

УДК 621.316.91
 DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-79-89

Методология выбора тока резистивной балансировки ионисторов в модулях и накопителях АО «Элеконд» при заряде стабилизированным током

Т. Г. Чикуров, кандидат технических наук, доцент, АО «Элеконд», Сарапул, Россия
С. Л. Широких, АО «Элеконд», Сарапул, Россия

В рамках методологии представлены технические, технологические и методические решения для обеспечения балансировки и защиты от перенапряжения ионисторов в модулях с резистивной балансировкой с током намного меньшим стабилизированного зарядного тока. Для защиты от перенапряжения обосновано применение в модуле ионисторов с недозарядом до номинального напряжения. Показана взаимосвязь между напряжением недозаряда ионисторов и допустимым конечным уровнем девиации их емкости относительно средней емкости по модулю, при котором перенапряжение ионисторов не наступает. Предложена методика выбора напряжения недозаряда ионисторов в модуле и предельного начального разброса емкости ионисторов в модуле, основанная на статистической оценке результатов испытаний ионисторов на безотказность. Определено оптимальное напряжение недозаряда 0,2 В и максимальное начальное технологическое отклонение емкости ионисторов в модуле ±2,5 %, обеспечивающие конечный разброс их емкости относительно средней по модулю не выше ±(6,5...7,0) % и, как результат, защиту от перенапряжения при любых токах балансировки в течение всей наработки. Ток балансировки в этом случае предложено рассчитывать исходя из требуемого времени снижения напряжения на ионисторах только для обеспечения равенства их наработки. Установлена функциональная зависимость, обеспечивающая расчет тока и коэффициента балансировки для случая превышения 7,0 % барьера отклонения емкости ионисторов в модуле при наработке. Представленные в рамках методологии технические, технологические и методические решения, обеспечивающие в совокупности выбор тока балансировки, апробированы при разработке модулей ионисторных промышленных многофункциональных измерительных преобразователей АО «Элеконд», которые показали удовлетворительную стойкость и прочность параметров к воздействию климатических и механических факторов, а также при испытаниях на сохраняемость и безотказность. Методология выбора тока и коэффициента балансировки распространена на разработку высоковольтных ионисторных блоков в составе высоковольтных ионисторных накопителей.

Ключевые слова: ионистор, балансировка, накопитель электрической энергии, ячейка активной балансировки, перенапряжение, резистивная шунтирующая цепь.

Введение

Ионисторы производства АО «Элеконд» обеспечивают гигантскую электрическую емкость и минимальное эквивалентное последовательное сопротивление в широком интервале внешних воздействий. Однако, подобно импортным аналогам, они имеют ограниченное номинальное напряжение $U_{n,i} = (2,5 \dots 3,0)$ В [1]. Поэтому для получения эквивалентной емкости с повышенным номинальным напряжением ионисторы соединяют в последовательные [2, 3] и последовательно-параллельные [4] цепи, формируя конструкции уровня модуль, блок или батарея, характеризуемые как конденсаторы [5], но по уровню накапливаемой энергии – как накопители электрической энергии [6, 7], порой функционально замещающие даже аккумуляторы [8–10].

Обеспечение номинальных режимов работы ионисторов в составе модулей, в первую оче-

редь по напряжению заряда, позволит при эксплуатации модуля сохранить электрические параметры в границах заданных норм, т. е. обеспечить надежность [11]. Поскольку перенапряжение является итогом неравномерного распределения напряжения заряда на последовательно соединенных ионисторах модуля из-за девиации их емкости относительно среднего или номинального значения, то для защиты ионисторов в модуле применяют балансировку [12, 13]. Балансировка ионисторов (выравнивание напряжения) достигается тем, что параллельно каждому ионистору в модуле подключается ячейка балансировки [14].

Из разных методов балансировки, связанных, например, с применением DC-конвертеров [15], многообмоточных трансформаторов, подключаемых балансирующих конденсаторов и прочих устройств [16], в силу простоты и дешевизны выделяют и активно применяют метод, основан-

ный на использовании резистивной шунтирующей цепи [17]. Она либо подключена постоянно (пассивная балансировка), либо подключается через транзисторный ключ в момент превышения порогового значения напряжения (U_{por}) заряда ионистора (активная балансировка) [18].

В модуле, номинальное напряжение (U_{n_m}) которого равно сумме номинальных напряжений (U_{n_i}) последовательно соединенных ионисторов, недопущение перенапряжения возможно лишь при реализации полного шунтирования, достигаемого при равенстве тока балансировки (I_b) и максимального тока заряда модуля (I_z), т. е. при выполнении равенства

$$K_b = I_z / I_b = 1, \quad (1)$$

где K_b – коэффициент балансировки.

Однако максимальные зарядные токи ионисторных модулей варьируются от единиц ампер до сотен, поэтому выбор полного шунтирования при балансировке связан с введением мощных транзисторных ключей и силовых тепловыделяющих токоограничивающих резистивных элементов, а также методов, обеспечивающих гарантированное срабатывание ключей шунтирующих цепей [19].

Необходимость решать задачи снижения габаритов, массы, а также тепло- и токоотвода узлов балансировки при разработке ионисторных модулей мотивирует к переходу от полного шунтирования к частичному, при котором ток I_b настолько мал, что обеспечивается неравенство $K_b \gg 1$.

Существенное снижение тока I_b допускает метод заряда модуля через токоограничивающее сопротивление (Агупов В. В., Разуваев Ю. Ю., Чайка М. Ю., Чопоров О. Н. Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов // Вестник ВГТУ. 2011. Т. 7, № 10. С. 85–88) за счет экспоненциального спада тока I_z и его равенства току I_b к моменту достижения напряжения срабатывания балансировки (U_{por}). Метод характеризуется низким КПД и низкой скоростью заряда, поэтому более востребован метод заряда от источника со стабилизированным током. В этом случае ток I_z не уменьшается по мере заряда модуля, и защита ионисторов производится за счет тока I_b и недозаряда ионисторов до номинального напряжения (ΔU_b), но при снижении номинального напряжения модуля в целом.

Методика выбора напряжения ΔU_b , тока I_b , соответственно, и коэффициента K_b при реализации частичного шунтирования недостаточно отражена в технической литературе, несмотря на острую необходимость и значимость при

разработке ионисторных модулей. Поэтому актуальна задача выработки методологически обоснованных технических и технологических решений по выбору тока (коэффициента) балансировки и напряжения недозаряда ионисторов в разрабатываемых отечественных ионисторных модулях при зарядке стабилизированным током.

