материале для случая *B* проводилась аналогично работе [17].

Расчет зависимости перепада давления от скорости течения электролита представлен на рис. 6. Для данной области скоростей наблюдается линейный характер зависимости перепада давления от

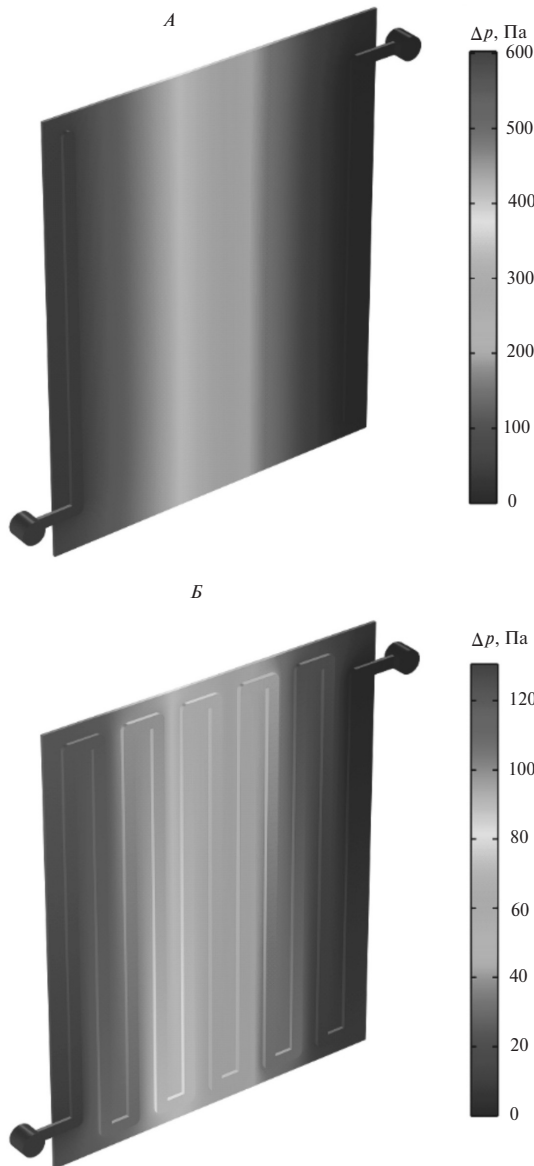


Рис. 5. Перепад давления в полуячейках при скорости течения жидкости 0,1 л/ч

скорости течения электролита, что, видимо, связано с отсутствием сильной турбулентности в потоке электролита.

Для того чтобы оценить мощность в полуячейке со змеевидным каналом, необходимо определить объем электролита, проходящий в единицу времени через объем пористого углеродного материала, т.е. определить объемную скорость электролита в пористом электроде. Эта скорость равна полной интегральной скорости проникновения электролита в пористый материал и определяется выражением

$$Q_2 = \iint |u_y| dS.$$

Интегрирование ведётся по плоскости, разделяющей пористый электрод и канал, по которому протекает электролит (рис. 7,а). Кривая зависимости скорости течения электролита в электроде в зависимости от скорости течения электролита в змеевидном канале представлена на рис. 7,б.

Зависимость мощности ячейки и концентрации ионов от расхода электролита была вычислена итерационным методом. В качестве начальных значений были выбраны: удельный ток 80 мА, напряжение 1,25 В, что при заданной геометрии электрода дает мощность ячейки 18 Вт. Начальная концентрация электролита 1,5 моль/л: $P_0=18$ Вт; $C_0=1,5$ моль/л. Временной шаг $\Delta t=1$ с.

Первый шаг итерации учитывает убыль концентрации за счёт химической реакции:

$$C_{i+1} = C_i - P_i \Delta t / k.$$

Здесь $k=VN_A U$; $V=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³ – объём, в котором происходит реакция; $U=1,25$ В – потенциал ячейки проточного аккумулятора.

