

SUPPORTING DATA

Расчет параметров симметричного СК с водным и органическим электролитом по измерениям в лабораторной ячейке

1. Суперконденсатор MAXWELL Co., 2885F, органический электролит [7], [4].

Из Таблицы 4 [7] находим следующие параметры:

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7$ В,

постоянная времени $\tau_C = R_A C_A = 1.08$ с,

максимальная мощность конденсатора, приведенная на единицу объема сборки,

$$P_{\max, SC} = 11.49 \text{ кВт/л}$$

мощность конденсатора при работе в импульсном режиме с эффективностью $>95\%$, приведенная на единицу объема сборки, $P_{0.95, SC} = 1.29$ кВт/л,

энергия, отдаваемая конденсатором при работе в импульсном режиме с эффективностью $>95\%$, приведенная на единицу объема сборки, $E_{0.95, SC} = 5.46$ Вт ч/л

Из работы [4] берем следующие параметры:

толщина электродов $h_{el} = 0.03$ см,

плотность материала электродов $\rho_{el} = 0.35$ г/см³, $m_A = 10.5$ мг/см²,

величину объемной доли электродов принимаем равной $f_{el} = 0.8$ (оценка)

Расчет неизвестных параметров

По известной максимальной мощности конденсатора на единицу объема сборки:

$P_{\max, SC} = f_{el} U_0^2 / (4 R_A V_A)$, $V_A = 2 h_{el}$ находим внутреннее сопротивление конденсатора:

$$R_A = \frac{f_{el} U_0^2}{4 P_{\max, SC} V_A} = 2.11 \text{ Ом см}^2$$

Находим емкость конденсатора на единицу поверхности: $C_A = \tau_C / R_A = 0.51$ Ф/см² и из формулы для $C_A = C_{vol, el} h_{el} / 2$ находим удельную объемную емкость $C_{vol, el} = 34$ Ф/см³.

2. Суперконденсатор с электродами из КУНБ, водный электролит [22].

Из текста статьи находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — композитная углеродная нанобумага (КУНБ, нанокompозит углеродного ксерогеля с УНТ), обр. #247,

электролит — 1 М H₂SO₄/H₂O, водный раствор,

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 1.0$ В,

эквивалентное последовательное сопротивление $R_A = 0.095 \text{ Ом} \times 2.1 \text{ см}^2 = 0.2 \text{ Ом см}^2$ (измерение по скачку напряжения, рис. 4),

толщина электродов $h_{el} = 0.026$ см,

плотность материала электродов $\rho_{el} = 0.36$ г/см³, $m_A = 9.4$ мг/см²,

величину объемной доли электродов принимаем равной этому значению в [18]: $f_{el} = 0.78$ (оценка),

удельная объемная емкость электродов $C_{vol, el} = 48$ Ф/см³.

Расчет целевых параметров.

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0 / R_A = 0.5 \text{ А/см}^2 = 53.2 \text{ А/г}$ — ток короткого замыкания

$$I_C = I_{short} / 40 = 0.02 \text{ А/см}^2 = 1.33 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 1.0$ В, $C_{vol, el} = 48$ Ф/см³, $R_A = 0.2 \text{ Ом см}^2$, $h_{el} = 0.026$ см.

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2 h_{el}}{2 h_{el} + h_{sep} + 2 h_{curr}} = 0.78$$

принято равным из [18].

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2 h_{el} = 0.052 \text{ см}^3/\text{см}^2$.

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{vol, el} h_{el} / 2 = 0.62 \text{ Ф/см}^2$.

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el} C_{vol, el} / 4 = 9.36 \text{ Ф/см}^3$.

Удельная максимальная мощность СК: $P_{\max, SC} = f_{el} U_0^2 / (4 R_A V_A) = 18.75 \text{ кВт/л}$.

Удельная мощность разряда СК с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95, SC} = 0.112 P_{\max, SC} = 2.1 \text{ кВт/л}$$

Удельная выделяемая энергия при разряде СК с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95,SC} = 0.024 f_{el} C_{vol,el} U_0^2 = 0.9 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 0.124 \text{ с.}$

3. Суперконденсатор (holey graphene frameworks), водный электролит [11].