Цель исследования – разработка методологии выбора токов (коэффициента) балансировки ионисторов в составе модуля при балансировке резистивной шунтирующей цепью с частичным шунтированием и при зарядке ионисторного накопителя стабилизированным током.

Опираясь на методы статистического анализа (статистического наблюдения и выборки), а также схемотехнического и математического моделирования представим решение этой задачи.

Разработка методологии выбора тока резистивной балансировки ионисторов в цепи модуля при зарядке стабилизированным током

Анализ применения ионисторов в модуле с недозарядом

При применении в модуле ионисторных узлов балансировки с током I_b много меньше зарядного тока I_z , при заряде модуля до номинального напряжения U_{n_m} , равного сумме номинальных напряжений ионисторов U_{n_i} , ионистор с наименьшей емкостью (C_{min}) даже со сработавшей схемой балансировки будет испытывать перенапряжение. После окончания заряда процесс устранения перенапряжения и/или выравнивания напряжения на ионисторах в зависимости от тока I_b может достигать десятки часов при пассивной балансировке, а при активной – от долей секунды до сотен и более. Поскольку перенапряжение ионисторов недопустимо, то методология выбора тока резистивной балансировки строится на решении двух задач:

1) выработка методов недопущения перенапряжения ионисторов в составе модуля при любых токах заряда;

2) установление обоснованной методики расчета тока I_b и коэффициента K_b .

Перенапряжения ионистора с емкостью C_{min} в модуле можно избежать, если недозаряжать ионисторы до номинального напряжения на величину ΔU_b за счет занижения номинального напряжения модуля уже на этапе разработки. То есть напряжение ионисторного модуля, принимаемое за номинальное (U_{n_m}), уменьшится на величину $N\Delta U_b$ и будет определяться выражением $U_{n_m} = N(U_{n_i} - \Delta U_b)$, где N – число ионисторов в модуле.

Оценим влияние величины ΔU_b на допустимое отклонение емкости (ΔC_{\min}) ионистора с емкостью C_{\min} относительно средней емкости ионисторов по модулю (C_{sr}). При этом напряжение заряда на ионисторе емкостью C_{\min} не должно превысить напряжение U_{n_i} равное, например, 2,7 В. Также считаем, что $K_b \gg 1$, т. е. ток балансировки ионистора I_b по сравнению с постоянным стабилизированным током заряда I_z настолько мал, что в процессе заряда (по крайне мере до времени t_{sr}) его можно не учитывать (см. рис. 1).

Примем начальное напряжение заряда ионистора $U_1 = 0$, а напряжение U_2 – за рабочее напряжение ионисторов, равное напряжению U_{por} . При этом напряжение U_2 меньше номинального напряжения ионистора U_{n_i} на величину ΔU_b . Тогда ионистор с емкостью C_{\min} и гипотетический ионистор с емкостью C_{sr} в составе модуля заряжаются от напряжения U_1 до напряжения U_2 (см. рис. 1), без учета токов утечки, за время $t_{\min} = C_{\min}(U_2 - U_1)/I_z = C_{\min} \Delta U/I_z$ и $t_{sr} = C_{sr}(U_2 - U_1)/I_z = C_{sr} \Delta U/I_z$.

Время, за которое будет дозаряжаться ионистор с емкостью C_{\min} после достижения напряжения U_{por} , без учета тока балансировки

$$\Delta t = (t_{sr} - t_{\min}) = (C_{sr} - C_{\min}) \Delta U / I_z. \quad (2)$$

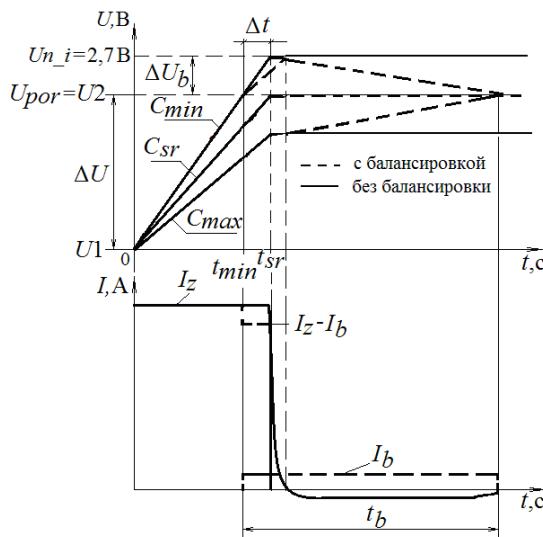


Рис. 1. Диаграмма изменения напряжения заряда ионисторов в модуле

Fig. 1. Diagram of the change in the charge voltage of the ionistors in the module

Напряжение, на которое дозарядится ионистор с емкостью C_{\min} , пока остальные ионисторы модуля будут продолжать заряжаться,

$$\Delta U_b = I_z \Delta t / C_{\min}. \quad (3)$$

Подставим в (3) выражение (2) вместо Δt и с учетом, что $\Delta C_{\min} = (C_{sr} - C_{\min})$, получим $\Delta U_b = \Delta C_{\min} \Delta U / C_{\min}$, откуда видно, что отношение напряжений определяется как $\Delta U / \Delta U_b = C_{\min} / \Delta C_{\min} = (C_{sr} / \Delta C_{\min}) - 1$. Так как $U_{n_i} = \Delta U + \Delta U_b$, то можно записать

$$\Delta U_b / U_{n_i} = \Delta C_{\min} / C_{sr}. \quad (4)$$

Определим по выражению (4) допустимое отклонение емкости ионисторов в модуле, т. е. отношение $\Delta C_{\min} / C_{sr}$ для разных значений напряжения ΔU_b (см. табл. 1). Отметим, что ионистор емкостью C_{\min} при полном заряде модуля заряжается до напряжения не более $U_{n_i} = 2,7$ В, т. е. без перенапряжения.

Таблица 1. Зависимость $\Delta C_{\min} / C_{sr}$ от напряжения ΔU_b при $U_{n_i} = 2,7$ В

Table 1. Dependence $\Delta C_{\min} / C_{sr}$ on voltage ΔU_b at $U_{n_i} = 2,7$ V

ΔU_b , В	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$\Delta C_{\min} / C_{sr}$, %	1,85	3,7	5,55	7,4	9,25	11,1

Из выражения (4) и таблицы 1 видно, что с ростом отношения $\Delta C_{\min} / C_{sr}$ растет и требуемый недозаряд, что, однако, снижает номинальное напряжение модуля U_{n_m} . Поэтому необходим выбор оптимального напряжения недозаряда ΔU_b , обеспечивающий допустимый уровень отклонения емкости $\Delta C_{\min} / C_{sr}$.