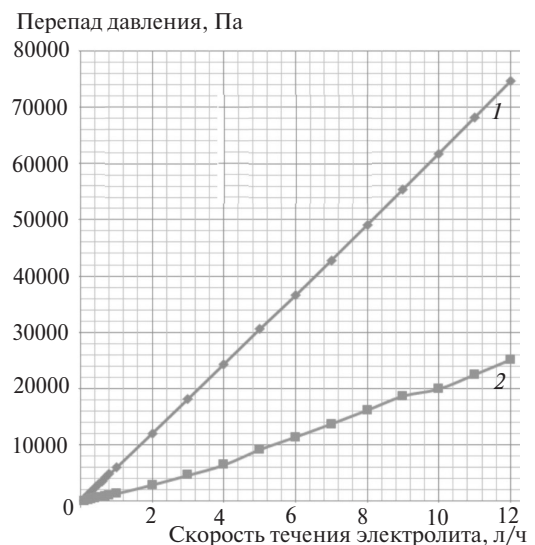


Рис. 6. Кривые зависимости перепада давления в полуячейках при различной скорости течения электролита: 1 – конструкция *A*; 2 – то же *B*

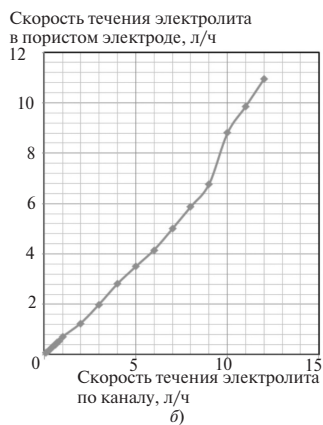
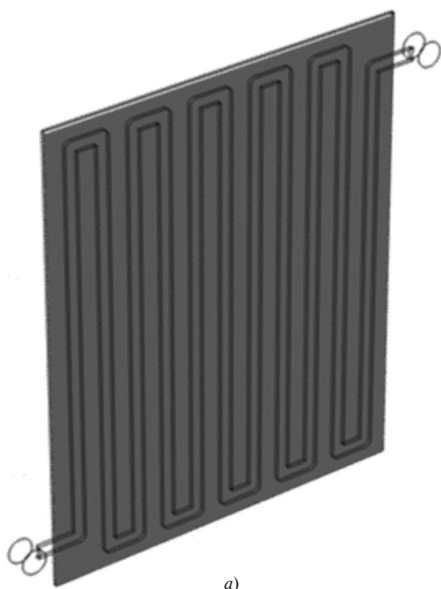


Рис. 7. 3D-модель, демонстрирующая расположение плоскости, по которой ведется интегрирование поля скоростей (а) и зависимость скорости течения электролита в электроде в зависимости от скорости течения электролита в змеевидном канале (б)

В т о р о й шаг учитывает обновление электролита за счёт циркуляции за время Δt :

$$C'_{i+1} = \frac{C_0 Q \Delta t + C_{i+1} (V - Q \Delta t)}{V}$$

Необходимо, чтобы шаг времени удовлетворял условию: $\Delta t < V/Q$.

Т р е т и й шаг строится из предположения, что мощность пропорциональна концентрации:



Рис. 8. Кривые зависимости мощности ячеек и их КПД от скорости течения электролита через ячейку: 1 – мощность ячейки 1; 2 – то же ячейки 2; 3 – КПД ячейки 1; 4 – то же ячейки 2

$$P_{i+1} = P_i C'_{i+1} / C_i$$

Далее цикл замыкается: $P_i = P_{i+1}$; $C_i = C'_{i+1}$.

Расчёт показал, что не при любом расходе электролита устанавливается максимальная мощность. Скорость обновления ионов может не обеспечивать эту мощность. Однако чем больше расход электролита, тем выше гидросопротивление, что также уменьшает КПД. Мощность гидравлических потерь связана с расходом электролита и перепадом давления в ячейке: $\Delta P = 2Q\Delta p$.

На рис. 8 приведены кривые мощности ячеек и их КПД в зависимости от скорости течения электролита через ячейку с учетом потерь на электрическое сопротивление (так как электрический контакт в случае со змеевидным каналом хуже, чем в случае сплошной пластины).

Видно, что мощность в зависимости от скорости течения электролита для конструкции А изменяется практически так же, как и для конструкции В, но при этом КПД в ячейки конструкции А падает с увеличением скорости протекания электролита более существенно, чем для ячейки конструкции В, что связано с более сильным увеличением гидросопротивления по сравнению с ячейкой со змеевидным каналом. Таким образом, конструкция ячейки проточного аккумулятора со змеевидным каналом является более приемлемой с точки зрения снижения потерь на гидродинамическое сопротивление.

В реальности проточная аккумуляторная батарея будет использоваться в составе систем беспере-



Рис. 9. Структурная схема СБП «Дубна»

бойного питания (СБП), например на основе активного выпрямителя [19] (рис. 9). Преобразование в звене «аккумулятор—потребитель» (рис. 1) определяется КПД аккумулятора и КПД инвертора (для СБП это значение находится на уровне 94%).

