

6. F a c t o r y Standard 09110.46.500–05. Transformers Operating Instructions in the Belarusian Energy System. Minsk, Belenergo, 2006. 80 p. (in Russian).
7. T h e C h o i c e Oil-Immersed Power Transformers in Their Allowable Emergency Overload. *Technical Circular VNIPI “Tyazhpromelektroproekt” No 351–86 on 20.01.1986*. Moscow, 1986. 1 p. (in Russian).
8. B u i l d i n g Standards 174–75. Instructions for Designing Industrial Power. Moscow, State Committee USSR Council of Ministers for Construction, Stroyizdat, 1976. 57 p. (in Russian).
9. F a c t o r y Standard 8080ТМ-Т1. Standards of Deciding the Power Transformers. Moscow, Energosetproect, 1989. 7 p. (in Russian).
10. *Methodological Guidelines for the Selection of the Power Transformers Rated Power 10/0,4 kV Substations for Agricultural Purposes, Taking Into Account the Climatic Conditions of Belarus*. Minsk, Belenergosetproect, 1994. 17 p. (in Russian).
11. S t a t e Standard 11677–85. Power Transformers. General Specifications. Moscow, USSR State Committee on Standards, 1990. 58 p. (in Russian).
12. I n t e r n a t i o n a l Standard 60076-7. Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers. IEC 60076-7:2005 (English). Geneva, International Electrotechnical Commission, 2005. 62 p.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 11.11.2014

УДК 621.316

## **ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ**

**Асп. ОЛЕКСЮК И. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: [ilya.oleks@gmail.com](mailto:ilya.oleks@gmail.com)

Токопроводящие жилы силовых электрических кабелей должны быть стойкими к воздействию токов короткого замыкания, значения которых зависят от материала жилы, площади ее поперечного сечения, свойств изоляции кабеля, температуры окружающей среды, а также времени протекания тока короткого замыкания (1 и 3–4 с при испытаниях на динамическую и термическую стойкость). Установки для испытания токами короткого замыкания кабелей напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами должны обеспечивать ток динамической стойкости 56,82 кА, ток термической стойкости 11,16 кА. Такие значения испытательных токов наилучшим образом обеспечивают конденсаторы. Использование традиционных конденсаторных установок повлечет большие затраты на строительство и эксплуатацию отдельного помещения. В качестве источника питания испытательных установок, где требуются токи значениями десятки килоампер, целесообразно использовать конденсаторы с двойным электрическим слоем – суперконденсаторы.

При проведении испытаний токами короткого замыкания напряжение на изоляции не стандартизировано, поэтому силовые электрические кабели с изоляцией на 10 кВ токами термической и динамической стойкости не запрещено испытывать при напряжении менее 10 кВ. График изменения напряжения суперконденсатора во времени состоит из двух участков: емкостного и резистивного. Емкостный участок представляет собой изменение напряжения вследствие изменения энергии в суперконденсаторе.

Резистивный участок демонстрирует изменение напряжения из-за наличия активного сопротивления суперконденсатора.

Предложен алгоритм определения необходимого числа суперконденсаторов для испытания силовых электрических кабелей на напряжение 10 кВ токами термической и динамической стойкости. Показано, что при использовании суперконденсаторов в установках испытания кабелей токами короткого замыкания площадь помещения, занимаемого суперконденсаторами, более чем на порядок меньше площади, занимаемой традиционными конденсаторами.

**Ключевые слова:** суперконденсатор, силовой электрический кабель, термическая и динамическая стойкость.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

## **SUPER-CAPACITOR APPLICATION IN ELECTRICAL POWER CABLE TESTING FACILITIES IN THERMAL ENDURANCE AND MECHANICAL BRACING TESTS**

**OLEKSYUK I. V.**

*Belarusian National Technical University*

The current-carrying cores of the electrical power cables should be resistant to effects of short-circuit currents whose values depend on the material of the core, its cross-sectional area, cable insulation properties, environment temperature, and the duration of the short-circuit current flow (1 and 3–4 sec. when tested for thermal endurance and mechanical bracing). The facilities for testing the 10 kV aluminum core cables with short-circuit current shall provide mechanical-bracing current 56,82 kA and thermal endurance current 11,16 kA. Although capacitors provide such values of the testing currents to the best advantage, utilizing conventional capacitor-units will involve large expenditures for erecting and running a separate building. It is expedient to apply super-capacitors qua the electric power supply for testing facilities, as they are capacitors with double-electrical layer and involve the current values of tens of kilo-amperes.