Выбор напряжения недозаряда ΔU_b с учетом влияния основных воздействующих факторов на отклонение емкости ионисторов

Технология сборки модуля включает подбор ионисторов с заданным разбросом емкости ΔC_i , обеспечивающим наименьшее начальное значение ΔC_{\min} в модуле. В ходе эксплуатации модуля емкости ионисторов снижаются из-за наработки на 30 %, из-за климатических и механических факторов – на 10 %. Учитывая преобладание наработки в спаде емкости, дадим оценку ее влияния на девиацию ΔC_i ионисторов в модуле относительно емкости C_{sr} .

При испытаниях наработка имитируется ускоренными процессами деградации при потенциостатической или циклической работе ионисторов при повышенных температурах по ГОСТ 25359–82. Для оценки ее влияния воспользуемся результатами периодических испы-

таний ионисторов на безотказность, проведенных в потенциостатическом режиме при температуре $+65^{\circ}\text{C}$. Тогда 500 ч дают имитацию наработки 8,3 года, 1500 ч – 25 лет.

Для оценки соответствия ионисторов требованиям технических условий по наработке оценивают предельное отклонение емкости $-\Delta C_{500}$ и $-\Delta C_{1500}$ от исходного C_{i0} (см. рис. 2). Но при разработке ионисторных модулей и в контексте данной работы интерес представляют отклонения емкости ионисторов $\pm\Delta Ci_{500}$ и $\pm\Delta Ci_{1500}$ относительно первоначального отклонения емкости ионисторов $\pm\Delta Ci_0$.

Для анализа приняты результаты измерения емкости C_i после наработки 500 ч и 1500 ч для четырех типов ионисторов семейства K58-2x

и одного типа семейства K58-3x с выборками от 5 до 15 шт. Примеры зависимости спада емкости ионисторов $\Delta C(t)$ в выборках при наработке представлены на рисунке 3.

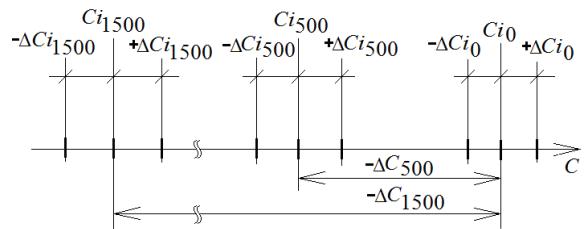
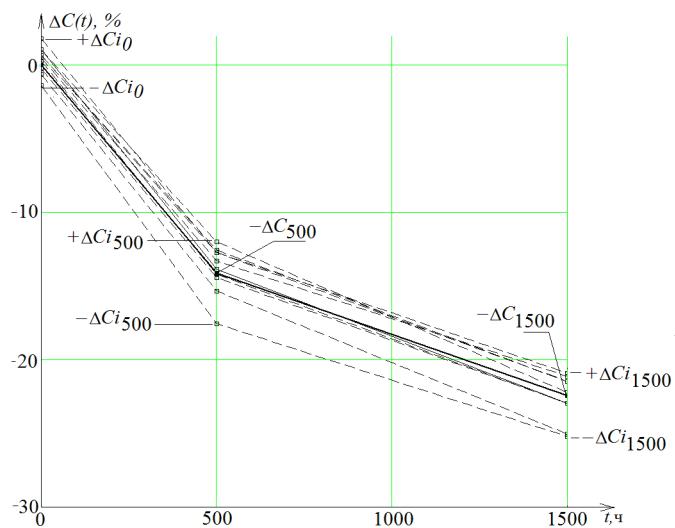
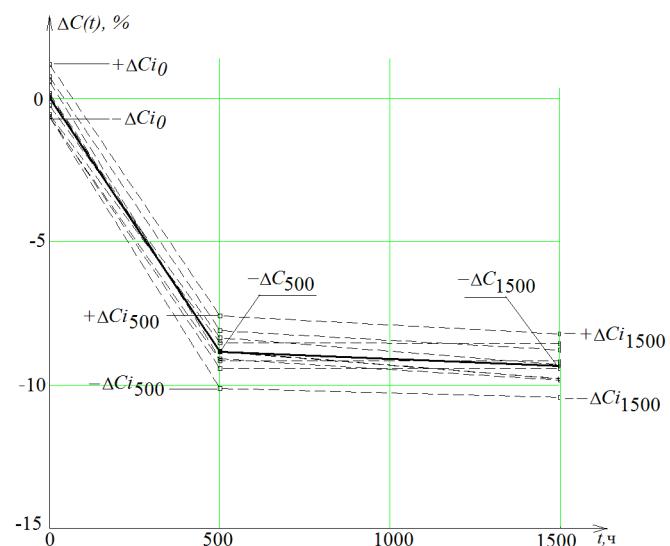


Рис. 2. Диаграмма отклонения емкости ионисторов при наработке

Fig. 2. Diagram of the deviation of the ionistor capacity during operating time



a



b

Рис. 3. Пример зависимости спада емкости ионисторов в выборках при наработке: *a* – K58-2x, *b* – K58-3x

Fig. 3. An example of the dependence of the decrease in the capacity of ionistors in samples during operating rime: *a* - K58-2x, *b* - K58-3x

Наблюдаемое систематическое снижение емкости ионисторов при ресурсных потенциостатических испытаниях объясняется совокупностью факторов и процессов: процессом разложения электролита на газы и нерастворимые вещества, которые постепенно забивают микропоры в углероде, препятствуя диффузионному накоплению в них заряда [20]; постепенной потерей части наиболее активной полярной дисперсной фазы, ведущей к снижению суммарного электрокинетического потенциала и диэлектрической проницаемости в нестационарной капиллярной объемно-пористой дисперсной системе, где ионистор выступает подобно емкостному преобразователю [21].

Оценка кривых спада емкости от времени каждого ионистора в выборке подтверждает их экспоненциальную зависимость [22] от времени наработки, в нашем случае удовлетворительно описываемую выражением $\Delta C(t) = \Delta C_0 e^{-t/(A+Bt)}$, где A и B – коэффициенты (A – от 1300 до 1700 со средним значением близким к предельному времени испытания $t = 1500$ ч; B – от 2,5 для K58-2x до 9,5 для K58-3x).

