

М.И. Баранов, д.т.н., с.н.с., НТУ «ХПИ»,
С.В. Рудаков, к.т.н., доцент, НУГЗУ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВРЕМЕННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

(представлено д-ром техн. наук Росохой С.В.)

Приведены результаты экспериментальных исследований температурных и токовременных характеристик образцов ряда проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной и полиэтиленовой изоляцией при действии короткого удара большого импульсного тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами и допусками на них для определения пожаростойкости кабеля.

Ключевые слова: большой импульсный ток молнии, токовременные характеристики, пожаростойкость, молниестойкость кабельно-проводниковой продукции

Постановка проблемы. Одним из путей для надежной противопожарной защиты от прямого (косвенного) удара молнии электроэнергетических объектов (ЭЭО) и их инженерных сетей является обоснованный выбор кабельно-проводниковой продукции, устанавливаемой в их первичные и вторичные электрические цепи и отвечающей жестким условиям молниестойкости. В настоящее время отсутствуют методические и другие данные, которые можно использовать для выбора предела пожаростойкости кабелей электрических цепей.

Анализ последних исследований и публикаций. Согласно требованиям действующих международных и национальных стандартов [1-6] при коротком ударе молнии в проводах и кабелях силовых цепей ЭЭО могут протекать импульсные токи положительной полярности амплитудой I_{mL} , имеющие аperiодическую временную форму $\tau_f/\tau_p=10$ мкс/350 мкс, где τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта между уровнями $(0,1-0,9)I_{mL}$ и длительность импульса тока на уровне $0,5I_{mL}$. Значения предельно допустимой температуры при сверхтоках и максимально допустимой температуры невозгораемости для кабелей с медными и алюминиевыми жилами и изоляцией: поливинилхлоридной 150 °С и полиэтиленовой 120 °С. В [1-6] приведены нормированные амплитудно-временные параметры (АВП) и допуски на них для указанного аperiодического импульса тока молнии, соответствующие I-IV уровням защиты от молнии ЭЭО и их инженерных коммуникаций. При этом, для низшего IV уровня защиты от молнии ЭЭО набор АВП характеризуется следующими нормированными количественными значениями [1-7]: $\tau_p=350$ мкс (с допуском ± 10 %); $I_{mL}=100$ кА (с допуском ± 10 %); удельная

энергия (интеграл действия тока молнии) $J_L=2,5 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ (с допуском $\pm 35 \%$); протекший заряд $q_L=\pm 50 \text{ Кл}$ (с допуском $\pm 20 \%$). Проведение на высоковольтном сильноточном оборудовании экспериментальных исследований по определению предела пожаростойкости кабеля: время до пробоя изоляции кабеля в условиях пожара является актуальной научно-технической задачей.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение критической плотности импульса тока молнии в токоведущих частях кабельных изделий и определить значения предельно допустимой температуры и максимально допустимой температуры невозгораемости для кабельных изделий.

Рассмотрим широко используемые в силовых электрических цепях ЭЭО провода и кабели с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией. Для их электротермических испытаний на молниестойкость и пожаровзрывобезопасность используем прямолинейные опытные образцы (ОО) данных проводов (кабелей) длиной 0,5 м, жестко закрепляемые в сильноточной разрядной цепи генератора импульсного тока молнии (ГИТМ). В качестве ГИТМ выбираем созданный в 2014 г. в НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ” мощный высоковольтный генератор типа ГИТМ-10/350 [7].

На рис. 1 показан общий вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350.

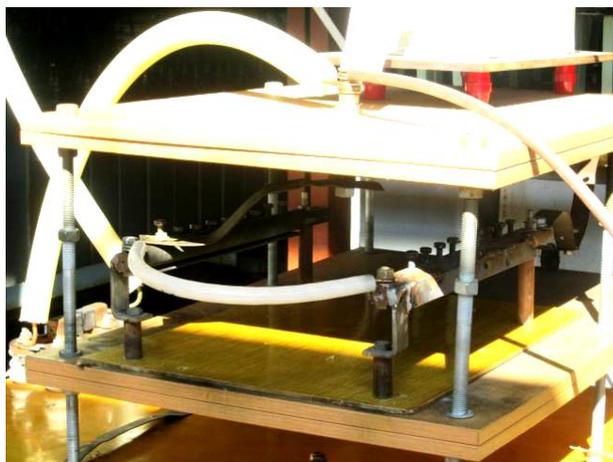


Рис. 1. Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м снятыми защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

Максимальное значение плотности тока в медной жиле рассматриваемого кабеля составляло примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$. Известно, что при такой усредненной плотности δ_{m1d} импульсного тока в медной жиле указанного кабеля предельно допустимая кратковременная температура θ_{1k} ее нагрева не будет превышать $120 \text{ }^\circ\text{C}$ [15,16]. Из полученных нами приближен-

ных данных следует, что расчетное значение плотности тока $\delta_{m1d} \approx 8,2$ кА/мм² отличается от ее опытного значения $\delta_{m1d} \approx 8,9$ кА/мм² примерно на 8 %.