Таким образом, использование проточного аккумулятора с ячейкой, основанной на змеевидном канале (конструкция *Б*), теоретически может дать КПД на уровне 88,2%, а использование проточного аккумулятора с ячейкой, основанной на конструкции *А*, этот КПД будет на уровне 85,3% при мощности ячейки 99,5% максимальной.

Вывод. С помощью разработанного алгоритма определения мощности ячейки проточного аккумулятора в зависимости от скорости течения электролита и на основании результатов мощности ячейки проведено сравнение двух конструкций ячейки проточного аккумулятора. По результатам сравнительной оценки наиболее перспективной является конструкция проточной ячейки со змеевидным каналом для протекания электролита, так как в этом случае значения гидродинамических потерь сравнительно ниже.

Таким образом, для СБП и проточной АКБ со змеевидным каналом (конструкция *Б*) при мощности 99,5% максимальной можно ожидать КПД на уровне 88,2% (это без учета потерь на работу насосов и прокачку по всему контуру), в то время как для для СБП и проточной АКБ с классической конструкцией (конструкция *А*) при мощности 99,5% максимальной можно ожидать КПД на уровне около 85,3% и он резко снижается при увеличении скорости протекания электролита до 72,3% при скорости 12 л/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоскутов А.Б., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А. Оценка энергетической эффективности применения напряжения 0,95 кВ в системе электроснабжения с распределенной нагрузкой. — Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019, № 3 (126), с. 73–79.
2. Болдырева Е.Ю., Кадникова Н.В., Волинский В.В., Казаринов И.А. Герметичный никель-кадмиевый аккумулятор KGL300p с электродами ламельной конструкции. — Электрохимическая энергетика, 2009, т. 9, № 4, с. 222–225.
3. Колосовский В.В., Колыщенко В.Л. Методы улучшения эксплуатационных характеристик свинцовых аккумуляторов в составе установок, действующих на энергии возобновляемых источников. — Изв. Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2014, № 37, с. 232–237.
4. Deepak P. Dubal, Pedro Gomez-Romero. All nanocarbon Li-Ion capacitor with high energy and high power density. — Materials Today Energy, June 2018, vol. 8, pp. 109–117.
5. Еналдиев В.Г., Меркушев Д.В. Перспективы применения суперконденсаторов в качестве альтернативы аккумуляторам. — Научные исследования: от теории к практике, 2015, т. 2, № 4 (5), с. 32–34.
6. Пузынин А.В., Самаров А.В., Воропай А.Н., Козлов А.П., Барнаков Ч.Н., Исмагилов З.Р. Использование высокопористых углеродных материалов, наполненных гидроксидом металла в качестве электродов суперконденсатора. — Вестник Кемеровского государственного университета, 2014, № 3–3 (59), с. 238–241.
7. Zakharov Yu.A., Voropay A.N., Fedorova N.M., Pugachev V.M., Puzynin A.V., Barnakov Ch.N., Ismagilov Z.R., Manina T.S. Highly porous carbon materials filled with nickel hydroxide nanoparticles; synthesis, study, application in electrochemistry. — Eurasian Chemico-Technological Journal, 2015, т. 17, No. 3, pp. 187–191.
8. Захаров Ю.А., Воропай А.Н., Сименюк Г.Ю., Пугачев В.М., Додонов В.Г., Маннина Т.С., Исмагилов З.Р., Якубик Д.Г. Наноструктурированные композиты на основе высокопористых углеродных материалов: получение, свойства и перспективы использования в качестве электродных материалов аккумуляторов. — В кн.: Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология, 2016, с. 168–170.
9. Соколов М.А., Томасов В.С., Jastrzbski R.P. Сравнительный анализ систем запасаения энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков. — Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2014, № 4, с. 149–155.
10. Спицын И.А., Орехов А.А., Чушкин М.В. Тепловой аккумулятор фазового перехода. — Вестник Московского гос. агроинженерного университета им. В.П. Горячкина, 2008, № 2 с. 52–53.
11. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981, 360 с.
12. Rubiñ Lopez-Vizcaino, Esperanza Mena, Magna Millón, Manuel A. Rodrigo, Justo Lobato. Performance of a vanadium redox flow battery for the storage of electricity produced in photovoltaic solar panels. — Renewable Energy. December 2017, vol. 114, Part B, pp. 1123–1133.
13. Rylan Dmello, Jarrod D. Milshtein, Fikile R. Brushett, Kyle C. Smith. Cost-driven materials selection criteria for redox flow battery Electrolytes. — Journal of Power Sources 330, 2016, pp. 261–272.
14. Xinyou Ke, Joseph M. Prah, J. Iwan D. Alexander, Robert F. Savinell. Mathematical Modeling of Electrolyte Flow in a Segment of Flow Channel over Porous Electrode Layered System in Vanadium Flow Battery with Flow Field Design. — Electrochimica Acta, 2017, vol. 223, pp. 124–134.
15. Zhongying Shi, Xia Wang. Comparison of Darcy's Law, the Brinkman Equation, the Modified N-S Equation and the Pure Diffusion Equation in PEM Fuel Cell Modeling. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2007, Boston.
16. Трифонова Т.А., Шеремет М.А. Сравнительный анализ моделей Дарси и Бринкмана при исследовании нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области. — Компьютерные исследования и моделирование, 2013, т. 5 № 4, с. 623–634.
17. Xinyou Ke, Joseph M. Prah, J. Iwan D. Alexander, Robert F. Savinell. Flow distribution and maximum current density studies in redox flow batteries with a single passage of the serpentine flow channel. — Journal of Power Sources, 2014, vol. 270, pp. 646–657.
18. АО «Сагурн — Инструментальный Завод» [Официальный сайт] <http://satur.ru/company/facility.php> / (дата обращения 01.06.2018).
19. ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» [Официальный сайт] <https://www.technocomplekt.ru/> (дата обращения 13.03.2020).