С целью минимизации системного влияния факторов, присущих разным партиям электролита, при испытаниях ионисторы в каждой выборке приняты из одной партии. Поэтому по мере нарастания времени эксплуатации дисперсия кривых спада емкости ($\pm\Delta C_i$) обусловлена явлениями скорее случайными и второстепенными, присущими отдельным ионисторам: герметичность сборки, локальное отличие примеси в электролите (особенно воды), наличие на поверхности угольных электродов функциональных групп (ПФГ), к примеру групп частиц угольного порошка разного размера, влияющих на локальную порозность. Такие факторы технологически нормируются заданием пределов их допуска в исходном сырье, поэтому логично и саму дисперсию кривых изменения емкости ионисторов нормировать по предельному отклонению, в первую очередь по ΔC_{\min} .

В этом случае из графиков на рисунках 3 и 4 очевидно, что влияние второстепенных факторов достигает максимума к 500 ч, но со временем на фоне основных факторов исчерпывает себя и стабилизируется к концу контролируемого периода в 1500 ч, приводя в итоге, даже при снижении C_{sr} , к снижению отношения $\Delta C_{\min}/C_{sr}$.

Статистическая оценка отклонения емкости ионисторов ΔC_i от емкости C_{sr} по полученным измерениям емкости C_i , приведенных ранее выборок, дана в таблице 2. Изменение дисперсии емкости ионисторов за 500 и 1500 ч, характери-

зующее девиацию отклонения емкости ионисторов ΔC_i от среднего значения емкости C_{sr} в выборке, имеет значения от 1,14 до 1,92 (графа 5 табл. 2). Это означает необходимость не менее 2-кратного запаса на наработку по отклонению $\Delta C_i/C_{sr}$ относительно начального.

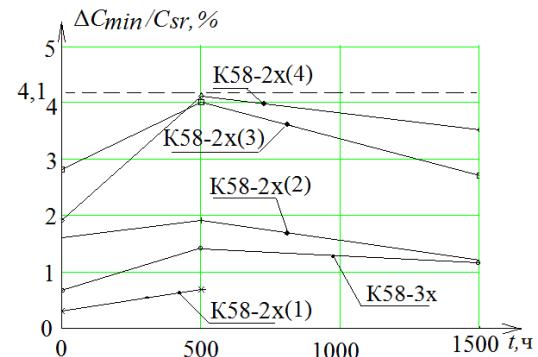


Рис. 4. Динамика изменения предельного отклонения $\Delta C_{\min}/C_{sr}$ при наработке для четырех типов ионисторов

Fig. 4. Dynamics of variation of deviation $\Delta C_{\min}/C_{sr}$ during operating time

Анализ предельных числовых значений емкости, приведенных в измерительных выборках (см. рис. 4), показывает предельное отклонение минимальной емкости относительно средней емкости ионисторов в выборке $\Delta C_{\min}/C_{sr}$ до 4,1 % при 500 ч наработки против начального 1,9 % для ионисторов K58-2x(4), что составило 2,16 раз (округлим до 2,2). В случае, если при подборе ионисторов обеспечить начальный разброс емкости до $\Delta C_i/C_{sr} = \pm 2,5 \%$, то максимальное отклонение $\Delta C_{\min}/C_{sr}$ может достигнуть 5,5 %. Тогда из таблицы 1 можно было бы принять значение $\Delta C_{\min}/C_{sr} = 5,55 \%$, что соответствует $\Delta U_b = 0,15$ В. Однако напряжение смещения компараторов схем балансировки может достигать ± 50 мВ, поэтому желательно ΔU_b принять 0,2 В, что обеспечит максимальное отклонение $\Delta C_{\min}/C_{sr}$ до 7,4 % (с запасом до 7,0 %) приnomинальном напряжении ионисторов $U_{n_i} = 2,7$ В, а при перспективных ионисторах с $U_{n_i} = 3,0$ В, соответственно, $\Delta C_{\min}/C_{sr} = 6,6 \%$ (с запасом до 6,0 %).

Таким образом, с учетом начального технологического разброса в модуле $\Delta C_i/C_{sr}$ не более $\pm 2,5 \%$ оптимально выбрать напряжение недозаряда ионисторов $\Delta U_b = 0,2$ В. Это позволит за время эксплуатации ионисторов в составе модуля ионистору с емкостью C_{\min} гарантированно заряжаться без перенапряжения.

Таблица 2. Отклонение емкости ионисторов ΔC_i от емкости C_{sr} после наработкиTable 2. Deviation of the ionistor capacity ΔC_i from the capacity C_{sr} after operation

Наработка, ч	Количество, n , шт.	Математическое ожидание, C_{sr}, Φ	Дисперсия, D, Φ^2	$D_{500}/D_0, D_{1500}/D_0$
1	2	3	4	5
K58-2x(1) 2,7 В $\times 5$ $\Phi +50\% -20\%$				
0	5	6,59	$0,17 \cdot 10^{-3}$	—
500	5	5,8	$0,25 \cdot 10^{-3}$	1,47
K58-2x(2) 2,7 В $\times 5$ $\Phi +50\% -20\%$				
0	9	5,52	$0,34 \cdot 10^{-3}$	—
500	9	4,66	$0,53 \cdot 10^{-3}$	1,55
1500	9	4,80	$0,42 \cdot 10^{-3}$	1,25
K58-2x(3) 2,7 В $\times 5$ $\Phi \pm 20\%$				
0	15	5,42	$1,08 \cdot 10^{-3}$	—
500	15	4,64	$1,65 \cdot 10^{-3}$	1,53
1500	15	3,85	$0,66 \cdot 10^{-3}$	0,61
K58-2x(4) 2,7 В $\times 5$ $\Phi \pm 20\%$				
0	15	5,38	$0,59 \cdot 10^{-3}$	—
500	15	4,61	$1,14 \cdot 10^{-3}$	1,92
1500	15	4,17	$0,85 \cdot 10^{-3}$	1,44
K58-3x 2,7 В $\times 3300$ $\Phi \pm 20\%$				
0	10	2992	49,2	—
500	10	2728	55,9	1,14
1500	10	2713	50,2	1,02

Выбор тока балансировки и коэффициента балансировки при разбросе отношения $\Delta C_i/C_{sr}$ менее $\pm 7,0\%$ после наработки

С учетом напряжения недозаряда $\Delta U_b = 0,2$ В ионисторы с разбросом $\Delta C_{min}/C_{sr}$ ниже 6,0 % номинальным напряжением 2,7 и 3,0 В гарантированно заряжаются без перенапряжения. Однако ионистор с емкостью C_{min} , заряженный до U_{n_i} , по сравнению с другими ионисторами в модуле будет иметь напряжение заряда выше примерно на 0,2 В. Это значит, что гарантированная наработка этого ионистора будет в два-три раза ниже [11], чем у прочих ионисторов в модуле. И в этом случае балансировка нужна для того, чтобы обеспечить равные напряжения ионисторов в модуле для их равной наработки.