Из текста статьи и дополнительных материалов находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — химически-перфорированный и восстановленный графен (holey graphene frameworks, HGFs),

электролит — 6М КОН/Н₂O,

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 1.0 \text{ В,}$

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 1 \text{ мг/см}^2$, плотность материала электрода $\rho_{el} = 0.71 \text{ г/см}^3$,

толщина электродов $h_{el} = 0.0014 \text{ см,}$

площадь электрода $S_{el} = 1 \text{ см}^2$,

эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, $R_A = 0.6 \text{ Ом см}^2$ (текст, Fig.3b, измерения по скачку напряжения $\Delta U = 0.12 \text{ В}$ при $I = 100 \text{ А/г}$);

сепаратор — Gelgard 3501, $h_{sep} = 0.0030 \text{ см,}$

токосъемники — металлическая фольга $h_{curr} = 0.002 \text{ см,}$

массовая емкость электродов $C_{wt,el} = 250 \text{ Ф/г,}$ измеренная при разряде симметричного СК с постоянным током разряда 80 А/г (Fig.3c [11]).

Расчет целевых параметров.

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 1.67 \text{ А/см}^2 = 1670 \text{ А/г}$ — ток короткого замыкания

$$I_C = I_{short}/40 = 0.042 \text{ А/см}^2 = 41.7 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 1.0 \text{ В, } C_{vol,el} = 177 \text{ Ф/см}^3$, $R_A = 0.6 \text{ Ом см}^2$, $h_{el} = 0.0014 \text{ см, } h_{sep} = 0.003 \text{ см, } h_{curr} = 0.002 \text{ см.}$

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2h_{el}}{2h_{el} + h_{sep} + 2h_{curr}} = 0.29.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{el} = 0.0028 \text{ см}^3/\text{см}^2$.

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{vol,el} h_{el}/2 = 0.12 \text{ Ф/см}^2$.

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el} C_{vol,el}/4 = 12.8 \text{ Ф/см}^3$.

Удельная максимальная мощность: $P_{max,SC} = f_{el} U_0^2/(4R_A V_A) = 43.1 \text{ кВт/л.}$

Удельная мощность разряда с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95,SC} = 0.112 P_{max,SC} = 4.8 \text{ кВт/л.}$$

Удельная выделяемая энергия при разряде с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95,SC} = 0.024 f_{el} C_{vol,el} U_0^2 = 1.23 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 0.072 \text{ с.}$

4. Суперконденсатор (electrolyte-mediated chemically converted graphene), водный электролит [10].

Из текста статьи и Supplementary materials находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — химически-восстановленная окись графена (electrolyte-mediated chemically converted graphene, EM-CCG),

электролит — 1М Н₂SO₄/Н₂O,

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 1.0 \text{ В,}$

плотность материала электрода $\rho_{el} = 1.33 \text{ г/см}^3$, $m_A = 10 \text{ мг/см}^2$,

толщина электродов $h_{el} = 0.0075 \text{ см,}$

площадь электрода $S_{el} = 1 \text{ см}^2$,

эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, $R_A = 2.5 \text{ Ом см}^2$ (Fig.2E [11], измерения методом электрохимической импедансной спектроскопии);

сепаратор — мат из стекловолокна, $h_{sep} = 0.0025 \text{ см,}$

токосъемники — платиновая фольга, $h_{curr} = 0.002 \text{ см}$ ([11], Supplementary materials),

объемная емкость электродов $C_{vol,el} = 170 \text{ Ф/см}^3$, измеренная при разряде симметричного СК с постоянным током разряда 1 А/г ([11] Fig.S7, Supplementary materials).

Расчет целевых параметров

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 0.4 \text{ А/см}^2 = 40 \text{ А/г}$ — ток короткого замыкания.

$$I_C = I_{short}/40 = 0.01 \text{ А/см}^2 = 1.0 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 1.0$ В, $C_{\text{vol,el}} = 170$ Ф/см³, $R_A = 2.5$ Ом см²,
 $h_{\text{el}} = 0.0075$ см, $h_{\text{sep}} = 0.0025$ см, $h_{\text{curr}} = 0.002$ см.