На рис. 2 показан рабочий стол генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией.

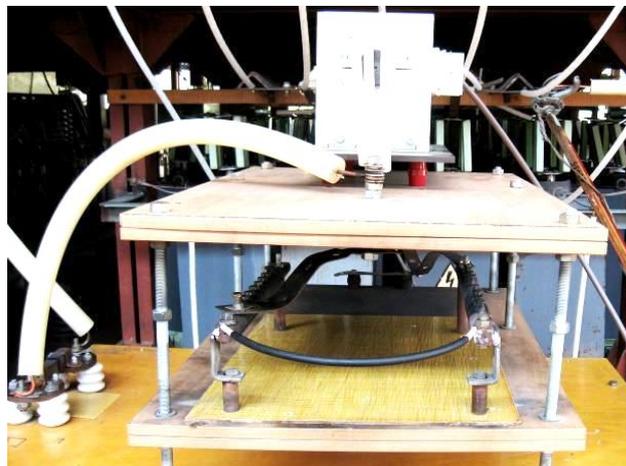


Рис. 2. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и “заглушенным” при электротермических испытаниях его медным экраном-оплеткой до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

На рис. 3 представлена начальная стадия электрического взрыва (ЭВ) медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² испытываемого в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м. Съемка процесса ЭВ указанной медной жилы производилась при помощи цифровой видеокамеры типа Canon M307E с последующей ее раскадровкой. Обследование исследуемого ОО после его электротермического испытания указывает на полную сублимацию его меди из внутренней области поясной ПЭТ изоляции цилиндрической конфигурации радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11.

На рис. 4 в укрупненном виде показана концевая разделка ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после воздействия на него испытательного импульса тока 17/310 мкс амплитудой $I_{mL} \approx 82,9$ кА и ЭВ его расщепленной круглой медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2$ мм².

Усредненное амплитудное значение плотности импульсного тока в электрически взрывающейся медной жиле составляло при этом $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9$ кА/мм². Расчетная оценка для данного электротермического случая ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с) максимального значения

критической плотности импульса тока $17/310$ мкс искусственной молнии по соотношению $\delta_{mk} \approx 4,416 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$ [15] указывает на то, что $\delta_{mk} \approx 27,6$ кА/мм². Можно заключить, что для медной жилы кабеля марки РК 50-7-11 расчетное значение плотности тока $\delta_{mk} \approx 27,6$ кА/мм² от ее опытного значения $\delta_{mk} \approx 25,9$ кА/мм² отличается примерно на 6 %. Оценка температуры θ_1 импульсного джоулева нагрева жилы указанного провода по расчетному соотношению (2) из [15] показывает, что она составляла около $\theta_1 \approx 541^\circ\text{C}$.



Рис. 3. Начальная стадия ЭВ медной жилы сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350



Рис. 4. Внешний вид зоны концевой разделки ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м после прохождения по его расщепленной круглой медной жиле сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² испытательного импульса тока $17/310$ мкс искусственной молнии от генератора ГИТМ-10/350 и ее ЭВ с полной сублимацией меди ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL} / S_1 \approx 25,9$ кА/мм²; $\tau \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $\tau_p \approx 310$ мкс; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 37,9$ Кл)

На рис. 5 запечатлен момент подготовки к электротермическим испытаниям в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 ОО провода марки ПНП 2х2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м, содержащего две параллельно подключенные к массивным стальным электродам рабочего стола используемого высоковольтного источника импульсного тока сплошные круглые медные жилы сечением $S_1 \approx 5$ мм².



Рис. 5. Стол генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленными на его стальных электродах сплошными круглыми медными жилами общим сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ ОО провода марки ПНП 2х2,5 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на них аперiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

На рис. 6 приведен внешний вид провода марки ПНП 2х2,5 с ПВХ изоляцией, испытавший воздействие на его две параллельно включенные в разрядную цепь генератора типа ГИТМ-10/350 сплошные круглые медные жилы общим сечением $S_1 \approx 5 \text{ мм}^2$ аперiodического импульса тока 17/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$. Усредненное амплитудное значение плотности большого импульсного тока в медных жилах исследуемого провода в этом случае было равным около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 16,8 \text{ кА/мм}^2$. Медные жилы данного провода выдержали оказанное на них сильное электротермическое и электродинамическое воздействие, а его ПВХ изоляция – нет.