Значение тока балансировки I_b в данном случае выбирается исходя из необходимого времени (t) снижения напряжения заряда на шунтируемом ионисторе емкостью C_{min} по выражению

$$I_b = \Delta U_b C_{min} / t. \quad (5)$$

После выбора тока I_b его значение в схеме балансировки, как активной, так и пассивной, задается сопротивлением резистора R_b по выражению $R_b = U_{por} / I_b$.

Разработка методики расчета тока I_b при разбросе $\Delta C_{min}/C_{sr}$ свыше 7,0 %

В случаях вероятного превышения отношением $\Delta C_{min}/C_{sr}$ семипроцентного барьера при

напряжении $\Delta U_b = 0,2$ В коэффициент K_b должен быть уменьшен, а ток I_b , соответственно, увеличен для компенсации части тока I_z и недопущения превышения напряжения U_{n_i} на ионисторе с емкостью C_{min} . Такой вариант вероятен либо при невозможности сгруппировать ионисторы в составе модуля с начальным разбросом в пределах до $\pm 2,5\%$, либо при разработке модулей повышенной надежности (с расширенным допуском $\Delta C_i/C_{sr}$) для применения в изделиях специального назначения, например, модулях МИК ЕВАЯ.673623.025ТУ и МИЧ ЕВАЯ.673623.026ТУ производства АО «Элеконд».

Точечное определение тока I_b или коэффициента K_b активной балансировки при условии $\Delta U_b = 0,2$ В проводили для разброса $\Delta C_i/C_{sr}$ равного $\pm 20, \pm 10$ и $\pm 7,0\%$ методом схемотехнического моделирования работы модуля в программе Microcap. Для этого применялась схема модуля с номинальным напряжением $U_{n_m} = 30$ В, заряд которого производили от источника с выходным стабилизатором тока. В схеме поочередно применялись ионисторы емкостью 3, 5, 10, 25, 50 и 100 Ф с напряжением заряда $\Delta U_i = 2,5$ В при $U_{n_i} = 2,7$ В. Компьютеры схем балансировки настроены на напряжение $U_{por} = 2,51 \dots 2,53$ В.

Задача моделирования заключается в подборе тока шунтирующей цепи I_b , обеспечивающем вкупе с напряжением $\Delta U_b = 0,2$ В защиту ионистора от перенапряжения свыше 2,7 В при мак-

симальном токе I_z и разбросе емкости $\Delta Ci/C_{sr}$ до ± 20 , ± 10 и ± 7 %. Изменение тока I_b обеспечивалось подбором сопротивлений R_b резисторов в цепях ионисторных узлов балансировки. Контроль пикового напряжения заряда проводился по графической зависимости напряжения U_{Cmin} на ионисторе с емкостью C_{min} (см. рис. 5).

Моделирование производилось по следующему алгоритму:

- в цепи модуля выбираем ионисторы емкостью C_{min} и C_{max} и настраиваем, соответственно, на емкость -20 % и $+20$ % от номинального значения. Емкости прочих ионисторов устанавливаем на номинал, принимаемый за C_{sr} ;

- заряжаем модуль от источника со стабилизованным токовым выходом и током I_z , равным максимальному постоянному току I_{max} ;

- сопротивление резисторов схем балансировки R_b подбираем так, чтобы ионистор с емкостью C_{min} заряжался до напряжения не выше 2,7 В, как видно на рисунке 5;

- определяем ток I_b и рассчитываем коэффициент K_b по выражению (1).

Результаты измерения представлены в таблице 3.

Таблица 3. Определение тока I_b и коэффициента K_b при $\Delta Ci/C_{sr} = \pm(7...20)$ %

Table 3. Determination of current I_b and coefficient K_b at $\Delta Ci/C_{sr} = \pm(7...20)$ %

Емкость ионисторов, C , Ф	Ток заряда, I_z , А	Ток балансировки, I_b , А			Коэффициент балансировки, K_b		
		при $\Delta Ci/C_{sr}$			при $\Delta Ci/C_{sr}$		
		± 20 %	± 10 %	± 7 %	± 20 %	± 10 %	± 7 %
3	2,9	1,7	0,4	0,053	1,705	7,25	54,717
5	3,8	2,25	0,6	0,065	1,688	6,33	58,462
10	5,6	3,52	0,88	0,093	1,591	6,36	60,21
25	6,1	3,82	0,95	0,108	1,622	6,421	56,481
50	10	5,9	1,5	0,18	1,694	6,667	55,556
100	17	8,6	2,6	0,285	1,97	6,538	59,649

Дальнейшее увеличение ряда емкостей ионисторов в рамках моделирования провести затруднительно из-за необходимости стабильной идеализированной модели стабилизатора тока для ионисторов: 330 Ф до 40 А и 3300 Ф до 210 А. Поэтому на большие емкости ионисторов результаты экстраполируем.

Используя программу MathCad, приведем график зависимости коэффициента балансировки от разброса емкости ионисторов в модуле $K_b(\Delta Ci/C_{sr})$ (см. рис. 6). Из графика видно, что зависимость близка к гиперболической и график $K_b(\Delta Ci/C_{sr})$ можно описать моделирующим выражением

$$K_b m = 1 / (((C_i - C_{sr}) / C_{sr}) \cdot 4,71 - 0,313), \quad (7)$$

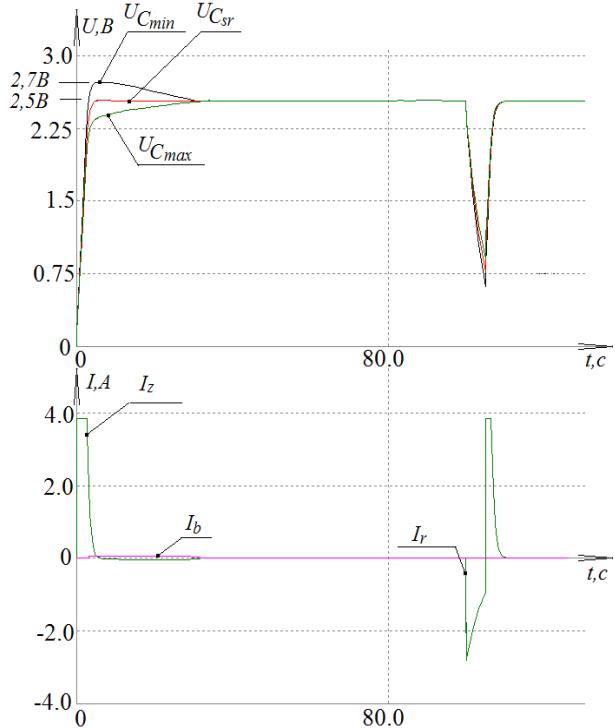


Рис. 5. Диаграммы напряжений и тока модуля, где I_r – ток разрядки

Fig. 5. Voltage and current diagrams of the module, where I_r - discharge current

