

УДК 621.316

**ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ  
НА ТЕРМИЧЕСКУЮ И ДИНАМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ**

Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А., инж. ОЛЕКСЮК И. В.

*Белорусский национальный технический университет*

В Республике Беларусь имеются четыре завода по производству кабельной арматуры и два – по производству силовых электрических кабелей. Кабельная продукция должна пройти обязательную сертификацию для установления ее потребительских качеств. Проведение сертификации требует больших затрат денежных средств и времени, измеряемого иногда годами (особенно при проведении ресурсных испытаний).

В объем испытаний кабельной продукции входят испытания на: устойчивость к воздействию климатических факторов окружающей среды (мак-

симальной температуры воздуха, равной 40 °С; минимальной температуры воздуха – минус 40 °С; влажного воздуха при относительной влажности 98 %), термическую и динамическую стойкость, ресурсные испытания (по результатам которых определяется срок службы) и другие испытания, для проведения которых необходимо создание специальной лаборатории, отсутствующей в настоящее время в Республике Беларусь.

Рассмотрим возможность создания установок для проведения испытаний на термическую и динамическую стойкость.

Испытания муфт на стойкость к воздействию токов короткого замыкания проводят пропусканием через муфты трехфазных переменных токов частоты 50 Гц.

Ток термической стойкости ( $I_T$ ) определяется по формуле [1]

$$I_T = \frac{kF}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от материала жил, начальной температуры нагрева жил кабеля (до короткого замыкания) и конечной температуры нагрева при коротком замыкании,  $A \cdot c^{1/2} / \text{мм}^2$ , и равен 88 – для кабелей с бумажно-масляной изоляцией, 75 – для кабелей с изоляцией из поливинилхлоридного пластика, 62 – для кабелей с изоляцией из полиэтилена или самозатухающего полиэтилена, 93 – для кабелей с изоляцией из вулканизированного полиэтилена [1];  $F$  – сечение жилы кабеля,  $\text{мм}^2$ ;  $t$  – время протекания тока при коротком замыкании, 4 с – при определении термической стойкости, 1 с – при определении динамической стойкости.

Число испытаний – не менее трех. Интервал времени между испытаниями определяется временем охлаждения жил кабеля до начальной (длительно допустимой) температуры нагрева.

Действующее значение периодической составляющей тока динамической стойкости  $I_d$  вычисляется по формуле [1]

$$I_d = \sqrt{2} \cdot 1,8kF = 2,54kF. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены значения тока термической и динамической стойкости для кабелей с алюминиевыми жилами напряжением 10 кВ в зависимости от вида изоляции и площади поперечного сечения жил, вычисленные по (1) и (2).

Действующее значение периодической составляющей тока  $I_d$  за время протекания не должно отличаться на  $\pm 10\%$  от значения тока динамической стойкости (табл. 1).

Мощность источника питания установки для проведения испытаний определяется по формуле

$$S = \sqrt{3}UI, \quad (3)$$

где  $U$  – номинальное напряжение кабеля ( $U = 10$  кВ);  $I$  – наибольший ток ( $I = 56,82$  кА).

Мощность источника питания, необходимая для проведения испытаний на устойчивость к воздействию токов:

- термической стойкости

$$S_{\text{терм}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 11,16 = 193,3 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

- динамической стойкости

$$S_{\text{дин}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 56,82 = 984,2 \text{ МВ}\cdot\text{А}.$$

Таблица 1

Значения токов термической и динамической стойкости

Площадь поперечного сечения жил кабеля, мм <sup>2</sup>	Ток термической и динамической стойкости, кА, для кабелей с изоляцией из			
	пропитанной бумаги	поливинилхлоридного пластика	полиэтилена и самозатухающего полиэтилена	вулканизированного полиэтилена
16	0,70/3,58	0,60/3,05	0,50/2,53	0,74/3,79
25	1,10/5,60	0,94/4,77	0,78/3,95	1,16/5,92
35	1,54/7,84	1,31/6,68	1,09/5,52	1,63/8,29
50	2,20/11,20	1,88/9,55	1,55/7,89	2,33/11,84
70	3,08/15,68	2,63/13,36	2,17/11,05	3,26/16,57
95	4,18/21,28	3,56/18,14	2,95/14,99	4,42/22,49
120	5,28/26,88	4,50/22,91	3,72/18,94	5,58/28,41
150	6,60/33,60	5,63/28,64	4,65/23,67	6,98/35,51
185	7,92/40,32	6,75/34,37	5,58/28,41	8,37/42,61
240	10,56/53,76	9,00/45,82	7,44/37,88	11,16/56,82

**Примечание.** В числителе приводятся значения тока термической стойкости, в знаменателе – тока динамической стойкости.

Значение энергии, необходимой для проведения испытаний на устойчивость к воздействию токов короткого замыкания при номинальном напряжении, можно определить по формуле

$$W = S\Delta t, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – время протекания тока короткого замыкания по испытуемому образцу, с.