Объемная доля электродов:

$$f_{\text{el}} = \frac{2h_{\text{el}}}{2h_{\text{el}} + h_{\text{sep}} + 2h_{\text{curr}}} = 0.7.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{\text{el}} = 0.015$ см³/см².

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{\text{vol,el}}h_{\text{el}}/2 = 0.64$ Ф/см².

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{\text{SC}} = f_{\text{el}}C_{\text{vol,el}}/4 = 30.2$ Ф/см³.

Удельная максимальная мощность СК: $P_{\text{max,SC}} = f_{\text{el}}U_0^2/(4R_A V_A) = 4.7$ кВт/л.

Удельная мощность разряда с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95, \text{SC}} = 0.112P_{\text{max,SC}} = 0.53 \text{ кВт/л.}$$

Удельная выделяемая энергия при разряде с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95, \text{SC}} = 0.024f_{\text{el}}C_{\text{vol,el}}U_0^2 = 2.9 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 1.6$ с.

5. Суперконденсатор (electrolyte-mediated chemically converted graphene), органический электролит [10].

Из текста статьи и Supplementary materials находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — химически-восстановленная окись графена (electrolyte-mediated chemically converted graphene, EM-CCG),

электролит — 1М EMIMBF₄/AN (1-ethyl-3-methylimidazoliumtetrafluoroborat/acetonitril),

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7$ В,

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 1.0$ мг/см², плотность материала электрода $\rho_{\text{el}} = 1.25$ г/см³,

толщина электродов $h_{\text{el}} = 0.0008$ см (для более толстых электродов данные в статье отсутствуют),

площадь электрода $S_{\text{el}} = 1$ см²,

эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, $R_A \sim 11$ Ом см² (Fig.S10, измерения методом электрохимической импедансной спектроскопии);

сепаратор — мат из стекловолокна, $h_{\text{sep}} = 0.0025$ см,

токосъемники — платиновая фольга, $h_{\text{curr}} = 0.002$ см ([10], Supplementary materials),

объемная емкость электродов $C_{\text{vol,el}} = 175$ Ф/см³, измеренная при разряде симметричного СК с постоянным током разряда 8 А/г (Fig.S11E, Supplementary materials).

Расчет целевых параметров

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{\text{short}} = U_0/R_A = 0.24$ А/см² = 240 А/г — ток короткого замыкания.

$$I_C = I_{\text{short}}/40 = 0.006 \text{ А/см}^2 = 6 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 2.7$ В, $C_{\text{vol,el}} = 175$ Ф/см³, $R_A = 11$ Ом см²,
 $h_{\text{el}} = 8$ мкм, $h_{\text{sep}} = 25$ мкм, $h_{\text{curr}} = 0.002$ см.

Объемная доля электродов:

$$f_{\text{el}} = \frac{2h_{\text{el}}}{2h_{\text{el}} + h_{\text{sep}} + 2h_{\text{curr}}} = 0.2.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{\text{el}} = 0.0016$ см³/см².

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{\text{vol,el}}h_{\text{el}}/2 = 0.07$ Ф/см².

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{\text{SC}} = f_{\text{el}}C_{\text{vol,el}}/4 = 8.75$ Ф/см³.

Удельная максимальная мощность: $P_{\text{max,SC}} = f_{\text{el}}U_0^2/(4R_A V_A) = 20.7$ кВт/л.

Удельная мощность разряда с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95, \text{SC}} = 0.112P_{\text{max,SC}} = 2.32 \text{ кВт/л.}$$

Удельная выделяемая энергия при разряде с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95, \text{SC}} = 0.024f_{\text{el}}C_{\text{vol,el}}U_0^2 = 6.12 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 0.77$ с.

6a. Суперконденсатор (holey graphene frameworks), органический электролит [11] (тонкий электрод).