а величину тока балансировки для любого разброса $\Delta Ci/C_{sr}$ свыше 7,0 % выражением

$$I_b = I_z / (K_b m) = I_z \left(((C_i - C_{sr}) / C_{sr}) \cdot 4,71 - 0,313 \right). \quad (8)$$

Анализ результатов

Исследования показали, что для решения задачи недопущения перенапряжения ионисторов при любых токах заряда методология выбора тока балансировки ионисторов должна прежде всего выявлять взаимосвязь между начальным технологическим разбросом емкостей ионисторов в модуле при заданном напряжении недозаряда ΔU_b и конечным эксплуатационным разбросом $\Delta Ci/C_{sr}$, не приводящим к перенапряжению ионисторов в модуле.

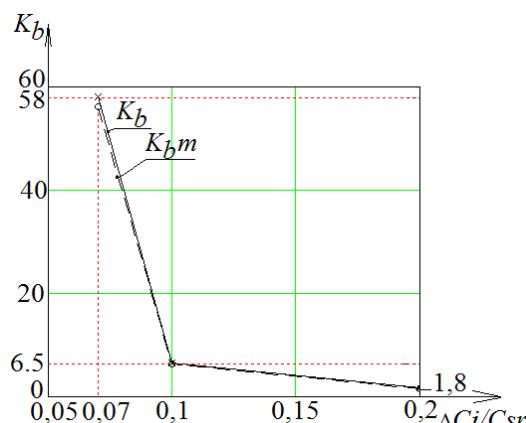


Рис. 6. Зависимость коэффициента балансировки $K_b (\Delta Ci/C_{sr})$

Fig. 6. Dependence of the balancing coefficient $K_b (\Delta Ci/C_{sr})$

В связи с этим предложена методика выбора напряжения ΔU_b ионисторов в модуле и максимального уровня начального разброса $\Delta Ci/C_{sr}$, основанная на статистической оценке результатов испытаний ионисторов на безотказность. Учитывая взаимосвязь между начальным разбросом $\Delta Ci/C_{sr}$ и конечным, считаем необходимым наряду с контролем снижения емкости при испытаниях ионисторов на безотказность рекомендовать проведение первоначальной оценки и последующего статистического контроля разброса $\Delta Ci/C_{sr}$ при периодических испытаниях ионисторов либо модулей, прошедших испытание на безотказность.

Проведенная статистическая оценка результатов испытаний ионисторов на безотказность показала, что применение ионисторов в модуле с заданным начальным разбросом емкостей, а также эксплуатация модулей в регламентированных условиях обеспечивают расчетные граничи разброса $\Delta Ci/C_{sr}$. В этом случае применение балансировки направлено исключительно на поддержание равенства напряжений зарядки ионисторов в модуле, что, в свою очередь, служит гарантой равенства характеристик их надежности, а установленная методика расчета и выбора тока балансировки опирается на задаваемое время снижения напряжения.

Невозможность задания начального технологического отклонения емкости ионисторов в модуле, например $\pm 2,5\%$, либо отклонения в ходе эксплуатации модуля ведут к превышению расчетных границ разброса $\Delta Ci/C_{sr}$. В этом случае предложена методика определения тока I_b по установленной функциональной

зависимости от $\Delta Ci/C_{sr}$, а ток I_b выполняет как функцию выравнивания напряжения заряда ионисторов, так и защиты от перенапряжения путем компенсации некоторой части тока заряда I_z модуля.

Представленная методология определения тока и коэффициента балансировки успешно апробирована при разработке модулей ионисторных промышленных маломощных (МИП-1, МИП-2, МИП-3) и мощных (МИП-4) на АО «Элеконд». Для обеспечения длительного равномерного ресурса ионисторов использованы резистивные схемы балансировки:

- пассивные – для модулей ионисторных очехленных МИП-1 напряжением 5 и 7,5 В, предназначенных в качестве накопителей электрической энергии для маломощных мобильных устройств. При определении тока балансировки I_b выбраны значения тока, превышающие токи утечки ионисторов на порядок величины. Среднее значение коэффициента балансировки для ионисторов емкостью от 1 до 50 Ф, обеспечивающее время балансировки до 200 минут, составило $K_b > 10000$;

- активные – для модулей МИП-2…МИП-4 номинальным напряжением от 5 до 120 В на ионисторах емкостью от 5 до 4700 Ф, предназначенные для обеспечения кратковременного электропитания в качестве буферного источника в изделиях с заданной прочностью к механическим и климатическим факторам. Среднее значение коэффициента балансировки для ионисторов, обеспечивающее время выравнивания напряжения до 15 с, составило $K_b \approx 60$.

Результаты предварительных испытаний разработанных модулей МИП показали удовлетворительные результаты по стойкости и прочности к воздействию климатических и механических факторов, а также по сохраняемости и безотказности.

Помимо низковольтных ионисторных модулей методология подбора тока и коэффициента K_b распространена на разработку ионисторных блоков в составе высоковольтных ионисторных модулей, а именно: тягового привода электротранспорта номинальным напряжением до 900 В; резервного импульсного и/или длительного электропитания цепей электроподстанций ПС 35 кВ и выше. Аналогично предыдущему варианту в высоковольтных модулях использованы ионисторы К58-35 емкостью 3300 Ф со схемами балансировки с $K_b \approx 60$, не допускающими перенапряжения и обеспечивающими время выравнивания напряжения до 15 с.

Выводы

Разработанная методология определения тока и коэффициента балансировки при заряде ионисторного модуля стабилизированным током обеспечивает защиту ионисторов от перенапряжения при переводе резистивных узлов балансировки от полного шунтирования к частичному.

Разработанная методика выбора напряжения недозаряда ΔU_b ионисторов в сочетании с определением границ разброса $\Delta C_i/C_{sr}$ на основе статистической оценки обеспечивают полную наработки ионисторов в модуле без угрозы их перенапряжения. Минимальный коэффициент балансировки K_b при этом составляет не ниже 60 единиц, а методика определяет широкий диапазон значений, обусловленный выбором времени балансировки.