Значение энергии для проведения испытаний токами:

- термической стойкости

$$W_{\text{терм}} = 193,3 \cdot 4 = 773,2 \text{ МДж};$$

- динамической стойкости

$$W_{\text{дин}} = 984,2 \cdot 1 = 984,2 \text{ МДж}.$$

Известны следующие накопители механической и электрической энергии [2]: емкостные, индуктивные, ударные, взрывные. В табл. 2 приведены основные характеристики указанных типов накопителей энергии.

При выборе конкретного проектного решения в общем случае можно использовать многокритериальный подход, но на предварительном этапе выбора источника импульсного тока для лаборатории по сертификации кабельной продукции достаточно проанализировать параметры перечисленных выше накопителей.

Параметры различных типов накопителей электроэнергии

Тип накопителя	Наименование параметра					
	Максимальный ток, МА	Длительность импульса, с	Максимальная запасаемая энергия, МДж	Удельная энергия, МДж/м <sup>3</sup>	Максимальная мощность, МВт	Наличие движущихся частей
Емкостный	310	10 <sup>-8</sup> –10 <sup>-4</sup>	10	0,1–0,5	–	Нет
Индуктивный	–	–	Более 10	10–50	–	Нет
Ударный	0,2	0,1–1	6000	97,5	800	Есть
Взрывной	0,92	6 · 10 <sup>-5</sup>	0,037	10–100	600	Нет

Емкостные накопители [2] энергии (ЕНЭ) используются в физических экспериментах благодаря:

- малому внутреннему сопротивлению (менее 10<sup>-3</sup> Ом);
- малой индуктивности (до 10<sup>-9</sup> Гн).

Это позволяет обеспечить малое время разряда (10<sup>-4</sup>–10<sup>-8</sup> с), высокую эффективную передачу энергии в нагрузку, возможность достижения рекордных значений мощности (до 10<sup>7</sup> МВт) и скорости нарастания тока (10<sup>13</sup> А/с). Емкостные накопители не имеют движущихся элементов, просты в обслуживании, имеют модульный принцип исполнения, который позволяет отключать и заменять элементы при повреждениях. Недостатком ЕНЭ является низкая плотность энергии по сравнению с другими накопителями энергии (0,1–0,5 МДж/м<sup>3</sup>), поэтому емкостные накопители с энергией (1–10) МДж представляют собой крупные сооружения, занимающие большие площади.

Емкостные накопители классифицируются по:

- зарядному напряжению: низкого (10 кВ), среднего (10–100 кВ), высокого (более 100 кВ);
- запасаемой энергии: малой (до 0,1 МДж), средней (до 1 МДж), большой (более 1 МДж).

Генераторы импульсных токов на основе индуктивных накопителей [3] представляют собой индуктивные накопители энергии с размыкателями тока. Накопление энергии происходит при заряде катушки индуктивности от источника постоянного тока. Схема простейшего индуктивного накопителя энергии показана на рис. 1 [2]. Далее накопитель разряжается на нагрузку.

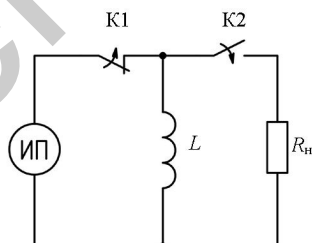


Рис. 1. Схема индуктивного накопителя

При активной постоянной нагрузке ток в ней падает по экспоненте с постоянной времени, определяемой значениями  $L$  и  $R_n$ . Напряжение на нагрузке, равное напряжению на индуктивности  $L$ , в момент коммутации скачком возрастает. При этом мощность, развиваемая в нагрузке, увеличивается по сравнению с мощностью источника питания. Плотность энергии магнитного поля, запасаемой в индуктивных накопителях, на два порядка выше плотности

энергии электрического поля, запасаемой в конденсаторах. При 1 МДж индуктивные накопители становятся экономически более выгодными, чем емкостные. Разработанные в настоящее время индуктивные накопители с обычными катушками имеют энергию порядка 10 МДж и используются в качестве импульсных токов для питания мощных ускорителей, импульсной зарядке конденсаторов и формирующих линий. Достоинствами индуктивных накопителей являются: простота и статичность конструкции, хорошие энергетические и массогабаритные показатели, возможность запитки от низковольтных нерегулируемых источников, высокая надежность. К недостаткам можно отнести необходимость использования быстродействующих силовых коммутаторов, большие электродинамические усилия в активной зоне (что требует изготовления элементов из прочных материалов). Конструирование накопителей с предельными энергиями возможно при использовании для этих целей сверхпроводящих катушек.