The insulation voltage during short-circuit current testing being not-standardized, it is not banned to apply voltages less than 10 kV when performing short-circuit thermal endurance and mechanical bracing tests for electrical power cables of 10 kV. The super-capacitor voltage variation-in-time graph consists of two regions: capacitive and resistive. The capacitive part corresponds to the voltage change consequent on the energy change in the super-capacitors. The resistive part shows the voltage variation due to the active resistance presence in the super-capacitor.

The author offers the algorithm determining the number of super capacitors requisite for testing 10 kV-electrical power cables with short-circuit currents for thermal endurance and mechanical bracing. The paper shows that installation of super-capacitors in the facilities testing the cables with short-circuit currents reduces the area needed for the super-capacitors in comparison with conventional capacitors more than by one order of magnitude.

**Keywords:** super capacitor, electrical power cable, thermal endurance and mechanical bracing.

Fig. 1. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Токопроводящие жилы силовых электрических кабелей должны быть стойкими к воздействию токов короткого замыкания (КЗ), значения которых зависят от материала жилы, площади ее поперечного сечения, свойств изоляции кабеля, температуры окружающей среды, а также времени протекания тока КЗ (1 и 3–4 с при испытаниях на динамическую и термическую стойкость) [1, 2]. Установки для испытания токами КЗ кабелей напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами должны обеспечивать ток динамической стойкости 56,82 кА, ток термической стойкости 11,16 кА [3]. Такие значения испытательных токов наилучшим образом обеспечивают

конденсаторы [4, 5]. Современные конденсаторные установки выпускаются на напряжение 0,4 кВ в электротехнических шкафах, причем в одном шкафу с габаритами 800×500×2000 мм размещается конденсаторная установка мощностью до 350 квар. При необходимости в большей мощности увеличивается число шкафов. Так, для получения тока 56,82 кА необходимо 107 таких шкафов, а с учетом коридоров обслуживания конденсаторные установки займут помещение размером 7,5×14,4 м, т. е. площадью 108,0 м<sup>2</sup>.

Таким образом, использование традиционных конденсаторных установок повлечет большие затраты на строительство и эксплуатацию отдельного помещения. В качестве источника питания испытательных установок, где требуются токи значениями десятки килоампер, целесообразно использовать конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы), известные под названиями суперконденсаторы, гиперконденсаторы (Япония), ультраконденсаторы (Германия, США), электрохимические конденсаторы (Франция, Канада). В ионисторах энергия накапливается в процессе зарядки за счет поляризации двойных электрических слоев на границах «анод – электролит» и «катод – электролит» [6]. Алгоритм выбора ионисторов для установки по испытанию кабелей токами КЗ приведен далее в статье.

Изменение напряжения суперконденсатора во времени состоит из двух участков (рис. 1 [7]) – емкостного и резистивного. Емкостный участок представляет собой изменение напряжения вследствие изменения энергии в суперконденсаторе, а резистивный участок – изменение напряжения из-за наличия активного сопротивления суперконденсатора. График напряжения суперконденсатора при постоянном токе разряда  $i$  изображен на рис. 1.

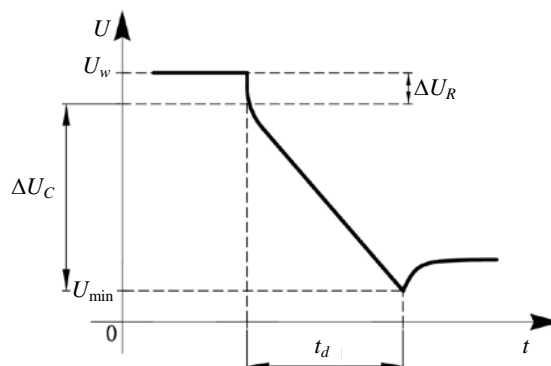


Рис. 1. Изменение напряжения разряда суперконденсатора во времени:  
 $U_w$  – рабочее напряжение;  $\Delta U_R$  – падение напряжения из-за наличия активного сопротивления;  $\Delta U_C$  – падение напряжения вследствие разряда суперконденсатора;  
 $U_{\min}$  – минимальное напряжение после разряда;  $t_d$  – время разряда