Из текста статьи и дополнительных материалов находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в симметричном суперконденсаторе:

материал электродов — химически-перфорированная и восстановленная окись графена (holey graphene frameworks, HGFs),

электролит — 1М EMIMBF₄/AN (1-ethyl-3-methylimidazoliumtetrafluoroborat/acetonitril),

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7$ В,

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 1.0$ мг/см², плотность материала электрода $\rho_{el} = 0.71$ г/см³,

толщина электродов $h_{el} = 0.0014$ см,

площадь электрода $S_{el} = 1$ см²,

эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, $R_A = 2.6$ Ом см² (текст, измерения по скачку напряжения $\Delta U = 0.26$ В при $I = 50$ А/г);

сепаратор — Gelgard 3501, $h_{sep} = 0.003$ см,

токосъемники — алюминиевая фольга, $h_{curr} = 0.002$ см,

объемная емкость электродов $C_{vol,el} \sim 170$ Ф/см³ (Fig 4 измерена при токе разряда 20 А/г)

Расчет целевых параметров.

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 1.04$ А/см² = 1040 А/г — ток короткого замыкания

$I_C = I_{short}/40 = 0.026$ А/см² = 26 А/г

(Принятая в расчете емкость $C_{vol,el} = 170$ Ф/см³ слегка завышена, так как измерена при более низком токе.)

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 2.7$ В, $C_{vol,el} = 170$ Ф/см³, $R_A = 2.6$ Ом см², $h_{el} = 0.0014$ см, $h_{sep} = 0.003$ см, $h_{curr} = 0.002$ см.

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2h_{el}}{2h_{el} + h_{sep} + 2h_{curr}} = 0.29.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{el} = 0.0028$ см³/см².

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{vol,el}h_{el}/2 = 0.12$ Ф/см².

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el}C_{vol,el}/4 = 12.3$ Ф/см³.

Удельная максимальная мощность: $P_{max,SC} = f_{el}U_0^2/(4R_A V_A) = 72.6$ кВт/л.

Удельная мощность разряда с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95,SC} = 0.112P_{max,SC} = 8.1 \text{ кВт/л.}$$

Удельная выделяемая энергия при разряде с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95,SC} = 0.024f_{el}C_{vol,el}U_0^2 = 8.6 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 0.31$ с.

6b. Суперконденсатор (holey graphene frameworks) в органическом электролите [11] (толстый электрод).

Из текста статьи и Supplementary materials находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — химически-перфорированная и восстановленная окись графена (holey graphene frameworks, HGFs),

электролит — 1М EMIMBF₄/AN (1-ethyl-3-methylimidazoliumtetrafluoroborat/acetonitril),

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7$ В,

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 10$ мг/см², плотность материала электрода $\rho_{el} = 0.71$ г/см³,

толщина электродов $h_{el} = 0.014$ см,

площадь электрода $S_{el} = 1$ см²,

внутреннее сопротивление конденсатора, $R_A = 3.6$ Ом см² (текст, нет дополнительных данных по току разряда);

сепаратор — Gelgard 3501, $h_{sep} = 0.003$ см,

токосъемники — алюминиевая фольга, $h_{curr} = 0.002$ см,

массовая емкость электродов $C_{wt,el} = 250$ Ф/г, измеренная при разряде симметричного СК с постоянным током разряда 2.5 А/г (Fig.S7c), что дает $C_{vol,el} = 177$ Ф/см³.

Расчет целевых параметров.

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 0.75$ А/см² = 75 А/г — ток короткого замыкания

$I_C = I_{short}/40 = 0.019$ А/см² = 1.9 А/г

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 2.7$ В, $C_{vol,el} = 177$ Ф/см³, $R_A = 3.6$ Ом см², $h_{el} = 0.014$ см, $h_{sep} = 0.003$ см, $h_{curr} = 0.002$ см.

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2h_{el}}{2h_{el} + h_{sep} + 2h_{curr}} = 0.8.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{el} = 0.028 \text{ см}^3/\text{см}^2$.

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{vol,el}h_{el}/2 = 1.24 \text{ Ф/см}^2$.

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el}C_{vol,el}/4 = 35.4 \text{ Ф/см}^3$.

Удельная максимальная мощность СК: $P_{max,SC} = f_{el}U_0^2/(4R_A V_A) = 14.5 \text{ кВт/л}$.

Удельная мощность разряда СК с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95,SC} = 0.112P_{max,SC} = 1.6 \text{ кВт/л}.$$

Удельная выделяемая энергия при разряде СК с эффективностью не ниже 95%:

$$E_{0.95,SC} = 0.024f_{el}C_{vol,el}U_0^2 = 24.8 \text{ Вт ч/л}.$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 4.46 \text{ с}$.