Для индуктивных накопителей время разряда зависит в большей степени от сопротивления нагрузки. Время разряда во много раз меньше времени заряда, благодаря чему мощность индуктивного накопителя при разряде существенно больше мощности зарядного цикла.

Максимальный ток и максимальная мощность такого накопителя будут зависеть от времени разрядного цикла.

Ударные генераторы [2] – это электрические машины, работающие в импульсном режиме (рис. 2 [2]). В современном турбогенераторе с номинальной мощностью 100 МВт при частоте вращения 3000 об/мин кинетическая энергия, запасаемая в роторе, достигает значений 200 МДж. Если нагрузке передается 10–20 % запасаемой ротором кинетической энергии, то и энергия, полученная нагрузкой, может достигать 100 МДж и более. Накопление энергии в маховых массах производится при сравнительно небольшой мощности приводного двигателя.

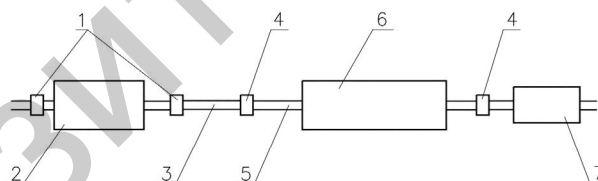


Рис. 2. Схема ударного накопителя: 1, 4 – подшипники; 2 – статор; 3 – ротор генератора; 5 – вал; 6 – кожух маховика; 7 – асинхронный двигатель

Так, ударный генератор, имеющий в импульсе мощность около 1000 МВ·А, разгоняется двигателем мощностью около 1 МВт. Затем включается возбуждение генератора, и к нагрузке поступает электрическая энергия, вырабатываемая при торможении ротора электродинамическими силами.

Накапливаемые энергии в ударных генераторах приближаются к 6000 МДж, максимальные токи достигают нескольких сотен килоампер при длительности 0,1–1,0 с.

Взрывные генераторы [2], называемые также магнитокумулятивными, основаны на принципе сжатия импульсного магнитного поля с помощью

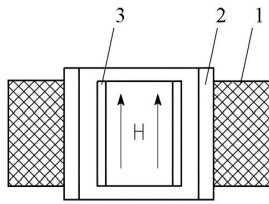


Рис. 3. Взрывной генератор:  
1 – взрывчатое вещество; 2 – катушка с током; 3 – стальная трубка

энергии взрывчатых веществ (рис. 3 [2]). Такого типа генераторы имеют высокую удельную энергию ( $10\text{--}100\text{ МДж/м}^3$ ), что обуславливает возможность их практического применения в импульсной энергетике, физике плазмы, лазерной физике, ускорительной и СВЧ-технике.

Компактность магнитокумулятивных генераторов позволяет создать мощные высокоэнергетические установки, которые при относительно небольшом объеме могут обеспечить

предельные параметры, например при нагреве плазмы до высоких температур, формировании направленных пучков излучения.

Взрывной накопитель имеет малые время и энергию импульса, что препятствует использованию его для испытания кабельной продукции.

Емкостный накопитель имеет малую плотность энергии, вследствие чего имеет большие габаритные размеры, что неприемлемо для условий лаборатории.

Из рассмотренных выше типов накопителей наиболее целесообразным было бы использование источника тока на основе индуктивного накопителя, но необходимо рассмотреть два условия, при которых проводятся испытания:

- 1) при номинальном напряжении;
- 2) при пониженном напряжении.

Если проводить испытания при номинальном напряжении, то для кабелей напряжением 10 кВ необходим источник питания мощностью 984,2 МВт, а энергия импульса должна быть не ниже 984,2 МДж. Импульс с такой энергией может быть получен только с использованием ударного генератора, который при работе будет создавать некоторый шум в связи с наличием движущихся частей.

Если же проводить испытания при пониженном напряжении (несколько сотен вольт), то источниками тока могут быть индуктивный накопитель и ударный генератор.