При необходимости защиты ионисторов при вероятном завышении нормы девиации емкости ионисторов относительно C_{sr} при условии наличия $\Delta U_b = 0,2$ В коэффициент балансировки выбирается менее 60. Расчет K_b в этом случае опирается на полученную математическую модель гиперболической зависимости K_b от отклонения емкости.

Библиографические ссылки

- Горбачев В., Кочемасов В., Хорев С. Ионисторы // Компоненты и технологии. 2020. № 7 (228). С. 10–15. EDN HOTGOU.
- Ibanez F.M. (2018) Analyzing the Need for a Balancing System in Supercapacitor Energy Storage Systems: IEEE Trans Power Electron, vol. 33, no. 3, pp. 2162–2171. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2697406
- Zheng Z., Wang K., Li Y., Liu H. and Chang F. (2018) A Modular-Cascaded Active-Balanced Storage System for Electric Transportation: IEEE Transportation Electrification Conf., pp. 1–6.
- Матвеев А. И., Андреев С. А. Динамическая коммутация ионисторов в источниках питания элементов телеметрических систем // Аграрный научный журнал. 2019. № 1. С. 76–81.
- Parvini Y., Siegel J.B., Stefanopoulou A.G. and Vahidi A. (2016) Supercapacitor electrical and thermal modeling identification and validation for a wide range of temperature and power applications: IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 3, pp. 1574–1585. DOI: 10.1109/TIE.2015.2494868
- Степаненко В. П., Мальшаков И. Н. Перспективы применения в горной промышленности суперконденсаторных накопителей и возобновляемых источников энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2017. № 6. С. 153–163.
- Шахтанов С. В., Сбитнев Е. А., Семенов Д. А. Применение ионисторов в устройствах бесперебойного питания // Вестник связи. 2022. № 11. С. 24–31. EDN ZMLGBZ.
- Гусев Ю. П., Смотров Н. Н., Чо Г. Ч. Применение ионисторов в системах оперативного постоянного тока для сглаживания провалов напряжения // Электротехника. 2017. № 10. С. 65–69. EDN ZNAAMT.
- Lashina E.N., Kozlov A.A. (2022) Ionistor as an alternative to the battery // Оригинальные исследования. 2022. Т. 12, №. 5. С. 267–273. EDN UBUTSP.
- История и разработки ВСКБ «Рикон» / В. К. Агупов, В. В. Агупов, Ю. М. Денисов, С. А. Акулинин // Энергия – XXI век. 2017. № 1 (97). С. 84–100.
- Акулинин С. А., Наролина Т. С., Проскурина И. С. Вопросы надежности систем аккумуляции и хранения энергии на основе модулей суперконденсаторов // Энергия – XXI век. 2018. № 2 (102). С. 17–32.
- Особенности и применение ионисторов в электротехнике / С. Б. Бибиков, А. А. Мальцев, Б. В. Кошелев, А. В. Гелиев // Практическая силовая электроника. 2016. № 3 (63). С. 44–55.
- Shili S., Hijazi A., Sari A., Lin-Shi X. and Venet P. (2017) Balancing Circuit New Control for Supercapacitor Storage System Lifetime Maximization: IEEE Trans. Power Electron, vol. 32, no. 6, pp. 4939–4948. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2602393
- Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P. (2017) A Silicon-Organic Hybrid Voltage Equalizer for Supercapacitor Balancing: IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst., vol. 7, no. 1, pp. 114–122.
- Fan S., Duan J., Sun L. and Han Y. (2017) The balancing system of super capacitor based on active clamped forward converter: International Conf. on Circuits, Devices and Systems, pp. 29–33.
- Prashant Singh B.T., Phaneendra Babu Bobba, Suresh K. (2019) Extensive review on Supercapacitor cell voltage balancing: E3S Web Conference, vol. 87, pp. 1–7.
- Li H., Peng J., He J., Huang Z., Pan J. and Wang J. (2018) Synchronized Cell-Balancing Charging of Supercapacitors: A Consensus-Based Approach: IEEE Trans Industrial Electron, vol. 65, no. 10, pp. 8030–8040.
- Стародубцева В. А., Шкляев М. О. Активная балансировка суперконденсаторов // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 1. С. 41–46. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-41-46
- Чикуров Т. Г., Кибардин М. В., Широких С. Л. Особенности организации и применения ячеек активной балансировки с расширенным диапазоном срабатывания ключей шунтирующих цепей в ионисторных модулях и накопителях акционерного общества «Элеконд» // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 3. С. 68–77. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-68-77. EDN RJLOZA.
- Вольфович Ю. М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57, № 4. С. 197–238. DOI: 10.31857/S0424857021040101. EDN AWUGYP.
- Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г. Диэлькометрия нестационарных дисперсных систем. Часть 1. Ин-

формационные аспекты // Аналитика и контроль. 2000. Т. 4, № 1. С. 31–36. EDN KYPRUN.

22. Изучение ресурсной стабильности углей в составе электродов суперконденсаторов с органическим электролитом / Е. А. Киселева, И. В. Янилкин, А. В. Григоренко [и др.] // Электрохимия. 2017. Т. 53, № 11. С. 1403–1410. DOI: 10.7868/S0424857017110019. EDN UODMQX.