Рис. 6. Внешний вид фрагмента ОО провода марки ПНП 2х2,5 с ПВХ изоляцией

В этом случае имело место локальное разрушение его ПВХ изоляции из-за ее перегрева от протекающего по медным жилам рассматриваемого провода аперiodического импульса 17/335 мкс тока искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8 \text{ кА}$. На значительный нагрев

ПВХ изоляции при этом виде испытаний указывает также то, что усредненное максимальное значение плотности импульсного тока $\delta_{m1} \approx 16,8$ кА/мм² в медных жилах провода марки ПНП 2х2,5 примерно в 1,8 раза превышало расчетное амплитудное значение предельно допустимой в них плотности используемого импульса тока, равное $\delta_{m1d} \approx 1,506 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2} \approx 9,1$ кА/мм² [15]. Кроме того, оценка температуры θ_1 импульсного джоулевого нагрева протекающим импульсом 17/335 мкс тока медных жил указанного провода по расчетному соотношению (2) из [15] показывает, что она составляла около $\theta_1 \approx 912$ °С. Разумеется, что такое значение θ_1 значительно превышает предельно допустимую кратковременную температуру θ_{1k} нагрева проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией, составляющую примерно 150 °С [15,16]. Эти данные косвенно подтверждают достоверность экспериментально найденного нами максимального значения токовременных характеристик пожарной опасности кабелей.

На рис. 7 приведен внешний вид закрепленной на электродах рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 сплошной круглой алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6$ мм² ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м (вторая алюминиевая жила испытываемого провода была нами “заглушена”).

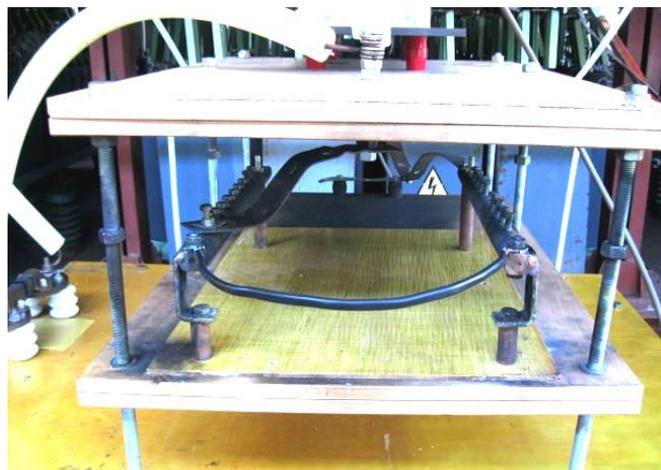


Рис. 7. Внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350 с жестко закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой алюминиевой жилой сечением $S_1 \approx 6$ мм² ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на нее апериодического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

На рис. 8 показана начальная стадия ЭВ испытываемой в сильно-точной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 [7] алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6$ мм² ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $\delta_{m1k} \approx 14$ кА/мм²).

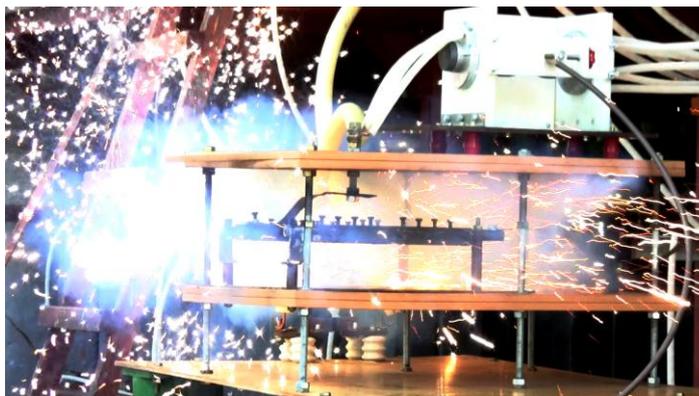


Рис. 8. Начальная стадия ЭВ сплошной круглой алюминиевой жилы сечением $S_1 \approx 6 \text{ мм}^2$ ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м в сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350

Расчетная оценка максимального значения критической плотности импульса тока 17/265 мкс искусственной линейной молнии для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией по приближенному соотношению $\delta_{mk} \approx 2,863 \cdot 10^8 \cdot I_{mL} / (J_L)^{1/2}$ [15] свидетельствует о том, что в данном электротермическом случае оно численно составляет около 19 кА/мм². Полученное опытным путем для алюминиевой жилы значение $\delta_{mk} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$ отличается от указанного расчетного значения $\delta_{mk} \approx 19 \text{ кА/мм}^2$ примерно на 26 %. Оценка температуры θ_1 нагрева протекающим импульсом тока алюминиевых жил указанного провода по расчетному соотношению (2) из [14] показывает, что она составляла около $\theta_1 \approx 472 \text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы. 1. Экспериментально установлено, что при решении актуальных прикладных задач определения токовременных характеристик пожарной опасности кабелей к короткому удару грозовых разрядов в соответствии с требованиями действующих международных и национальных стандартов необходимо исходить из того, что предельно допустимая плотность импульса 15/335 мкс тока молнии в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет около $\delta_{md} \approx 9 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – около $\delta_{md} \approx 6 \text{ кА/мм}^2$.