Установке для испытания кабельной продукции на термическую и электродинамическую стойкость необходим компактный источник тока, способный обеспечивать величину тока 56,82 кА в течение 1 с и 11,16 кА – в течение 4 с. По возможности данный источник питания не должен содержать движущихся частей для обеспечения повышенной надежности.

Задача состоит в определении оптимального накопителя энергии на основе предъявленных требований.

Определим основные цели (требования):

- 1) минимальные габаритные размеры;
- 2) максимум надежности и удобства эксплуатации;
- 3) минимум шума.

Произведем сравнение данных вариантов на основе метода многоцелевой оптимизации.

Эффективность варианта определяется по формуле [4]

$$E = \sum_{i=1}^n v_i e_i \rightarrow \max, \quad (5)$$

где  $v_i$  – оценка важности  $i$ -й цели;  $e_i$  – относительная эффективность  $i$ -й цели.

Относительная эффективность  $e_i$  определяется [4]:  
для максимизируемых целей

$$e_i = \frac{X_i}{\max X_i}; \quad (6)$$

для минимизируемых целей

$$e_i = \frac{\min X_i}{X_i}, \quad (7)$$

где  $X_i$  – значение локального критерия для каждой стратегии;  $\max X_i$  – максимальное значение локального критерия из всех стратегий;  $\min X_i$  – минимальное значение локального критерия из всех стратегий.

Локальные критерии индуктивного накопителя примем за 1,0. Большие габаритные размеры и повышенный шум, издаваемый при работе ударного накопителя, учтем повышенными значениями соответствующих локальных критериев.

В табл. 3 представлены локальные критерии и относительные эффективности целей, определенные по формулам (6) и (7).

Таблица 3

Локальные критерии и относительные эффективности целей

Тип накопителя энергии	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$e_1$	$e_2$	$e_3$
Индуктивный	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Ударный	3,0	0,5	4,0	0,333	0,5	0,25

При равной важности всех целей эффективность накопителя индуктивного:  $E_{\text{инд}} = 0,999$ ; ударного  $E_{\text{уд}} = 0,361$ . Такой же результат будет иметь место и при других оценках важности рассматриваемых целей. Отсюда можно сделать вывод о том, что при проведении испытаний кабельной продукции токами термической и динамической стойкости на напряжении нескольких сотен вольт целесообразнее применять индуктивный накопитель энергии.

Ресурсные испытания являются наиболее продолжительными и требуют большого количества электроэнергии. При проектировании установки для проведения данных испытаний необходимо произвести подбор нагрузочных элементов, которые обеспечивали бы протекание тока нужной величины по испытываемому образцу. Нагрузочные элементы необходимо выбирать таким образом, чтобы можно было получить необходимый ток для испытания кабелей любых сечений.

В качестве нагрузки наиболее целесообразно выбрать печи сопротивления. Их количество и мощность определяются разнообразием испытываемых образцов. Все печи следует поместить в отдельное помещение, примыкающее к лаборатории. Таким образом, при проведении ресурсных испытаний обеспечивается совмещенный технологический процесс: испытание образца и производство готовых изделий (например, термическая и термохимическая обработка изделий из черных и цветных металлов).

## ВЫВОД

Для проведения испытаний токами термической и динамической стойкости при номинальном напряжении целесообразнее использовать ударный накопитель энергии, а при пониженном напряжении – индуктивный накопитель энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М у ф т ы для силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно: ГОСТ 13781.0–86. Государственный стандарт СССР. Взамен ГОСТ 13781.0–79, ГОСТ 23953.0–80; Введ. 24.06.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 18 с.
2. П и ч у г и н а, М. Т. Мощная импульсная энергетика / М. Т. Пичугина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 98 с.
3. Н а к о п и т е л и энергии: учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут [и др.]; под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
4. П р о е к т и р о в а н и е распределительных электрических сетей: учеб. пособие / Г. А. Фадеева, В. Т. Федин; под общ. ред. В. Т. Федина. – Минск: Вышэйш. шк., 2009. – 365 с.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 20.10.2009

УДК 621.317.33

## РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ДВЕНАДЦАТИИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Инж. НАСИРОВ Ш. Н.

*Азербайджанский технический университет*

В статье рассматривается двенадцатиимпульсный регулируемый выпрямитель для применения на тяговых подстанциях постоянного тока. Как известно, источником питания электрифицированной железной дороги Азербайджанской Республики является постоянный ток с номинальным напряжением 3,3 кВ, причем максимальное напряжение в контактной сети не должно превышать 4,0 кВ.