Reference

1. Gorbachev V., Kochemasov V., Horev S. (2020) [Ionistors]. *Komponenty i tekhnologii*, № 7 (228), pp. 10-15 (in Russ.).
2. Ibanez F.M. (2018) Analyzing the Need for a Balancing System in Supercapacitor Energy Storage Systems: IEEE Trans Power Electron, vol. 33, no. 3, pp. 2162-2171. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2697406
3. Zheng Z., Wang K., Li Y., Liu H. and Chang F. (2018) A Modular-Cascaded Active-Balanced Storage System for Electric Transportation: IEEE Transportation Electrification Conf., pp. 1-6.
4. Matveev A.I., Andreev S.A. (2019) [Dynamic switching of ionistors in power sources of elements of telemetry systems]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal*, no. 1, pp. 76-81 (in Russ.)
5. Parvini Y., Siegel J.B., Stefanopoulou A.G. and Vahidi A. (2016) Supercapacitor electrical and thermal modeling identification and validation for a wide range of temperature and power applications: IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 3, pp. 1574-1585. DOI: 10.1109/TIE.2015.2494868
6. Stepanenko V.P., Mal'shakov I.N. (2017) [Prospects for the use of supercapacitor storage devices and renewable energy sources in the mining industry]. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten*, no. 6, pp. 153-163 (in Russ.)
7. Shahtanov S.V., Sbitnev E.A., Semenov D.A. (2022) [The Use of Ionistors in uninterruptible power supply devices]. *Vestnik svjasy*, no. 11, pp. 24-31 (in Russ.).
8. Gusev U.P., Smotrov N.N., Cho G.Ch. (2017) [The use of ionistors in operational DC systems to smooth out voltage dips]. *Elektrotehnika*, no. 10, pp. 65-69 (in Russ.).
9. Lashina E.N., Kozlov A.A. (2022) [Ionistor as an alternative to the battery]. *Originalnie issledovaniya*, vol. 12, no. 5, pp. 267-273.
10. Agupov V.K., Agupov V.V., Denisov U.M., Akulinin S.A. (2017) [History and developments of VSKB "Ricon"]. *Energija - XXI vek*, № 1 (97), pp. 84-100 (in Russ.).
11. Akulinin S.A., Narolina T.S., Proskurina I.S. (2018) [Reliability issues of energy storage and storage systems based on supercapacitor modules]. *Energiya - XXI vek*, no. 2 (102), pp. 17-32 (in Russ.).
12. Bibikov S.B., Mal'cev A.A., Koshelev B.V., Gelev A.V. (2016) [Features and application of ionistors in electrical engineering]. *Prakticheskaya silovaya elektro-nika*, no. 3 (63), pp. 44-55 (in Russ.).
13. Shili S., Hijazi A., Sari A., Lin-Shi X. and Venet P. (2017) Balancing Circuit New Control for Supercapaci-tor Storage System Lifetime Maximization: IEEE Trans. Power Electron, vol. 32, no. 6, pp. 4939-4948. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2602393
14. Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P. (2017) A Silicon-Organic Hybrid Voltage Equalizer for Supercapacitor Balancing: IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst., vol. 7, no. 1, pp. 114-122.
15. Fan S., Duan J., Sun L. and Han Y. (2017) The balancing system of super capacitor based on active clamped forward converter: International Conf. on Circuits, Devices and Systems, pp. 29-33.
16. Prashant Singh B.T., Phaneendra Babu Bobba, Suresh K. (2019) Extensive review on Supercapacitor cell voltage balancing: E3S Web Conference, vol. 87, pp. 1-7.
17. Li H., Peng J., He J., Huang Z., Pan J. and Wang J. (2018) Synchronized Cell-Balancing Charging of Super-capacitors: A Consensus-Based Approach: IEEE Trans Industrial Electron, vol. 65, no. 10, pp. 8030-8040.
18. Starodubceva V.A., Shklyaev M.O. (2017) [Ac-tive balancing of supercapacitors]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 15, no. 1, pp. 41-46 (in Russ.).
19. Chikurov T.G., Kibardin M.V., Shirokih S.L. (2021) [Features of the organization and application of active balancing cells with an extended response range of shunt circuit keys in supercapacitor modules and storage devices of the Elekond joint-stock company]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 24, no. 3, pp. 68-77. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-68-77. EDN RJLOZA (in Russ.).
20. Volkovich Yu.M. (2021) [Electrochemical supercapacitors (review)]. *Jelektrohimija*, vol. 57, no. 4, pp. 197-238. DOI: 10.31857/S0424857021040101. EDN AWUGYP (in Russ.).
21. Podkin Yu.G., Chikurov T.G. (200) [Dielcometry of non-stationary disperse systems. Part 1. Information aspects]. *Analitika i kontrol'*, vol. 4, no. 1, pp. 31-36. EDN KYPRUN (in Russ.).
22. Kiseleva E.A., Yanilkin I.V., Grigorenko A.V. (2017) [Study of resource stability of coals in the composition of electrodes of supercapacitors with organic electrolyte]. *Jelektrohimija*, vol. 53, no. 11, pp. 1403-1410. DOI: 10.7868/S0424857017110019. EDN UODMQX (in Russ.).

Methodology for Selecting the Ionistor Balancing Current in Modules and Storage Devices of JSC “Elecond” for Stabilized Current Charging

T.G. Chikurov, PhD in Engineering, Associate Professor, Joint-Stock Company “Elecond”, Sarapul, Russia
S.L. Shirokikh, Joint-Stock Company “Elecond”, Sarapul, Russia

Technical, technological and methodological solutions are presented within the framework of the methodology to ensure balancing and overvoltage protection of ionistors in resistive balancing modules with a current much less than the stabilized charging current. To protect against overvoltage, the use of ionistors in the module with undercharging and up to the rated voltage is justified. The relationship between the ionistor undercharge voltage and the allowable final level of their capacitance deviation with respect to the average modulo capacitance eliminating ionistor overvoltage, is shown. A method for selecting the ionistor undercharge voltage modulo value and the ionistor maximum initial capacity spread modulo value, based on a statistical assessment of the of ionistor reliability test results, is proposed. The optimal undercharge voltage of 0.2 V and the maximum initial technological deviation of the ionistor capacitance modulo value of $\pm 2.5\%$, providing a final spread of their capacitance relative to the average modulo no more than $\pm (6.5 \dots 7.0)\%$ and, as a result, protection against overvoltage at any balancing currents during the entire operating time, were determined. In this case, it is proposed to calculate the balancing current based on the required time of ionistor voltage reduction only to ensure equality of their operating time. A functional dependence that provides the calculation of the current and the balancing coefficient in case of exceeding 7.0 % of the ionistor capacitance deviation barrier modulo value during operation has been established. The technical, technological and methodological solutions presented within the framework of the methodology to ensure the choice of balancing current, were tested during the development of ionistor industrial modules MIP of “Elecond” JSC and showed satisfactory resistance and strength of parameters to the effects of climatic and mechanical factors, as well as during tests for durability and reliability. The methodology of current and balancing coefficient selection is extended to the development of high-voltage ionistor units as part of high-voltage ionistor storage devices.

Keywords: ionistor, balancing, electric energy storage device, active balancing cell, overvoltage, resistive shunt circuit.

Получено 14.01.2025

Образец цитирования

Чикуров Т. Г., Широких С. Л. Методология выбора тока резистивной балансировки ионисторов в модулях и накопителях АО «Элеконд» при заряде стабилизированным током // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 79–89. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-79-89

For Citation

Chikurov T.G., Shirokikh S.L. (2025) [Methodology for Selecting the Ionistor Balancing Current in Modules and Storage Devices of JSC “Elecond” for Stabilized Current Charging]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 1, pp 79-89 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-79-89