Емкостный участок графика напряжения суперконденсатора характеризуется его изменением во времени

$$i = C \frac{dU_C}{dt}, \quad (1)$$

где  $i$  – ток, протекающий через суперконденсатор;  $C$  – емкость суперконденсатора;  $dU_C/dt$  – изменение напряжения во времени.

Выразим из формулы (1) изменение напряжения

$$dU_C = i \frac{di}{C}. \quad (2)$$

Изменение напряжения на резистивном участке графика напряжения описывается известной формулой

$$\Delta U_R = iR, \quad (3)$$

где  $\Delta U_R$  – падение напряжения на активном сопротивлении суперконденсатора;  $R$  – активное сопротивление суперконденсатора.

Суммарное изменение напряжения во время заряда или разряда суперконденсатора включает в себя обе составляющие (резистивную и емкостную). Используя формулы (2) и (3), запишем выражение для суммарного изменения напряжения

$$dU = i \frac{dt}{C} + iR. \quad (4)$$

Ионистор, как правило, характеризуется невысоким рабочим напряжением (до 2,7 В) и пиковым односекундным током до нескольких килоампер, поэтому отдельные элементы нужно соединять параллельно (для получения более высоких токов) и последовательно (для увеличения рабочего напряжения).

Емкость батареи ионисторов находим по формуле

$$C = C_0 \frac{N_{\text{пар}}}{N_{\text{посл}}}, \quad (5)$$

где  $C_0$  – емкость одного элемента;  $N_{\text{пар}}$  – число ветвей батареи, соединенных параллельно;  $N_{\text{посл}}$  – число элементов каждой ветви, соединенных последовательно.

Активное сопротивление батареи ионисторов

$$R = R_0 \frac{N_{\text{посл}}}{N_{\text{пар}}}, \quad (6)$$

где  $R_0$  – активное сопротивление одного элемента (ионистора).

Некоторые суперконденсаторы компании Maxwell Technologies представлены в табл. 1 [8].

При проведении испытаний токами КЗ напряжение на изоляции не стандартизировано, т. е. испытание силовых электрических кабелей с изоляцией на 10 кВ токами термической и динамической стойкости не запрещено испытывать при напряжении менее 10 кВ.

Процесс выбора суперконденсаторов для испытательной установки разделяется на два этапа: первый – определение исходных данных; второй – расчет параметров и проверка по граничным условиям. На первом этапе выбираем параметры, которые требует испытательная установка:  $U_p$ ,  $U_{\text{min}}$  – рабочее и минимальное напряжения установки соответственно;  $I_p$  – рабочий ток (ток испытания кабелей,  $I_p = 56,82$  кА [3, 9, 10]). Проанализировав

технические характеристики суперконденсаторов, представленных в табл. 1, становится очевидным, что одного конденсатора для питания испытательной установки будет недостаточно, поэтому их нужно будет собирать в батарею. Так как напряжение при проведении испытаний в стандартах не оговорено, то его удобно взять таким, чтобы номинальное напряжение отдельного суперконденсатора соответствовало рабочему напряжению установки. В этом случае батарея конденсаторов будет состоять только из параллельно соединенных элементов и процесс выбора несколько облегчается. Из табл. 1 выбираем суперконденсатор ВМ0D0063 P125 В04 со следующими характеристиками:  $U_n = 125$  В;  $I_{\max} = 1800$  А;  $R_0 = 18$  м·Ом;  $C_0 = 63$  Ф. В качестве минимального напряжения условно примем величину, равную 10 % от номинального, т. е.  $U_{\min} = 0,1 \cdot 125 = 12,5$  В.