[30.04.2020]

А в т о р ы : Белов Дмитрий Викторович — специалист научно-исследовательского отдела ЗАО «ТЕХНОКОМПЛЕКТ».

Воропай Александр Николаевич – кандидат химических наук, руководитель направления научно-исследовательского отдела ЗАО «ТЕХНОКОМПЛЕКТ».

Кузьмин Иван Николаевич – главный инженер Федерального казенного учреждения.

Лоскутов Алексей Борисович – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Electrichestvo, 2020, No. 10, pp. 4–11

DOI:10.24160/0013-5380-2020-10-4-11

Studying the Effect the Characteristics and Design of Electric Energy Storage Devices Have on the Operation of Uninterruptible Power Supply Systems

BELOV Dmitry V. (*JSC «TECHNOROMPLEKT», Dybna, Russia*) – Specialist of Scientific and Research Dept.

VOROPAY Alexander N. (*JSC NECHYOKOMPLEKT», Dubna, Rusia*) – Project Technical Manager, Cand. Sci. (Chem.)

KUZ'MIN Ivan N. (*Federal State Institution, Moscow, Russia*) – Chief Engineer

LOSKUTOV Aleksey B. (*Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseyev, Russia*) – Professor of Power Engineering, Electric Supply and Power Electronica Dept, Dr. Sci. (Eng.)

In connection with the development of alternative energy sources around the world, much attention is paid to the rapidly growing field of development and manufacture of flow batteries, devices using which it is possible to solve the network balancing problem under the conditions of unpredictable solar and wind energy generation patterns. These energy storage devices are in many respects similar to fuel cells, and researchers translate some design features of the latter to the design of flow batteries. Two designs of vanadium flow batteries are compared: a battery with the electrolyte flowing through a porous body and a battery with the electrolyte flowing through a serpentine-patterned channel. Additionally, the geometry of the serpentine-patterned channels is optimized to obtain a design with the best characteristics. The performance efficiency of the vanadium flow battery used as part of an uninterruptible power supply system is estimated. The study results show that the design with a serpentine-patterned channel, when estimated without taking into account the losses for operation of the pumps and pumping through the entire circuit, and during operation at 99,5 % of its capacity, has the maximum efficiency at a level of 88,2 %, whereas the design with the flow through a porous body and operating at the same power has the efficiency at a level of 85,3 %. An approach using which the parameters of a cell with a serpentine-patterned channel can be determined has been developed.