7. Суперконденсатор (activated microwave exfoliated graphene oxide), органический электролит [12].

Из текста статьи и Supplementary materials (Table S1) находим следующие параметры по результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора:

материал электродов — активированный эксфолиированный в микроволновой печи восстановленный оксид графена (activated microwave exfoliated graphene oxide (a-MEGO))

электролит — 1M BMIM BF₄/AN (1-butyl-3-methylimidazoliumtetrafluoroborat/acetonitril),

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7 \text{ В}$,

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 4 \text{ мг/см}^2$, плотность материала электрода $\rho_{el} = 0.36 \text{ г/см}^3$,

толщина электродов $h_{el} = 0.011 \text{ см}$,

площадь электрода $S_{el} = 0.785 \text{ см}^2$,

эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, $R_A = 3.3 \text{ Ом см}^2$ (Fig. S8 [12]);

сепаратор — Celgard® 3501, $h_{sep} = 0.003 \text{ см}$ (оценка),

токосъемники — покрытая углеродом алюминиевая фольга (Ehorack™ 0.5 mil 2— side coating), $h_{curr} = 0.002 \text{ см}$ (оценка),

массовая емкость электродов $C_{wt,el} = 165 \text{ Ф/г}$, измеренная при разряде симметричного СК с постоянным током разряда 5.7 А/г , соответствующая объемная емкость электродов оценена в $C_{vol,el} = 60 \text{ Ф/см}^3$ (текст). Отсюда находим плотность материала электрода: $\rho_{el} = 0.36 \text{ г/см}^3$.

Расчет целевых параметров

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 0.82 \text{ А/см}^2 = 205 \text{ А/г}$ — ток короткого замыкания

$$I_C = I_{short}/40 = 0.02 \text{ А/см}^2 = 5.1 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 2.7 \text{ В}$, $C_{vol,el} = 60 \text{ Ф/см}^3$, $R_A = 3.3 \text{ Ом см}^2$, $h_{el} = 0.011 \text{ см}$, $h_{sep} = 0.003 \text{ см}$, $h_{curr} = 0.002 \text{ см}$.

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2h_{el}}{2h_{el} + h_{sep} + 2h_{curr}} = 0.76.$$

Объем электродов на единицу площади сепаратора: $V_A = 2h_{el} = 0.022 \text{ см}^3/\text{см}^2$.

Емкость конденсатора на единицу площади сепаратора: $C_A = C_{vol,el}h_{el}/2 = 0.33 \text{ Ф/см}^2$.

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el}C_{vol,el}/4 = 11.4 \text{ Ф/см}^3$.

Удельная максимальная мощность СК: $P_{max,SC} = f_{el}U_0^2/(4R_A V_A) = 19 \text{ кВт/л}$.

Удельная мощность разряда СК с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95,SC} = 0.112P_{max,SC} = 2.1 \text{ кВт/л}.$$

Удельная выделяемая энергия при разряде СК с эффективностью не ниже 95%: $E_{0.95,SC} = 0.024f_{el}C_{vol,el}U_0^2 = 8 \text{ Вт ч/л}$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 1.09 \text{ с}$.

8. Суперконденсатор (активированная композитная углеродная нанобумага), органический электролит (наша работа)

По результатам испытаний электродного материала в лабораторной ячейке симметричного суперконденсатора имеем:

материал электродов — активированная композитная углеродная нанобумага (а-КУНБ, активированный наноккомпозит углеродного ксерогеля с УНТ), обр. #783

Электролит — 1 M DMP BF₄/AN (1,1-Dimethylpyrrolidinium tetrafluoroborate)/acetonitrile,

номинальное рабочее напряжение $U_0 = 2.7 \text{ В}$,

масса материала одного электрода на единицу площади сепаратора $m_A = 11 \text{ мг/см}^2$, плотность материала электродов $\rho_{el} = 0.41 \text{ г/см}^3$,

толщина электродов $h_{el} = 0.027$ см,

эквивалентное последовательное сопротивление $R_A = 1.5$ Ом см² (измерение по скачку напряжения при токе 40 мА/см²),

сепаратор — мат из стекловолокна, $h_{sep} = 0.008$ см,

токосборники из алюминиевой фольги, покрытые углеродом, $h_{curr} = 0.0025$ см

Удельная емкость электрода, измеренная при токе 0.040 А/см² равна 65.9 Ф/г или

$$C_{vol,el} = 27 \text{ Ф/см}^3.$$

Расчет целевых параметров.