Таблица 1

**Технические характеристики суперконденсаторов компании Maxwell Technologies**

Наименование	Номинальная емкость, $C_0$ , Ф	Номинальное напряжение $U_n$ , В	Сопротивление постоянному току $R_0$ , м·Ом	Зарядный ток, мА	Пиковый односекундный ток, А	Масса, кг	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм
ВМ0D0058 E016 В02	58,0	16	22,0	25,0	200	0,63	226,5×49,5×76,0
ВМ0D0500 P016 В01 (В02)	500,0	16	2,1	5,2 (170,0)	2000	5,51	418×68×179
ВМ0D0083 P048 В01	83,0	48	10,0	3,0	1100	10,30	418×191×179
ВМ0D0165 P048 В01	165,0	48	6,3	5,2	1900	13,50	418×194×179
ВМ0D0130 P056 В03	130,0	56	8,1	120,0	1800	18,00	683×177×175
ВМ0D0094 P075 В02	94,0	75	13,0	50,0	1600	25,00	515×263×220
ВМ0D0063 P125 В04 (В08)	63,0	125	18,0	10,0	1800	60,50	619×425×265
ВМ0D0006 E160 В02	5,8	160	220	25,0	200	5,10	367×235×79

На втором этапе определяем падение напряжения на конденсаторе, которое задано параметрами испытательной установки:

$$dU = 125 - 12,5 = 112,5 \text{ В.}$$

По формулам (4)–(6) вычисляем число суперконденсаторов, необходимых по условию допустимого падения напряжения:

$$112,5 = 56820 \frac{1}{N_{\text{пар}} \cdot 63} + 56820 \cdot \frac{0,018}{N_{\text{пар}}}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{пар}} = n_U$  – количество элементов, выбранное по условию допустимого падения напряжения.

Из формулы (7) получаем  $n_U = 17,1$ , т. е. по условию падения напряжения требуется не менее 18 суперконденсаторов выбранной серии. Но каждый конденсатор характеризуется максимальным односекундным током, что требует проверки по максимальному току:

$$n_I = \frac{I_p}{I_{\max}} = \frac{56820}{1800} = 31,56 \approx 32 \text{ шт.} \quad (8)$$

Требуемое количество элементов определяется как максимальное значение из двух полученных по условиям (7) и (8)

$$n = \max\{n_U, n_I\}. \quad (9)$$

По формуле (8) получаем  $n = 32$  шт. для испытания каждой жилы, для трех жил необходимо 96 таких элементов. Таким образом, для питания установки испытания силовых электрических кабелей токами термической и динамической стойкости необходимо 96 суперконденсаторов марки ВМОД0063 Р125 В04. Размеры одного элемента составляют 265×619×425 мм, а в связи с тем, что суперконденсаторы не требуют обслуживания, их можно разместить в любом помещении либо контейнере с внутренним объемом 6,7 м<sup>3</sup>.

### ВЫВОДЫ

1. Показано, что при использовании суперконденсаторов в установках испытания кабелей токами короткого замыкания площадь помещения, занимаемого суперконденсаторами, более чем на порядок меньше площади, занимаемой традиционными конденсаторами.

2. Предложен алгоритм определения необходимого числа суперконденсаторов для испытания силовых электрических кабелей на напряжение 10 кВ токами термической и динамической стойкости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия: ГОСТ 18410–73. – Введ. 01.01.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 23 с.
2. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия: ГОСТ 16442–80. – Введ. 01.01.1982. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 22 с.
3. Короткевич, М. А. Испытания кабельной продукции на термическую и динамическую стойкость / М. А. Короткевич, И. В. Олексюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 1. – С. 25–32.
4. Пичугина, М. Т. Мощная импульсная энергетика / М. Т. Пичугина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 98 с.
5. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут [и др.]; под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
6. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство [Электронный ресурс] / В. Кузнецов [и др.] // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – Режим доступа: [http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2005\\_6\\_12.php](http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2005_6_12.php). – Дата доступа: 28.12.2014.
7. Maxwell Technologies. Application Note. Boostcap Ultracapacitor. Cell Sizing. Document No 10073627, Rev 3 [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/10073627.3\\_how\\_to\\_determine\\_the\\_appropriate\\_size.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/10073627.3_how_to_determine_the_appropriate_size.pdf). – Date of access: 20.12.2014.
8. Maxwell Technologies. Product Comparison Matrix [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/maxwell\\_technologies\\_product\\_comparison\\_matrix.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/maxwell_technologies_product_comparison_matrix.pdf). – Date of access: 20.12.2014.
9. Муфты для силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно: ГОСТ 13781.0–86. – Введ. 24.06.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 18 с.
10. Муфты термоусаживаемые для силовых кабелей на напряжение 10 кВ. Технические условия: ТУ РБ 500030832.001–2000. – Введ. 15.06.2000. – Минск: БГПА, 2000. – 25 с.