Key words: energy storages, flow batteries, design, battery power capacity

REFERENCES

1. Loskutov A.B., Fitasov A.N., Petritskiy S.A. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva* – in Russ. (*Proc. of Nizhny Novgorod State Technical University named R.Ye. Alekseyev*), 2019, No. 3(126), pp. 73–79.
2. Boldyreva Ye.Yu., Kadnikova N.V., Volynskiy V.V., Kazarinov I.A. *Elektrokhimicheskaya energetika* – in Russ. (*Electrochemical Energy*), 2009, vol. 9, No. 4, pp. 222–225.
3. Kolosovskiy V.V., Kolnyshenko V.L. *Izv. St. Peterburgskogo gos. Adrarnogo universiteta* – in Russ. (*News of St. Petersburg State Agrarian University*), 2014, No. 37, pp. 232–237.
4. Deepak P. Dubal, Pedro Gomez-Romero. All nanocarbon Li-Ion capacitor with high energy and high power density – *Materials Today Energy*, June 2018, vol. 8, pp. 109–117.
5. Yenaldiyev V.G., Merkushev D.V. *Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike* – in Russ. (*Scientific Research: from theory to Practice*), 2015, vol. 2, No. 4(5), pp. 32–34.
6. Puzynin A.V., Samarov A.V., Voropay A.N., Kozlov A.P., Barnakov Ch.N., Ismagilov Z.R. *Vestnik Kemerovskogo gos.*

universiteta – in Russ. (*Bulletin of Kemerovo State University*), 2014, No. 3-3(59), pp. 238–241.

7. Zakharov Yu.A., Voropay A.N., Fedorova N.M., Pugachev V.M., Puzynin A.V., Barnakov Ch.N., Ismagilov Z.R., Manina T.S. Highly porous carbon materials filled with nickel hydroxide nanoparticles; synthesis, study, application in electrochemistry. – *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2015, т. 17, No. 3, pp. 187–191.

8. Zakharov Yu.A., Voropay A.N., Simenyuk G.Yu., Pugachev V.M., Dodonov V.G., Manina T.S., Ismagilov Z.R., Yakubik D.G. *Nanostrukturirovannyye kompozity na osnove vysokoporistykh uglerodnykh materialov: polucheniye, svoystva i perspektivy ispol'zovaniya v kachestve elektrodnykh materialov akkumulyatorov.* – *V kn.: Uglerod: fundamental'nyye problemy nauki, materialovedeniye, tekhnologiya* (Nanostructured composites based on highly porous carbon materials: preparation, properties and prospects for use as battery electrode materials. - In the book: Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology), 2016, pp. 168–170.

9. Sokolov M.A., Tomasov V.S., Jastrzyski R.P. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optic – in Russ. (*Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*), 2014, No. 4, pp. 149–155.
10. Spitsyn I.A., Orekhov A.A., Chushkin M.V. *Vestnik Moskovskogo gos. agroinzhenerenogo instituta im. V.P. Goryachkina – in Russ. (Bulletin of Moscow State Agroengineering Institute named V.P. Goryachkin)*, 2008, No. 2 pp. 52–53.
11. Bagotskiy V.S., Skundin A.M. *Khimicheskiye istochniki toka* (Chemical power sources). M.: Energoizdat, 1981, 360 p.
12. Rubiñ Lypez-Vizcaino, Esperanza Mena, Магна Millón, Manuel A.Rodrigo, Justo Lobato. Performance of a vanadium redox flow battery for the storage of electricity produced in photovoltaic solar panels. – *Renewable Energy*. December 2017, vol. 114, Part B, pp. 1123–1133.
13. Rylan Dmello, Jarrod D. Milshtein, Fikile R. Brushett, Kyle C. Smith. Cost-driven materials selection criteria for redox flow battery Electrolytes. – *Journal of Power Sources* 330, 2016, pp. 261–272.
14. Xinyou Ke, Joseph M. Prah, J. Iwan D. Alexander, Robert F. Savinell. Mathematical Modeling of Electrolyte Flow in a Segment of Flow Channel over Porous Electrode Layered System in Vanadium Flow Battery with Flow Field Design. – *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 223, pp. 124–134.
15. Zhongying Shi, Xia Wang. Comparison of Darcy's Law, the Brinkman Equation, the Modified N-S Equation and the Pure Diffusion Equation in PEM Fuel Cell Modeling. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2007, Boston.
16. Trifonova T.A., Sheremet M.A. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye – in Russ. (Computer Research and Designing)*, 2013, vol. 5 No. 4, pp. 623–634.
17. Xinyou Ke, Joseph M. Prah, J. Iwan D. Alexander, Robert F. Savinell. Flow distribution and maximum current density studies in redox flow batteries with a single passage of the serpentine flow channel. – *Journal of Power Sources*, 2014, vol. 270, pp. 646–657.
18. AO «Saturn – Instrumental'nyy Zavod» [Offic. Site] <http://satiz.ru/company/facility.php> (Date of appeal 01.06.2018).
19. ZAO «MPOTK «TEKHNOKOMPLEKT» [Offic. Site] <https://www.technocomplekt.ru/> (Date of appeal 13.03.2020).

[30.04.2020]