2. Из экспериментальных исследований на предел пожаростойкости кабелей образцов кабельно-проводниковой продукции ЭЭО на уникальном высоковольтном генераторе импульсов тока искусственной молнии типа ГИТМ-10/350 следует, что критическая плотность ее импульса 15/335 мкс тока в медных токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией составляет примерно $\delta_{mk} \approx 26 \text{ кА/мм}^2$, а в алюминиевых токоведущих частях их проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – примерно $\delta_{mk} \approx 14 \text{ кА/мм}^2$. При достижении в медных (алюминиевых) жилах (экранах) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО таких плотностей указанного импульса тока молнии последние будут подвергаться ЭВ и выходу из строя.

3. Найденные опытные значения плотностей δ_{mld} и δ_{mlk} нормированного согласно требований действующих международных и национальных стандартов импульса 15/335 мкс тока искусственной молнии в медных и алюминиевых токоведущих частях кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ЭЭО будут при соответствующем выборе и установке с их учетом подобной продукции в силовых цепях ЭЭО способствовать повышению уровня их функциональной и противопожарной безопасности в условиях активной грозовой деятельности.

4. Определены значения предельно допустимой температуры при сверхтоках и максимально допустимой температуры невозгораемости для кабельных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 62305-1: 2010 “Protection against lightning.– Part 1: General principles”.– Geneva, Publ. IEC, 2010.

2. IEC 62305-2: 2010 “Protection against lightning.– Part 2: Risk management”.– Geneva, Publ. IEC, 2010.

3. IEC 62305-3: 2010 “Protection against lightning.– Part 3: Physical damage to structures and life hazard”.– Geneva, Publ. IEC, 2010.

4. IEC 62305-4: 2010 “Protection against lightning.– Part 4: Electrical and electronic systems within structures”.– Geneva, Publ. IEC, 2010.

5. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 62305-1– 2010. “Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы”.– М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.

6. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile.–Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile.– Berlin, Buchverlag DS, 2008. – 16 s.

7. Баранов М.И. Мощный высоковольтный генератор апериодических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко, С.В. Рудаков // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №1. – С.51-56.

8. Комельков В.С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / В.С. Комельков, П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, Г.С. Кучинский, Н.Н. Николаевская, П.И. Шкурпат, Г.А. Шнеерсон // – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

9. Баранов М.И. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, В.Н. Дныщенко // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – №3. – С.81-85.

10. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии / М.И. Баранов // *Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: “Техніка та електрофізика високих напруг”*.– Харків:

НТУ “ХП”, 2014. – №50 (1092). – С.13-20.

11. Баранов М.И. Высоковольтный управляемый сильноточный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50 / Баранов М.И., Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Пличко А.В., Понуждаева Е.Г. // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Серія: “Техніка та електрофізика високих напруг”. – Харків: НТУ “ХП”, 2014. – № 50 (1092). – С.28-37.

12. Баранов М.И. Высоковольтные сильноточные воздушные разрядники генератора тока искусственной молнии / М.И. Баранов, Г.М. Колиушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №6. – С.58-62.

13. Белоруссов Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева // – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

14. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии / М.И. Баранов, В.И. Кравченко // Электричество. – 2013. – №10. – С. 7-13.

15. Орлов И.Н. Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / И.Н. Орлов // – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.

М.І. Баранов, С.В. Рудаков

Визначення струмочасових та температурних характеристик пожежної безпеки кабельних виробів

Наведені результати експериментальних досліджень температурних та струмочасових характеристик зразків проводів та кабелів електричних мереж об'єктів промислової електроенергетики з мідними (алюмінієвими) жилами (екранами), полівінілхлоридної та поліетиленової ізоляцією до дії короткого удару великого імпульсного струму штучної блискавки з нормованими по міжнародному стандарту ІЕС 62305-1-2010 амплитудно-часовими параметрами і допусками на них для визначення пожежостійкості кабелю.

Ключові слова: великий імпульсний струм молнії, струмочасові характеристики, пожежостійкість, блискавкостійкість кабельно-проводникової продукції.

M.I. Baranov, S.V. Rudakov

Definition thecoreman and temperature characteristics of a fire hazard cable products Experimental researches of electro-thermal resistibility of cable-explorer products, applied in the power electric circuits of objects of industrial electroenergy, to action on its copper and aluminium parts bearings a current rationed on the international standard of IEC 62305-1-2010 aperiodic impulse 10/350 μ s of current of artificial lightning.

Keywords: large impulsive current of lightning, wires and cables of electric chains of objects of electroenergy, generator of large impulsive current of artificial lightning, electro-thermal resistibility to lightning of cable-explorer products.