Ток измерения, I_C , емкости при разряде конденсатора с мощностью $P_{0.95}$:

$I_{short} = U_0/R_A = 1.8$ А/см² = 164 А/г — ток короткого замыкания

$$I_C = I_{short} / 40 = 0.045 \text{ А/см}^2 = 4.1 \text{ А/г}$$

Характеристики конденсатора в расчете на объем сборки симметричного СК

$U_0 = 2.7$ В, $h_{el} = 0.027$ см, $h_{sep} = 0.008$ см, $h_{curr} = 0.0025$ см,

$$C_{vol,el} = 27 \text{ Ф/см}^3, R_A = 1.5 \text{ Ом см}^2,$$

Объемная доля электродов:

$$f_{el} = \frac{2h_{el}}{2h_{el} + h_{sep} + 2h_{curr}} = 0.8$$

$V_A = 2h_{el} = 0.054$ см³/см² — объем электродов на единицу площади сепаратора,

$C_A = C_{vol,el} h_{el} / 2 = 0.364$ Ф/см² — емкость конденсатора на единицу площади сепаратора,

Удельная емкость суперконденсатора: $C_{SC} = f_{el} C_{vol,el} / 4 = 5.4$ Ф/см³.

Удельная максимальная мощность: $P_{max,SC} = f_{el} U_0^2 / (4R_A V_A) = 18$ кВт/л.

Удельная мощность разряда с эффективностью не ниже 95%:

$$P_{0.95,SC} = 0.112 P_{max,SC} = 2.0 \text{ кВт/л.}$$

Удельная потребляемая энергия при мощности $P_{0.95}$ разряда:

$$E_{0.95,SC} = 0.024 f_{el} C_{vol,el} U_0^2 = 3.8 \text{ Вт ч/л.}$$

Постоянная времени конденсатора: $\tau_C = C_A R_A = 0.55$ с.

ЛИТЕРАТУРА

(НУМЕРАЦИЯ СОВПАДАЕТ С НУМЕРАЦИЕЙ В СТАТЬЕ)

4. A. Burke "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", *J. Power Sources*, 2000, v. 91, pp. 37–50.
7. A. Burke, M. Miller "Testing of electrochemical capacitors: capacitance, resistance, energy density, and power capability", *Electrochim. Acta*, 2010, v.55, pp. 7538–7548.
10. X. Yang, Ch. Cheng, Y. Wang, L. Qiu, D. Li "Liquid-Mediated Dense Integration of Graphene Materials for Compact Capacitive Energy Storage", *Science*, Vol. 341, Aug. 2013, pp. 534–537.
11. Y. Xu, Z. Lin, X. Zhong, X. Huang, N. O. Weiss, Y. Huang, X. Duan "Holey graphene frameworks for highly efficient capacitive energy storage", *Nat. Commun.*, 2014, vol. 5, p. 4554]
12. Y. Zhu, Sh. Murali, M.D. Stoller, K.J. Ganesh, W. Cai, P.J. Ferreira, A. Pirkle, R.M. Wallace, K.A. Cy-chosz, M. Thommes, D. Su, E.A. Stach, R.S. Ruoff "Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene", *Science*, 2011, v. 332(6037), pp. 1537–1541.
18. Bordjiba, M., Mohamedi, L., and Dao, H. Synthesis and electrochemical capacitance of binderless nanocomposite electrodes formed by dispersion of carbon nanotubes and carbon aerogels, *J. Power Sources*, 2007, vol. 172, p. 991.
22. Вольфович, Ю.М., Рычагов, А.Ю., Сосенкин, В.Е. Влияние пористой структуры на электрохимические характеристики суперконденсатора с нанокompозитными электродами на основе углеродных нанотрубок и резорцин-формальдегидного ксерогеля. *Электрохимия*. 2022. Т. 58. № 9. С. 496.