## REFERENCES

1. State Standards 18410–73. Power Cables with Impregnated Paper Insulation. Standard Specifications. Moscow, Publishing House of Standards, 1975. 23 p. (in Russian).
2. State Standards 16442–80. Power Cables with Plastic Insulation. Standard Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 2000. 22 p. (in Russian).
3. Korotkevich, M. A., & Oleksyuk, I. V. (2010) Testing of Cables on the Thermal and Dynamic Stability. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 1, 25–32 (in Russian).
4. Pichgina, M. T. (2005) *Powerful Pulsed Power Engineering*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 98 p. (in Russian).
5. But, D. A., Alievskii, B. L., Miziurin, S. R., & Vasiukevich, P. V. (1991) *Energy Storage Devices*. Moscow, Energoatomizdat. 400 p. (in Russian).
6. Kuznetsov, V., Pan'kina, O., Machkovskaia, N., Shuvalov, E., & Vostrikov, I. (2005) Electric Double Layer Capacitors (Ultracapacitors): Development and Production. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], № 6. Available at: [http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2005\\_6\\_12.php](http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2005_6_12.php) (Accessed 28.12.2014).
7. Maxwell Technologies. Application Note. Boostcap Ultracapacitor. Cell Sizing. Document No 10073627, Rev 3. Available at: [http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/10073627.3\\_how\\_to\\_determine\\_the\\_appropriate\\_size.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/10073627.3_how_to_determine_the_appropriate_size.pdf). (Accessed 20 December 2014).
8. Maxwell Technologies. Product Comparison Matrix [Digital Resource]. Available at: [http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/maxwell\\_technologies\\_product\\_comparison\\_matrix.pdf](http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/maxwell_technologies_product_comparison_matrix.pdf). (Accessed 20 December 2014).
9. State Standards 13781.0–86. Boxes for Power Cables with Voltage Up to and Including 35 kV. Moscow, Publishing House of Standards, 1986. 18 p. (in Russian).
10. Technical Specifications of the Republic of Belarus 500030832.001–2000. Heat-shrinkable Boxes for Power Cables for a Voltage of 10 kV. Minsk: Belarusian State Polytechnic Academy, 2000. 25 p. (in Russian).

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 29.10.2014

УДК 621.316.13; 621.316.06

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВТОНОМНОЙ РАБОТЫ УЧАСТКОВ СЕТИ SMART GRID 0,4 кВ

Докт. техн. наук, проф. СИВОКОБЫЛЕНКО В. Ф.<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук, доценты НИКИФОРОВ А. П.<sup>1)</sup>, БУРЛАКА В. В.<sup>2)</sup>,  
ПОДНЕБЕННАЯ С. К.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Донецкий национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Приазовский государственный технический университет

E-mail: vburlaka@rambler.ru

Проанализированы методы, влияющие на режим автономной работы участков сети с распределенными источниками электроэнергии (распределенной генерацией), подключение которых к энергосистеме осуществляется посредством специальных распределенных инверторов. Выявлены причины, по которым автономная работа является нежелательной; рассмотрены последствия автономно-несинхронной работы участков сети при изоляции. Эти проблемы характерны для современных электрических распределительных сетей Smart Grid. Для выявления изолированного режима использовали пассивные и активные методы. Пассивные методы – это только наблюдение за напряжением и/или частотой в точке общего присоединения, и если измеряемые величины